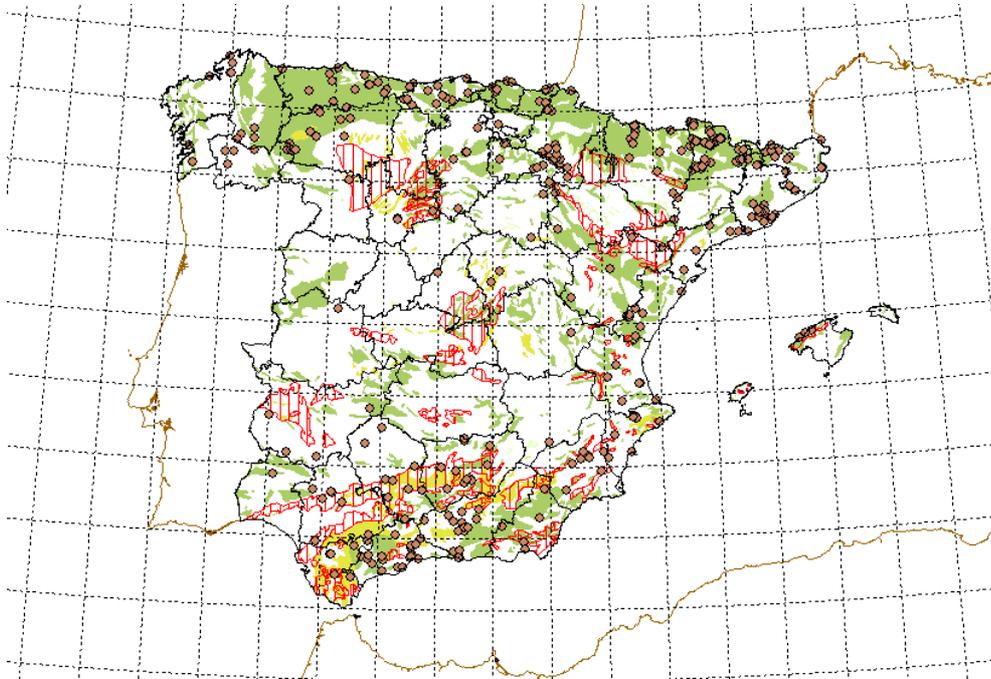


Proyecto:

**Análisis de la vulnerabilidad por movimientos de
ladera: Desarrollo de las metodologías para
evaluación y cartografía de la vulnerabilidad.**



MEMORIA

2005

Dirección: Mercedes Ferrer Gijón

Realización: Juan Carlos García López-Davalillo

INDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	EL RIESGO GEOLÓGICO. DEFINICIONES.	4
2.1	CONCEPTO DE RIESGO (<i>RISK</i>)	4
2.1.1	<i>El riesgo desde las ciencias sociales.....</i>	6
	Una nueva concepción social del riesgo.....	7
	Riesgo y desastre	9
2.1.2	<i>El riesgo desde las ciencias naturales e ingeniería</i>	10
2.2	COMPONENTES DEL RIESGO	11
2.2.1	<i>Peligrosidad (Hazard level).....</i>	12
2.2.2	<i>Vulnerabilidad (Vulnerability).....</i>	14
2.2.3	<i>Exposición (Exposure)</i>	18
	Vulnerabilidad versus exposición.	18
2.3	IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE VULNERABILIDAD	20
	Evaluaciones de Vulnerabilidad.....	23
3	RIESGO Y PELIGROSIDAD POR MOVIMIENTOS DE LADERA.....	25
3.1	LOS MOVIMIENTOS DE LADERA.	25
3.2	APROXIMACIÓN AL RIESGO POR MOVIMIENTOS DE LADERA.....	26
3.2.1	<i>Esquema de gestión del riesgo por movimientos de ladera</i>	30
3.2.2	<i>El comportamiento intrínseco de los movimientos de ladera</i>	31
3.3	PELIGROSIDAD POR MOVIMIENTOS DE LADERA	33
3.3.1	<i>Magnitud e intensidad.....</i>	33
3.3.2	<i>Movilidad y alcance de los movimientos de ladera.....</i>	40
	Peligrosidad y susceptibilidad.....	42
3.4	ELEMENTOS EN RIESGO POR MOVIMIENTOS DE LADERA	47
3.4.1	<i>Exposición.....</i>	48
4	VULNERABILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA.....	54
4.1	¿QUE ES LA VULNERABILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA?.....	54
4.2	DETERMINACIÓN, EVALUACIÓN Y APLICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN ANÁLISIS DE RIESGO POR MOVIMIENTOS DE LADERA	60
4.2.1	<i>Consideraciones generales</i>	60
4.2.2	<i>Determinación y aplicación desde las ciencias naturales e ingenierías.....</i>	63
	Revisión y estado del arte.....	66
	Discusión.....	89

Nuevas Metodologías.....	90
Un estudio preliminar de vulnerabilidad en Rheinhessen, Alemania.....	90
Evaluación avanzada de la vulnerabilidad en BÍLDUDALUR, Islandia.....	92
Metodología de evaluación de basada en la identificación de los bienes y la estimación de las lesiones personales y de los costes de los daños en bienes materiales (Alexander, 2004).....	94
4.2.3 <i>Determinación y aplicación desde las ciencias sociales</i>	101
4.3 VULNERABILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA EN EL PERIODO 1993-2002.....	117
5 APLICACIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD POR MOVIMIENTOS DE LADERA: LA ESTIMACIÓN DE CONSECUENCIAS ADVERSAS.....	126
5.1 INTRODUCCIÓN.....	126
5.2 USO DE DATOS HISTÓRICOS.....	129
5.3 UN MARCO DE TRABAJO PARA LA ESTIMACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS ADVERSAS 132	
5.3.1 <i>Muertos y heridos</i>	135
5.3.2 <i>Pérdidas económicas directas e indirectas</i>	148
5.3.3 <i>Pérdidas intangibles</i>	155
5.4 MODELOS DE CONSECUENCIAS.....	157
5.4.1 <i>Ejemplos de cálculo de consecuencias adversas por movimientos de laderas</i> .	165
Modelos de daños simples.....	165
A) Retroceso de acantilados.....	165
B) Afección a tuberías enterradas.....	166
C) Movimiento lento en grandes deslizamientos.....	169
D) Caída de rocas sobre una carretera.....	172
E) Daños producidos por cortes de tráfico: desprendimientos y corte de carretera. .	173
F) Debris flow en Hong Kong.....	179
Modelos de daños con múltiples resultados posibles.....	182
G) Deslizamiento del frente de una cantera en Hong Kong tras un episodio de lluvias que puede afectar a viviendas ilegales. Estimación de las consecuencias mediante el método del árbol de eventos, método prospectivo.	185
H) Polígono industrial situado en una cantera con desprendimientos. Ejemplo de árbol lógico de eventos.....	191
I) Un niño muere tras una explosión de gas en su casa causada por la rotura de una conducción enterrada en una ladera que deslizó. Ejemplo de árbol lógico de fallos.	194
5.4.2 <i>Complejidad de resultados e incertidumbres futuras</i> ,.....	197

ANEXO 1: DATOS DE PÉRDIDAS OCURRIDAS POR MOVIMIENTOS DE LADERA EN ESPAÑA Y EN EL MUNDO.....	0
ANEXO 2: MAPAS INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA EN ESPAÑA. ...	0
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....	0

1 INTRODUCCIÓN

Los movimientos de ladera son fenómenos geodinámicos, componentes del geo-sistema natural, que en numerosas regiones contribuyen significativamente en la evolución del relieve y del paisaje. Son por tanto procesos geomorfológicos naturales que ocurren en lugares caracterizados por unas condiciones medioambientales específicas. Son muy importantes en el ciclo de erosión-sedimentación, tanto en zonas de montaña (cordilleras, volcanes y cerros) como en los medios litoral y marino (deltas y talud continental).

Como son procesos que tienen lugar en la superficie terrestre (lugar de ocupación y desarrollo de las principales actividades humanas) modificando más o menos bruscamente sus condiciones, están entre los riesgos de origen geológico más extendidos en el mundo. Causan cada año miles de millones de euros de pérdidas y miles de muertos y heridos.

Los deslizamientos, flujos, desprendimientos, avalanchas, etc. representan un componente importante en muchos grandes desastres y son los responsables de pérdidas que en numerosas veces no se les imputan. Así, no es extraño que el daño producido por movimientos de ladera habitualmente sea incluido en los informes de pérdidas de los procesos que los desencadenaron. Estos son generalmente los terremotos, las lluvias intensas o prolongadas y las erupciones volcánicas.

A pesar de las mejoras en el reconocimiento, predicción, medidas preventivas y sistemas de emergencia, Schuster et al. (1986) exponen que la actividad de los movimientos de ladera en el mundo va en aumento. Se espera que esta tendencia continúe a lo largo del siglo próximo. Según este autor, los factores causantes del aumento en la actividad son la creciente urbanización y desarrollo en áreas expuestas a deslizamientos, la continua deforestación de zonas con deslizamientos potenciales, y el aumento en la precipitación regional debido a cambios climáticos. Todos estos condicionantes son extrapolables a nuestro país.

Los movimientos de ladera son los procesos geodinámicos que mayor frecuencia y extensión presentan en España. Las pérdidas que ocasionan son también las mayores después de las inundaciones. Su incidencia es notoria, sobre todo en lo que se refiere a la construcción y mantenimiento de las vías de comunicación y conducciones subterráneas (obras lineales), así como en los núcleos urbanos. No obstante, el hecho de que tengan su aparición de manera puntual y localizada, así como que se produzcan generalmente en áreas de baja densidad de población, ha motivado que no se les preste la atención que correspondería a su actividad (Corominas, 1989).

La valoración de los daños y pérdidas económicas y/o sociales debidas a los movimientos de ladera (deslizamientos, desprendimientos, flujos, etc.) se realiza generalmente a partir de los desastres ya ocurridos, una vez se han producido los daños. Esta situación es consecuencia de la gran dificultad que entraña, en comparación con otros tipos de riesgos geológicos, la evaluación de la peligrosidad de los movimientos de ladera y, sobre todo, la evaluación de la vulnerabilidad o grado de daño potencial que pueden causar los procesos según el tipo y características de los elementos que pueden ser afectados (poblaciones, infraestructuras, edificios singulares, personas, bienes, etc.). Por ello, aún no se ha desarrollado una metodología suficientemente válida para el cálculo de los riesgos potenciales asociado a estos eventos.

Por otro lado, la extensión del daño potencial varía enormemente. Una de las principales fuentes de estimación de costes de daños asociados con procesos naturales específicos son los datos de las reclamaciones atendidas por las compañías de seguros. Desgraciadamente, tales estadísticas no suministran datos de pérdidas atribuibles específicamente a deslizamientos (Kron 2000). Los daños causados por deslizamientos son mayoritariamente incorporados en los informes oficiales dentro de las categorías de "inundaciones" o "tormentas".

La gran variedad de tipologías de movimientos de ladera y el gran número de factores que los condicionan y desencadenan, son aspectos que definen igualmente la dificultad de su estudio. Durante los últimos años, los diferentes grupos de investigación nacionales e internacionales han centrado sus esfuerzos en la prevención de los fenómenos y la mitigación de sus daños, consiguiendo avances importantes en lo referente a la definición zonas

susceptibles y, en el mejor de los casos, a evaluación de la peligrosidad espacial de una forma cualitativa. No obstante, no se ha avanzado de igual forma en la evaluación del riesgo, debido precisamente a la dificultad de evaluar cuantitativamente la peligrosidad y la vulnerabilidad.

En consecuencia, es necesario investigar cuales pueden ser las vías que permitan dicha cuantificación. En el caso de la vulnerabilidad es una labor compleja que vamos a intentar enfocar desde la perspectiva metodológica, para ello se hará un repaso de cuales han sido y están siendo las referencias metodológicas para el análisis del riesgo por movimientos de ladera. En segundo lugar se analizarán todos los elementos que inciden en la vulnerabilidad social y económica a este tipo de fenómenos y la posibilidad de obtención de datos que permitan su definición, a continuación se presentarán esquemas metodológicos para su estudio y estimación, en cuarto lugar se presentarán ejemplos de posibles aplicaciones de la vulnerabilidad en los cálculos de consecuencias y por último se realizará un análisis de las posibles representaciones cartográficas de vulnerabilidad por movimientos de ladera.

2 El riesgo geológico. Definiciones.

“Las formas como se definan o conceptúen los desastres distan de ser un mero ejercicio semántico. Por el contrario, constituyen un paso fundamental y una influencia determinante en la organización del conocimiento y, en consecuencia, en la manera en que se encara la investigación y la acción para enfrentarla...” (Lavell, 1993).

2.1 Concepto de Riesgo (*Risk*)

El riesgo es un concepto humano. Todos tenemos la conciencia cierta de que nada es seguro en la vida. Cuando cruzamos una calle existe el riesgo de que seamos atropellados por un vehículo, también en casa podemos sufrir lesiones por accidentes o incendios.

La Real Academia Española en su diccionario de la lengua define riesgo como **“contingencia** (posibilidad de que algo suceda o no suceda) **o proximidad** (cualidad de cercano, que dista poco en el espacio o en el tiempo) **de un daño** (detrimento, perjuicio, menoscabo, dolor o molestia, pérdida, deterioro...)” Esta definición hace hincapié en la incertidumbre y la cercanía o no del efecto del evento potencialmente dañino. Estas cualidades están impregnadas de variabilidad factorial en el orden espacial y sobre todo en el temporal. Por tanto, el concepto de riesgo por definición es imposible de cuantificar salvo que se utilicen escenarios determinados, términos relativos, órdenes de magnitud o probabilidades de ocurrencia. Todas estas acotaciones han de tener un sentido lógico y práctico que muchas veces o no se tiene en cuenta, o se orienta en función de unos objetivos concretos, por lo que existe gran confusión en terminología y metodología de evaluación y valoración del riesgo.

Actualmente aún no hay un único conjunto de definiciones de riesgo consensuadas, aunque existen signos de alguna convergencia de puntos de vista en la literatura. Genéricamente el riesgo puede definirse como: el potencial de ocurrencia de consecuencias adversas, pérdida, daño o perjuicio, o como la posibilidad (suerte, azar) de pérdida. Pero existen dos visiones del concepto de riesgo con trayectorias un tanto paralelas, que son

las de la ciencia social y las ciencias natural e ingenierías que hemos denominado sociológica y tecno-natural.

Desde un punto de vista sociológico el riesgo puede entenderse como la “posibilidad de ocurrencia de situaciones límites o de relaciones extremas entre fenómenos físicos y la estructura y organización social” (Thomas y Suavita, 2000, Cardona, 1993, Lavell, 1993). En esta definición se destaca que el riesgo no significa la ocurrencia de situaciones límite, es decir, de desastres, y el estar en riesgo es una condición anterior a la ocurrencia de dichos eventos que pueden convertirse en desastres.

Desde el punto de vista tecno-natural se ha hecho un esfuerzo en la cuantificación del riesgo, por lo que se define también como las consecuencias negativas más probables (daños, pérdidas, etc.) que podrían resultar del impacto de un evento sobre la exposición (valores en riesgo) cuyas vulnerabilidades están relacionadas con el evento específico. El riesgo se considera así como una combinación de peligrosidad (*hazard*), vulnerabilidad (*vulnerability*) y exposición (*exposure*).

Una clasificación clásica de los riesgos es ordenarlos según la génesis del peligro, en dos grupos principales:

- Riesgos naturales: cuyo origen son los procesos físico-químicos y biológicos que gobiernan la dinámica natural en la Tierra. Que incluyen los geológicos (litosfera e hidrosfera) y biológicos (biosfera)
- Riesgos antrópicos: cuyo origen es el ser humano, que incluyen los Tecnológicos (accidentes industriales, nucleares, de tráfico,...), los Económico-financieros (una inversión o un crédito fallidos) y los Sociales, ligados a los hábitos de vida (tabaquismo) o a problemas y conflictos (guerra, delincuencia, terrorismo,...).

No obstante no existe un límite claro de clasificación ya que muchos riesgos se interrelacionan entre sí como por ejemplo los riesgos naturales inducidos o mal gestionados por el hombre o muchos riesgos tecnológicos que son en realidad sociales.

2.1.1 El riesgo desde las ciencias sociales

El riesgo, como proceso, está sujeto al cambio dependiendo de la evolución de sus componentes, es decir, áreas que actualmente están en riesgo bajo o medio pueden cambiar esa condición de acuerdo con las complejas interrelaciones sociales y naturales descritas, por lo tanto la definición del nivel de riesgo se refiere a las características actuales que posee una determinada zona.

De esta manera, los riesgos son problemas ambientales que incorporan en su causalidad tanto elementos naturales como sociales y que no pueden ser reducidos a eventos externos a la sociedad, como afirma Leff (1994) la "cuestión ambiental es una problemática de carácter eminentemente social".

Como anota Vidart (1997), esta afirmación, que ha sido aceptada en la mayor parte de las ciencias actuales, considera al ambiente como algo externo al ser, donde si bien cada ser construye su ambiente pues incorpora ciertos elementos del entorno para garantizar su existencia, estos son externos a él y las relaciones que mantiene con ellos son básicamente de conexión. Esta concepción está anclada en la creencia de que existe un mundo separado del hombre (o del ser) e íntimamente ligado con la concepción de la naturaleza como algo ajeno a la sociedad (Harvey, 1996; Cosgrove, 1990), ignorando la base "natural" de esta última. Así, los riesgos se interpretan como eventos aislados que no hacen parte de la sociedad, sino que son manifestaciones externas de la naturaleza.

Los sociólogos tienden a criticar el uso tecnológico del término "riesgo natural" porque este implica que "lo natural" está poniendo en peligro a "lo humano". Pero la naturaleza no está haciendo ningún perjuicio o beneficio. No existe ninguna "intención" o "consciencia" subyacente a la ocurrencia de un proceso. Cualquier proceso que opera en la naturaleza está basado únicamente a leyes físicas, aún cuando sea gobernado por un comportamiento caótico. Por lo tanto, cualquier peligro natural, riesgo natural, y en consecuencia cualquier forma de

desastre "natural" está causado únicamente por el hombre (Geipel 1992).

Lo que se plantea en la actualidad con el desarrollo de enfoques donde se considera la realidad como una totalidad integral y altamente compleja, es la concepción que no existe un mundo separado de los seres que lo habitan, conclusión válida para cualquier tipo de organismo. Es decir, hay una relación de identidad entre el ambiente y el ser, que "existe en tanto mantenga relaciones recíprocas y dialécticas con los seres u objetos cuya presencia intercalar determina su existencia" (Vidart, 1997); el ser no está fuera del ambiente y los riesgos son sociales en su esencia misma.

Como apunta Harvey (1996) "los procesos no operan **en** sino construyen **activamente** el espacio y el tiempo". De esta manera, los riesgos al hacer parte de estas relaciones complejas, se circunscriben en la construcción del espacio y no son eventos extraordinarios y ajenos a la sociedad, sino que hacen parte de la cotidianidad y de la historia.

Los riesgos no son únicamente fenómenos de índole estrictamente natural, sino que integran factores políticos, culturales, económicos, históricos, etc. y su estudio debe realizarse desde una posición compleja e interdisciplinaria, donde forman parte de una realidad (física, social y simbólica) socialmente construida, bien sea "como objetivación material de la cultura o bien como significación y simbolización" (Montañez, 1997); dinámica y por lo tanto inacabada que continuamente está organizando y siendo organizada por las relaciones entre los sistemas de objetos y de acciones.

Desde esta visión, los riesgos y los desastres deben ser vistos como problemas producto de expresiones particulares de las interacciones Individuo-Sociedad-Naturaleza y donde su solución o propuestas de solución deben tener como base al lugar como expresión de múltiples intencionalidades y escalas.

Una nueva concepción social del riesgo

Hasta ahora, ha primado una concepción del espacio como espacio físico, otorgándole a la amenaza el mayor peso explicativo en la generación y determinación del riesgo, e incorporando la vulnerabilidad únicamente a partir

de variables materiales: localización relativa, materiales de construcción, infraestructura, etc., sin tener en cuenta el componente social de las comunidades a las que afecta.

La **generación de riesgos** forma parte de una construcción histórica del espacio, siendo una visión integral, pues considera variables sociales que han llevado a la consolidación de los barrios de ladera, dentro de los que se destaca el proceso urbanización y las formas de percepción de las condiciones físicas del ambiente. De esta manera, al comprender los procesos de organización espacial, se pueden hacer mejores propuestas de prevención y mitigación, donde deje de pensarse que la ocupación de sitios físicamente inadecuados es debido a comprensiones imperfectas de la realidad natural, ignorando causas sociales primarias como por ejemplo la imposibilidad (económica, jurídica) de acceder a otras áreas, o los procesos de identidad y el sentido de pertenencia que las comunidades construyen sobre sus espacios (Sánchez, V. y Mendoza C., 2001).

Todo desastre "natural" es por tanto el resultado de una mala o falsa adaptación a la naturaleza (Dombrowsky 2001). Pohl (1998) afirma que si un evento natural pone en peligro a personas o propiedades, el evento se percibirá como un peligro. Si la persona o sociedad amenazada o puesta en peligro puede tomar decisiones y reaccionar frente a la ocurrencia de un proceso potencial, el peligro se convierte en riesgo. Así, si un individuo o sociedad no tiene la oportunidad de tomar decisiones, el evento natural es "únicamente" un peligro, no un riesgo.

Smith (2001: 6) señala que "... los riesgos significan diferentes cosas para gente diferente porque cada persona posee una única percepción del medio..." y por consiguiente aporta únicamente una vaga definición. Ya en 1956, *Simon* "...argumenta que la percepción es un filtro a través del cual el tomador de decisiones ve el medio ambiente "objetivo" y sus peligros..." (En Smith 2001: 67).

Puede concluirse por tanto que no existe una única –o consensuada- definición y concepción del riesgo en la ciencia social.

Riesgo y desastre

Cuando un evento produce unas consecuencias socialmente inaceptables podemos hablar de un evento de alto riesgo, incluso si su probabilidad de ocurrencia es baja. Por ejemplo, un gran terremoto catastrófico será un evento de alto riesgo pese a que su frecuencia sea baja. De igual forma, un evento de impacto bajo y que se produce con frecuencia podría considerarse un riesgo alto si las consecuencias acumuladas son inaceptables.

Vale la pena preguntarse ¿qué es un desastre? Un **desastre** no puede confundirse con la ocurrencia de un fenómeno de origen natural o antrópico, es decir, no se puede confundir el desastre producido por el lahar del Nevado del Ruiz en 1985 con el lahar mismo. El evento físico, es una condición necesaria más no suficiente para hablar de desastre. Tampoco se puede reducir a un hecho externo o aislado y mucho menos determinarlo por los daños económicos y sociales que ocasiona: un desastre es “cualquier evento que tiene un mínimo de diez muertos, cien afectados o que conduce a la llamada de asistencia externa (internacional)” (Lavell, 1996). Estas definiciones provienen de una visión fiscalista y tecnocrática, convirtiendo a los desastres en hechos totalmente anormales y dejando toda su responsabilidad a eventos físicos, que son impredecibles, inevitables, inmanejables o “de origen divino”; negándose así los procesos históricos y sociales que han tenido que ver en la construcción de las condiciones que permiten la ocurrencia de un desastre.

Para Dynes (1994) “un desastre es una ocasión normativamente definida en una comunidad, cuando se hacen esfuerzos extraordinarios para proteger y beneficiar algún recurso social cuya existencia se considera amenazada”. Esta afirmación permite evitar la inclusión de parámetros matemáticos para definir un desastre y deja dicha consideración a las condiciones particulares del lugar o región, pero no tiene en cuenta explícitamente el proceso histórico de causalidad.

De otro lado para Molano et al. (1993) un desastre es un evento producto de “un desenlace nefasto de la trama socio-natural, de tal manera que se disloca la vida social y para enfrentarlo se hace necesaria la acción colectiva”. Así los

desastres son eventos coyunturales, resultado de procesos socio-naturales continuos involucrados en la cotidianidad.

Estas definiciones de desastre permiten superar las anteriores, situando el énfasis en las relaciones históricas de apropiación, transformación y adaptación Individuo - Sociedad – Naturaleza, en donde el desastre no es un hecho aislado sino "un momento concreto de lo normal" (Lavell, 1996). De esta manera podemos considerar un **desastre** como: "una ocasión de crisis o stress social, espacio-temporalmente definida, donde una sociedad o grupos de esta, sufren daños y/o pérdidas y alteraciones en su funcionamiento rutinario, con tal magnitud e intensidad que se exige la participación de agentes externos en su atención y resolución"

En esta misma dirección la EIRD¹ de la ONU define desastre como "lo que sucede cuando la ocurrencia de un fenómeno natural afecta a un sistema social vulnerable". Los fenómenos naturales solo generan impactos por su interacción con la gente y su entorno; estos pueden llegar a tener dimensiones catastróficas, dependiendo de la coyuntura de las poblaciones del lugar.

Según Olcina et al. (2002: 55) "...riesgo natural es la posibilidad de que un territorio y la sociedad que lo habita pueda verse afectado por un fenómeno natural de rango extraordinario. La catástrofe es el efecto perturbador que provoca sobre un territorio un episodio natural extraordinario y que a menudo supone la pérdida de vidas humanas. Si las consecuencias alcanzan tal magnitud que ese territorio necesita ayuda externa en alto grado se habla de desastre, concepto que alude al deterioro que sufre la economía de una región y al drama social provocado por la pérdida de numerosas vidas...".

2.1.2 El riesgo desde las ciencias naturales e ingeniería

Cuando se pretende abordar la tarea de analizar y gestionar el riesgo es necesaria una cuantificación y una valoración lo más objetiva posible del riesgo. Con objeto de esclarecer de algún modo la compleja interrelación de factores sociales y naturales que constituyen el riesgo, desde el ámbito científico y técnico se han realizado divisiones conceptuales que, con sus

¹ EIRD es la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas.

limitaciones, han ayudado a comprender, discriminar y cuantificar los diversos componentes del riesgo.

2.2 Componentes del riesgo

Cuantitativamente el riesgo se define como la pérdida o el daño anual esperado, siendo una realidad conceptual potencial.

La ecuación general del Riesgo es la siguiente:

$$R = \Sigma \Sigma \Sigma P \times E \times V \times \Delta P \times \Delta E \times \Delta V$$

Donde:

R = Riesgo o pérdida esperada (euros/año, víctimas/año)

P = Probabilidad

E = Exposición (personas; euros)

V = Vulnerabilidad (tanto por uno de pérdida)

Según la terminología utilizada por la Organización de las Naciones Unidas de Ayuda en Desastres (UNDRO) y definida por Varnes en 1984, el **riesgo específico (Rs)** (*Specific Risk*) es el grado de pérdida esperado debido a un fenómeno potencialmente dañino. Este puede ser estimado por la relación entre dos variables fundamentales: peligrosidad y vulnerabilidad. **Rs = P × V**.

La **peligrosidad (P) o amenaza (Hazard)** se refiere básicamente a la posibilidad o probabilidad de ocurrencia² durante un período dado de tiempo de un fenómeno (natural o construido) potencialmente dañino (peligro) en un área determinada conocidas las características del mismo (magnitud o intensidad) y su zona de acción e influencia. La **vulnerabilidad (V)** (*Vulnerability*) es el grado de pérdidas provocado en un elemento o conjunto de elementos presentes en un área por la ocurrencia del fenómeno determinado. Comúnmente se expresa en una escala de 0 (sin daño) a 1 (pérdida total).

² La probabilidad de ocurrencia es la inversa del periodo de retorno (T) y puede ser expresada como Probabilidad de ocurrencia anual Pa o como probabilidad de ocurrencia a largo plazo Px, donde x es el número de años elegido. La siguiente ecuación estadística convierte Pa en Px: **Px = 1 - (1 - Pa)^x**

Por ejemplo, la probabilidad de ocurrencia de un peligro de deslizamiento en un periodo de 50 años si probabilidad anual es de 1 en 475 será: $P(50) = 1 - (1 - (1/475))^{50} = 0.10 = 10\%$

Por tanto para la determinación de ambos es necesario conocer y caracterizar tanto el área potencialmente afectable por el evento como la severidad de este.

El riesgo específico es de utilidad para comparaciones entre situaciones de riesgo que pueden ayudar a priorizar actuaciones empezando por mitigar las situaciones de mayor riesgo unitario; también para la realización de mapas de riesgo en zonas que carezcan aún de exposición o vallan a experimentar un crecimiento significativo de la misma.

El **riesgo total (R_T)** se define como el número de vidas perdidas, personas damnificadas, daños a la propiedad, etc. debidas a un fenómeno natural concreto en un área determinada. Es por tanto el producto de la Peligrosidad por la Vulnerabilidad por la exposición E, o conjunto de elementos expuestos al riesgo en el área determinada.

$$R_T = E \times R_S = E \times P \times V$$

Esta, es la terminología que la comunidad especializada española ha seguido desde la publicación de los trabajos de Corominas (1988), Ayala-Carcedo (1993), Irigaray et al. (1996), Ferrer (1997), González de Vallejo (1999) en los que se adoptan estos conceptos para el desarrollo de metodologías para el análisis de riesgo y la confección de cartografía de peligrosidad.

A continuación se explican más en detalle cada uno de estos elementos:

2.2.1 Peligrosidad (Hazard level)

Es la unión de la Severidad y la Probabilidad de un Peligro, que están mutuamente relacionadas ya que generalmente la severidad es tanto mayor cuanto menor es su probabilidad.

Peligro o Amenaza se define como una condición o evento que pone a algo o a alguien en una posición de pérdida o lesión potencial o real. Burton et al. (1978) definen los **peligros naturales** como "aquéllos elementos del medio ambiente físico, o del entorno físico, perjudiciales al hombre y causados por fuerzas ajenas a él". El término peligro natural se utiliza para englobar todos los fenómenos atmosféricos, hidrológicos, geológicos (especialmente sísmicos y

volcánicos) u originados por el fuego que, por razón del lugar en que ocurren, su intensidad y frecuencia, pueden afectar de manera adversa a los seres humanos, a sus estructuras o actividades. En algunos países hispanos se utiliza el término amenaza³ natural en sustitución del de peligro natural. El calificativo natural es utilizado para excluir de la definición peligros originados por los seres humanos tales como guerras, polución y contaminación química, o peligros no necesariamente relacionados con el entorno físico.

Para cuantificar la “grandeza” de los peligros se han definido dos parámetros magnitud e intensidad. **Magnitud** se define como “cualidad de un cuerpo o fenómeno que, referida a una unidad de la misma especie, puede ser medida” Por tanto es el resultado de una medición; las magnitudes matemáticas tienen definiciones abstractas, mientras que las magnitudes físicas se miden con instrumentos apropiados. **Intensidad** es “la magnitud de una fuerza, cualidad, efecto, etc., por unidad de espacio o de tiempo, o comparada con otra que sirve de unidad.”

Un ejemplo: En sismología, se utilizan ambos parámetros para la caracterización relativa de los terremotos. Las escalas de magnitud e intensidad históricamente más utilizadas han sido las de Richter y Mercalli respectivamente. La escala de Richter mide la magnitud o energía liberada por un temblor en su centro, o foco; esta crece de forma exponencial de un número al siguiente. La escala de Mercalli es más subjetiva, puesto que la intensidad aparente de un terremoto depende de la distancia entre el centro y el observador. Varía desde I hasta XII, y describe y evalúa los terremotos en función de las reacciones humanas y en observaciones. La figura 1 muestra ambas escalas referidas.

³ El término Amenaza se utiliza en la literatura hispanoamericana como sinónimo de Peligrosidad ya que ha sido traducido del término inglés “hazard” y tiene la connotación de probabilidad de ocurrencia de este último.

Escala de Mercalli	Escala de Richter
I. Casi nadie lo ha sentido.	2,5 En general no sentido, pero registrado en los sismógrafos.
II. Muy pocas personas lo han sentido.	
III. Temblor notado por mucha gente que, sin embargo, no suele darse cuenta de que es un terremoto.	3,5 Sentido por mucha gente.
IV. Se ha sentido en el interior de los edificios por mucha gente. Parece un camión que ha golpeado el edificio.	
V. Sentido por casi todos; mucha gente se despierta. Pueden verse árboles y postes oscilando.	
VI. Sentido por todos; mucha gente corre fuera de los edificios. Los muebles se mueven, pueden producirse pequeños daños.	4,5 Pueden producirse algunos daños locales pequeños.
VII. Todo el mundo corre fuera de los edificios. Las estructuras mal construidas quedan muy dañadas; pequeños daños en el resto.	
VIII. Las construcciones especialmente diseñadas dañadas ligeramente, las otras se derrumban.	6,0 Terremoto destructivo.
IX. Todos los edificios muy dañados, desplazamientos de muchos cimientos. Grietas apreciables en el suelo.	
X. Muchas construcciones destruidas. Suelo muy agrietado.	7,0 Terremoto importante.
XI. Derrumbe de casi todas las construcciones. Puentes destruidos. Grietas muy amplias en el suelo.	8,0 Grandes terremotos.
XII. Destrucción total. Se ven ondulaciones sobre la superficie del suelo, los objetos se mueven y voltean.	o más

La peligrosidad, como se infiere de su definición, implica la predicción espacial y temporal de los peligros expresada en términos probabilísticos.

2.2.2 Vulnerabilidad (Vulnerability)

El término vulnerabilidad tiene su raíz en la palabra latina “*vulnerare*” y significa que puede ser herido o recibir lesión, física o moralmente. Este es un concepto hipotético y solo se asume como realidad tangible cuando el impacto lo transforma en un daño.

Las personas y las cosas son vulnerables a los peligros naturales en tanto en cuanto son susceptibles a sufrir daños o pérdidas. La vulnerabilidad se relaciona con las consecuencias o los resultados del impacto de una fuerza natural y no con el proceso natural en sí mismo (Lewis 1999). Por ello, en la mayoría de los casos, la vulnerabilidad determina las pérdidas mucho más que la propia peligrosidad. Por ejemplo, en 1964, tras el gran terremoto de Alaska, 29 millones de m³ de rocas se precipitaron a 180 km/h en el valle Sherman, pero como el área no estaba habitada el resultado fue meramente una curiosidad geológica, no un desastre. En cambio, el 21 de Octubre de 1966 en la población minera de Aberfan (Gales), 42.000 m³ de derrubios se deslizaron tras la rotura de una escombrera minera, sepultando parte de la población y

matando a 144 personas. El movimiento de Gales fue 700 veces más pequeño y 30 veces más lento que el de Alaska, pero fue mucho más destructivo. La diferencia en la vulnerabilidad determina el potencial relativo al desastre (Alexander, 1993: 9-10).

Según la EIRD, programa de Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas, la vulnerabilidad a los desastres es una condición producto de las acciones humanas. Indica el grado en que una sociedad está expuesta o protegida al impacto de las amenazas naturales. Esto depende del estado de los asentamientos humanos y su infraestructura, la manera en que la administración pública y las políticas manejan la gestión del riesgo, y el nivel de información y educación de que dispone la sociedad sobre los riesgos existentes y como debe enfrentarlos.

Para intentar evaluar la vulnerabilidad teniendo en cuenta la complejidad de relaciones entre los diferentes componentes del riesgo la comunidad científica ha desarrollado una serie de enfoques metodológicos, cada vez más complejos, que se explican a continuación.

Una definición de trabajo preliminar de vulnerabilidad sería "potencial de pérdida u otro impacto adverso". Según esto, la vulnerabilidad no puede evaluarse en ausencia de peligrosidad inducida por fenómenos extremos peligrosos (Fig. 2). Es simple, el riesgo se considera como el producto de la peligrosidad **P**, actuando sobre la vulnerabilidad **V** (UNDRO, 1982). Para expresar el riesgo total **R_t** deben sumarse estas cantidades para todos los elementos vulnerables expuestos, **E**, que existen en una situación particular.

Los factores que complican esta relación son la exposición y la "tasa de dosis" "dose rate" o "tasa de factor desencadenante" "realase rate" (Fig. 2). Por ejemplo, una persona que pase a lo largo de un tramo de camino amenazado por desprendimientos para ir y venir del trabajo durante 10 minutos al día, se expone al peligro durante un $10/(60 \times 24 \times 7) = 0,0001$ de la semana. Este es el nivel de exposición personal en términos físicos (Tobin and Montz, 1997: 308-312; Hewitt, 1997: 144-145), pero este nivel de exposición asume un nivel de riesgo constante durante los periodos de exposición. Si por ejemplo, los desprendimientos son un peligro significativo solo cuando ha

llovido mucho recientemente, entonces los niveles de vulnerabilidad, riesgo y exposición se deben ponderar por la tasa de factor desencadenante "release rate".

Las tasa de factor desencadenante o de dosis puede considerarse además como una función de probabilidad de la peligrosidad. De ahí el riesgo total, teniendo en cuenta la exposición y la tasa de factor desencadenante, sería:

$$R_t = fcn \{t_e, V(E), P(H)\}$$

Donde t_e es la función temporal que describe la exposición, $V(E)$ es la vulnerabilidad media de los elementos en riesgo, y $P(H)$ es la probabilidad de que ocurran fenómenos peligrosos de una forma específica. Por ejemplo, t_e puede describir un riesgo que aumenta progresivamente durante el tiempo. $V(E)$ puede representar un cierto valor potencial de pérdida total con respecto a las propiedades localizadas en el área y $P(H)$ puede expresar la probabilidad de que un fenómeno ocurra en los lugares susceptibles durante un periodo de tiempo determinado.



Este análisis asume que la vulnerabilidad se define esencialmente como una cantidad fija. Esto no es necesariamente así. Para empezar, está la cuestión de qué nivel de pérdidas se asume como el valor máximo teórico. Lo que conlleva otra definición de exposición, no como la amenaza por período del tiempo definido, sino como riesgo hasta el punto de niveles de pérdidas definidos. Muchos análisis de vulnerabilidad en situaciones de peligrosidad asumen que la pérdida total (muerte de las personas en riesgo, destrucción de propiedades) es el grado máximo teórico de pérdidas potenciales. En la práctica, hay muchos casos en los que es poco probable que las pérdidas sean totales, especialmente en el caso de procesos lentos que producen daños progresivos a los edificios y que pueden corregirse mientras ocurren. Una solución a esto es clasificar la vulnerabilidad de acuerdo con los niveles de pérdidas potenciales.

Aparte de la cuestión de qué nivel de pérdidas es esperable, la vulnerabilidad tiende a ser un concepto dinámico en relación con la dualidad perpetua entre esfuerzos para reducir o mitigar los riesgos y las actividades antrópicas que crean o incrementan los niveles del riesgo. Visto desde la perspectiva de la gestión del riesgo, la vulnerabilidad a los peligros en sistemas socioeconómicos o medioambientales es función de los costes (u otras desventajas) y beneficios de inhabilitar áreas afectadas por una peligrosidad significativa (Alexander, 1991) mediante decisiones tomadas en base a la percepción del riesgo:

$$\text{Vulnerabilidad total a los peligros} \propto \text{Procesos peligrosos} - \text{Medidas de mitigación} \pm \text{Factores de percepción del riesgo}$$

La percepción afecta a la vulnerabilidad, ya que si un riesgo se percibe como alto o un peligro particularmente peligroso (*salient*), entonces existe un incentivo o un mecanismo social para reducirlo. Además, si la percepción de la vulnerabilidad al peligro es aguda, el riesgo puede reducirse mucho más que si la percepción es baja, independientemente de los niveles "objetivos" de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo.

Hasta ahora esta discusión ha enfatizado los aspectos negativos del riesgo: factores que llevan a incrementar en vulnerabilidad, o por lo menos a su

persistencia. Sin embargo, la manera más positiva de considerarla es como sigue:

Vulnerabilidad = 1 / Resistencia

Es decir, el inverso de la vulnerabilidad es el conjunto de mecanismos para evitar los impactos o absorberlos haciéndoles frente (Blaikie et al. 1994). La mitigación de peligros es capaz de proporcionar importantes valores en la relación coste / beneficio.

2.2.3 Exposición (Exposure)

La **exposición (E)** es el conjunto de elementos bajo riesgo en un área determinada. En una zona concreta cambia de acuerdo con la tipología del riesgo; por ejemplo para un terremoto la exposición está representada por las personas que están dentro de los edificios; en una inundación serán las personas que habitan en el primer o segundo piso.

En función de los tipos de elementos expuestos, pueden distinguirse tres tipos de exposición: Social, Económica o Estructural y Medioambiental.

La exposición social (población) varía según la hora del día: en las viviendas es mayor por la noche. En la exposición económica o estructural puede distinguirse entre los edificios y el contenido. Por último, la exposición ambiental no es fácil de analizar, puesto que los desastres naturales (riesgo volcánico, terremotos, inundaciones, deslizamientos etc.) son parte de los procesos ambientales naturales. Sólo la contaminación desencadenada por algún desastre natural que afecte a zonas industriales resultaría un peligro ambiental inducido diferente de los procesos naturales (IGME, 1999).

Vulnerabilidad versus exposición.

Llegados a este punto se intentará aclarar una confusión conceptual y terminológica mantenida a partir de las definiciones de vulnerabilidad y exposición de Varnes y la definición de vulnerabilidad presentada en el epígrafe anterior y adoptada actualmente por la comunidad internacional, gracias sobre todo a las aportaciones metodológicas de geógrafos y sociólogos.

Según define Varnes, la exposición se refiere a la cuantificación y valoración de los elementos expuestos a un peligro en una determinada área. Solo es necesario conocerla para el cálculo del riesgo total, es decir las pérdidas económicas o sociales producidas por el evento. La exposición, como vimos, depende de la tipología y magnitud del peligro.

Supongamos por ejemplo que en un área de 50 Km² viven 30 personas en 5 casas unifamiliares de ladrillo, hay dos carreteras, 20 kilómetros de tuberías de agua potable, 10 kilómetros de tuberías de saneamiento, 10 km de líneas eléctricas, 10 km de líneas de teléfono, un centro de asistencia sanitaria, una iglesia, un supermercado, una fábrica y un parque. Todo ello tiene un valor de 500 millones de euros (exposición). En este lugar sucedió un terremoto de intensidad 7 y se produjeron daños valorados en 100 millones de euros (incluidos los 5 muertos valorados en 1 millón cada uno). En este caso el área afectada es el área total y según Varnes la vulnerabilidad total de la zona a este terremoto de intensidad 7 sería $100/500 = 0,2$.

Esta simple cuenta sería una perfecta solución si realmente existieran formas de obtener de forma precisa en cada momento el valor de los elementos expuestos y de los daños producidos. La realidad es otra, ¿Cuánto vale el acueducto de Segovia, o una casa unifamiliar en el centro de la Gran Vía de Madrid o la Iglesia de nuestro ejemplo? la valoración de cada elemento es subjetiva en cada sociedad y varía con el tiempo. No obstante se pueden obtener estimaciones válidas del valor de cada elemento y de los daños en base a estudios estadísticos de mercado, valoraciones estandarizadas y actualizadas de los bienes nuevos o los gastos de reconstrucción o reparación. En principio, problema resuelto.

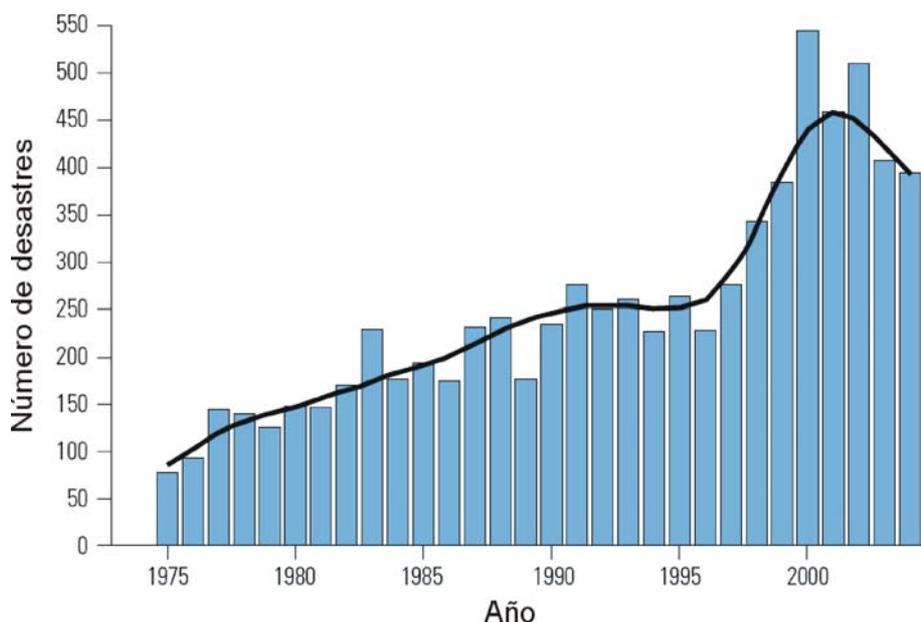
Pero imaginemos que en el lugar de nuestro ejemplo uno de los cinco muertos se debió al corte de carretera que impidió su traslado al centro de salud, y que los otros cuatro eran heridos que pudieron llegar al centro, pero éste se encontraba en llamas por la propagación de un pequeño incendio que se originó en una de sus salas tras el terremoto. Además, un corte prolongado en el suministro eléctrico ha dejado inutilizada la maquinaria de la fábrica, aunque esta no sufrió ningún daño estructural por haber sido construida con diseño antisísmico.

La fábrica no era un elemento expuesto ya que su estructura y contenido no sufrieron daños por el terremoto, pero el corte de luz inutilizó su maquinaria. Las pérdidas en la fábrica son en teoría indirectas, pero el elemento “no expuesto” sufrió daño. Los muertos son un efecto directo del terremoto pero en caso de no cortarse la carretera o de existir en el área un servicio de bomberos el daño podría haberse evitado.

Estos simples ejemplos demuestran que es necesario evaluar por separado la vulnerabilidad de cada elemento o grupo de elementos teniendo en cuenta las interrelaciones funcionales de cada uno y que para determinar la exposición, además de caracterizar el peligro, es necesario conocer las vulnerabilidades de los elementos interrelacionados entre sí, tanto los existentes como las carencias de elementos que puedan mitigar los daños.

2.3 Importancia del estudio de vulnerabilidad

Aunque el mundo siempre ha estado expuesto a los desastres naturales, sus efectos se están volviendo cada vez más severos (Figura 3). Por ejemplo, tan solo en los dos primeros meses de 2001, se sucedieron inundaciones recurrentes en Mozambique, un terremoto en India y dos en El Salvador. Esta tendencia mundial está directamente ligada a otros fenómenos como la creciente pobreza, el mayor crecimiento demográfico, el deterioro ambiental y el cambio climático.



Puesto que la vulnerabilidad a los desastres es el resultado de las acciones humanas, es posible modificarlas para reducir la vulnerabilidad y, con ella, las pérdidas de vida humanas y materiales. (EIRD, 2001)

Si analizamos el proceso de gestión para la reducción de daño producido por los peligros naturales vemos que puede ser dividido en medidas previas al desastre, acciones durante e inmediatamente después del desastre, y medidas post-desastre. En orden cronológico, son:

1. Medidas de mitigación anteriores al desastre o preventivas:

- ✓ Evaluación de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo
- ✓ Reducción de vulnerabilidad:
 - a) Preparativos para desastres naturales
 - Predicción
 - Preparativos para emergencia (incluyendo seguimiento, alertas, evacuación)
 - Educación y adiestramiento de la población
 - Habilitación de mecanismos financieros de recuperación
 - b) Normativa de construcción, excavación y relleno
 - c) Construcción de medidas ingenieriles mitigadoras de la amenaza
- ✓ Reducción de la exposición mediante la planificación territorial

2. Medidas durante e inmediatamente después de los desastres naturales:

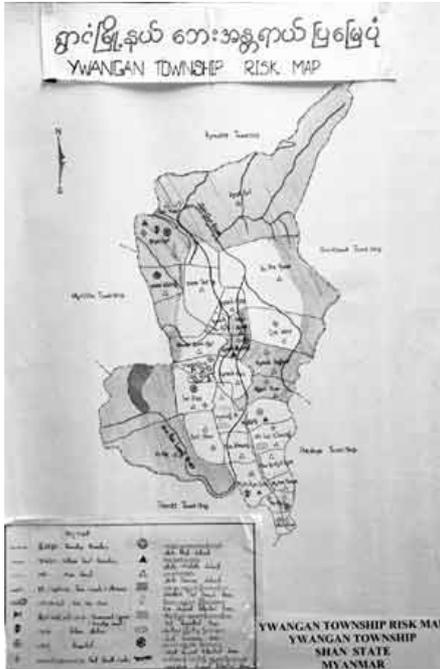
- ✓ Rescate y salvamento
- ✓ Socorro

3. Medidas post-desastre

- ✓ Rehabilitación

- ✓ Reconstrucción
- ✓ Ayudas públicas y cobertura aseguradora

Es evidente que las medidas previas a la ocurrencia de desastres son las más



eficaces y económicas y sobretodo las menos dolorosas para la sociedad. De ellas la reducción de la vulnerabilidad es la que hará que el daño sea menor.

Como la vulnerabilidad integra tanto las características del peligro como las de la sociedad e infraestructuras a las que afecta, es el parámetro más difícil de cuantificar, pero también el que más depende de las acciones y actitudes humanas y está en nuestras manos el poder mejorar la situación actual.

Conscientes de la importancia del estudio y reducción de la vulnerabilidad, el lema de la Campaña Mundial de las Naciones Unidas para la Reducción de los Desastres en el año 2001 ha sido "Menos Vulnerabilidad: Menos Desastres". Su objetivo proporcionar ejemplos prácticos de lo que se puede hacer para ser menos vulnerables frente a las amenazas naturales. En ella se instaba a la participación de las comunidades en riesgo potencial a la elaboración de los que llamaron "Mapas de Riesgo para comunidades locales" que en realidad son mapas inventario elementos expuestos con valoraciones vulnerabilidad relativa frente a los posibles peligros que identificaron en el área que habitaban. Por otro lado se llamaba a la participación en seminarios y sesiones de información sobre desastres y vulnerabilidad, a la movilización de los medios de comunicación para implicar todos los estamentos de la sociedad en la problemática de cada lugar.

En conclusión, la clave para desarrollar medidas efectivas en la reducción de peligros naturales consiste en que si las actividades humanas pueden causar o agravar los efectos destructivos de los fenómenos naturales, también pueden

reducirlos o eliminarlos y la reducción de la vulnerabilidad es uno de los principales medios para lograrlo.

Evaluaciones de Vulnerabilidad

Los estudios de vulnerabilidad estiman el grado de pérdida o daño que pueda causar la ocurrencia de un evento natural de determinada severidad. Los elementos analizados incluyen poblaciones, instalaciones y recursos físicos tales como infraestructuras vitales, centros de producción, lugares de reunión pública y patrimonio cultural, y actividades económicas y funcionamiento normal de la población.

La vulnerabilidad puede estimarse en áreas geográficas seleccionadas, como por ejemplo, las que de mayor potencial de desarrollo o las ya desarrolladas que estén ubicadas en zonas peligrosas. Las técnicas empleadas incluyen el trazado de mapas de infraestructuras vitales y análisis sectoriales de vulnerabilidad para sectores tales como energía, transporte, agricultura, turismo y vivienda.

Las metodologías existentes de la evaluación de la vulnerabilidad han sido adoptadas a partir de la investigación del riesgo tecnológico. Estas metodologías determinan el riesgo asociado con los procesos peligrosos de una magnitud dada como una función de la peligrosidad, y los elementos en riesgo, atribuyendo daños potenciales y vulnerabilidades para cada uno de los elementos expuestos.

En la mayoría de los proyectos realizados en España, al evaluar una inversión, generalmente no se considera la vulnerabilidad a amenazas naturales, sin embargo como parte del proceso normal de evaluación se considera la vulnerabilidad a otro tipo de riesgos tales como la fluctuación de precios del mercado y los costos de la materia prima.

La vulnerabilidad en muchas de las metodologías consultadas, se restringe a la localización de infraestructuras, tipo de construcción, cercanía, etc. Esto se debe a la aplicación de los estudios de vulnerabilidad sísmica, que se basan en el estudio del comportamiento de las estructuras frente a los esfuerzos dinámicos producidos tras el sismo y que han sido comprobadas

empíricamente en multitud de ocasiones. Así en base a los daños estructurales se realizan correlaciones de daños sociales o indirectos basados en experiencias pasadas. Sin embargo, autores como Blaikie et al. (1996) y Wilches-Chaux (1993) han ido caracterizando este complejo concepto. Aunque existe un consenso relativo en definir la vulnerabilidad como "el nivel de exposición de un grupo o persona desde el punto de vista de su capacidad para anticipar, sobrevivir, resistir o recuperarse del impacto de una amenaza" (Blaikie et al. 1996), la metodología que permita estimar de forma adecuada esta variable, ha sido frecuentemente reducida a las características físicas del lugar estudiado.

Para evitar este reduccionismo metodológico, Sánchez y Mendoza (2001) presentan una propuesta que sigue las variables anotadas por Wilches-Chaux (1993) en su artículo "Vulnerabilidad Global" y por Thomas y Suavita (2000) (quienes se basan parcialmente en este autor). El principal aporte de estos últimos es que es el primer intento, para lograr una integración operativa de los diferentes aspectos que constituyen la vulnerabilidad y además permiten una flexibilidad en cuanto a la importancia de cada variable dependiendo de las condiciones particulares de la zona (de cada lugar). Estos autores, agrupan en cuatro categorías las variables que a su parecer permiten evaluar integralmente la vulnerabilidad, las cuales son: Nivel de exposición por localización poblacional (NELP), nivel de exposición por empatía con la amenaza (NEEA), nivel de exposición de infraestructura e instalaciones vitales y críticas (NEIVC) y nivel de exposición por organización institucional frente a la amenaza (NEOI). Sin embargo, dejan de lado un factor muy importante: la vulnerabilidad económica, que sin duda, condiciona en buena medida la capacidad de acción del grupo social y familiar. Asimismo, según la terminología de Varnes la Vulnerabilidad por NELP esta se refiere "a los grados de exposición de la población al evento físico" que de acuerdo con lo expuesto son simplemente los grados relativos de exposición social frente a la amenaza.

Las definiciones de cada una de las categorías serán expuestas posteriormente en el apartado de vulnerabilidad por movimientos de ladera.

3 Riesgo y peligrosidad por movimientos de ladera.

Una vez definido lo que se entiende por riesgo y los componentes utilizados para su definición y cuantificación, veamos cual ha sido la aplicación de este análisis en el campo de los movimientos de ladera.

3.1 Los movimientos de ladera.

Dentro de los peligros naturales ligados a la Geodinámica externa o dinámica terrestre superficial, los movimientos de ladera constituyen el peligro más importante a nivel mundial tras las inundaciones.

Son procesos dinámicos complejos de carácter gravitatorio que afectan a los materiales más superficiales de la corteza terrestre. Según Crozier (1999), un movimiento de ladera es una masa de suelo, derrubio o/y roca que se mueve pendiente abajo impulsado por fuerzas gravitacionales. En ellos confluyen un gran número de factores condicionantes y desencadenantes, tipologías y mecanismos de rotura; todo ello, dificulta notablemente la predicción y el planteamiento de medidas preventivas y correctoras.

Su origen general son procesos de reajuste en las condiciones de estabilidad de las laderas, que se manifiestan en movimientos gravitacionales de masas, constituidas por distintos tipos de materiales (rocas, suelos, rellenos artificiales y combinaciones de todos ellos), generalmente a través de superficies de rotura.

Son procesos muy diferentes entre sí debido a la diversidad de factores condicionantes y desencadenantes que los gobiernan. Entre los primeros se encuentran la litología y la estructura y las propiedades geomecánicas de los materiales, la geomorfología, pendientes y estructura de las laderas, las condiciones hidrogeológicas y climáticas. Entre los segundos los agentes erosivos (ríos, oleaje, hielo o nieve), las cargas dinámicas (Terremotos), las precipitaciones intensas o prolongadas, erupciones volcánicas, la actividad biológica y la actividad humana (excavaciones, voladuras, sobrecargas, actividad minera,..)

En general son clasificados según su mecanismo de rotura en Desprendimientos, Vuelcos, Deslizamientos, Expansiones laterales, Flujos y

Movimientos Complejos. Cada uno de estos se subdivide en función del material involucrado, las características cinemáticas, su actividad, etc. Las clasificaciones más recientes de deben a Hutchinson, 1992; Cruden y Varnes, 1996; Corominas y García Yagüe, 1997.

Para evitar confusiones terminológicas en este trabajo se siguen las clasificaciones de Cruden y Varnes (1996) y Dikau et al. (1996) internacionalmente aceptadas, que sistematizan los movimientos en términos de material (tierra, derrubio o roca) y la forma de movimiento caídas (*falls*), vuelcos (*topples*), deslizamientos (*slides*), flujos (*flows*), corrimientos (*spreads*), incluyendo movimientos complejos.

Varnes (1984) emplea el término "*landslides*" (deslizamientos) para referirse a todas las tipologías de movimientos. No obstante, la literatura española especializada utiliza términos como: movimientos del terreno, movimientos de ladera o inestabilidades de laderas, para diferenciar el conjunto de los movimientos de un tipo particular y específico que es el deslizamiento. En este trabajo se utiliza el término movimientos de ladera.

3.2 Aproximación al riesgo por movimientos de ladera

Los fenómenos ligados a la dinámica de laderas suelen asociarse con eventos puramente naturales, y aunque se presentan en situaciones donde no hay intervención humana, las transformaciones del medio natural son cada vez más responsables de la ocurrencia de muchos de estos eventos alterando las condiciones en áreas que naturalmente podían presentar este tipo de fenómenos, pero que por el proceso de ocupación y construcción se ha visto acelerada su frecuencia y aumentada su magnitud. Como manifiesta Lavell (1996) "cada vez menos, las amenazas son consideradas elementos de la naturaleza o del mundo físico", es decir, que cada vez más se construye socialmente la amenaza. Esta aseveración la confirma Smith (1996) cuando habla de amenazas voluntarias e involuntarias de una parte y naturales y construidas por otra. Este autor presenta una clasificación de peligros donde los movimientos de ladera se sitúan cerca del centro del esquema, siendo el peligro de origen geológico más condicionado por el hombre (Figura 4).

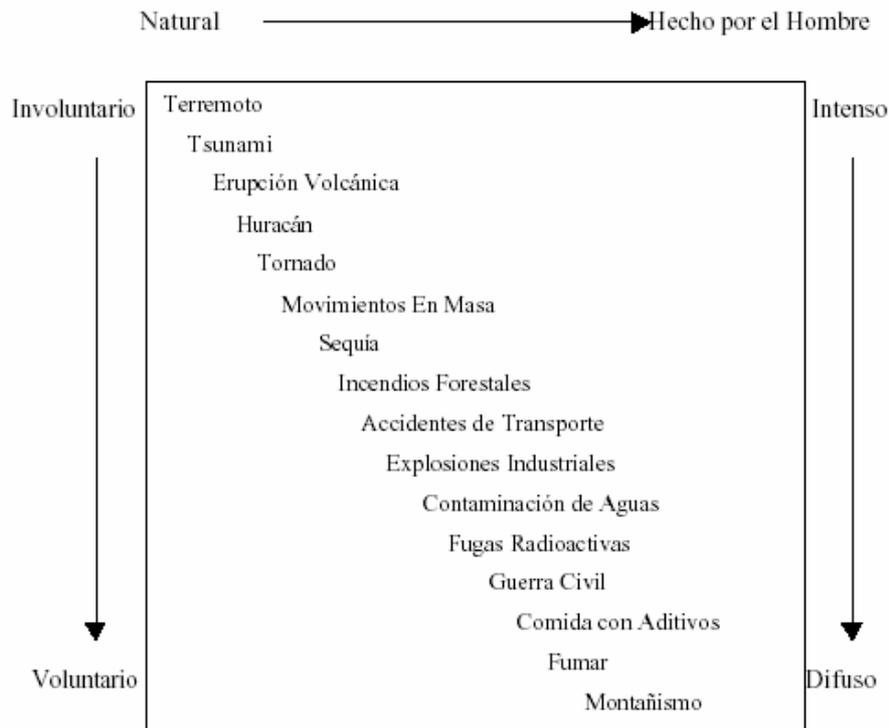


Figura 4 Clasificación de peligros según su origen, voluntariedad e intensidad. Fuente: Smith (1996).

Para ejemplificar este razonamiento analizaremos una tragedia ocurrida en El Salvador: a las once y 34 minutos de la mañana del sábado 13 de enero del 2001 la tierra retumbó en el país más pequeño de Centroamérica y cayeron las paredes de casi 150 mil casas. El terremoto fue de 7.6 grados en la escala Richter. 45 segundos bastaron para cambiar la vida de más de un millón de personas. La tierra siguió temblando y exactamente un mes después, el martes 13 de febrero, otro terremoto sembró más dolor y destrucción en El Salvador. Esta vez la magnitud fue de 6.6 grados en la escala Richter. El término de un mes 1,259 personas habían muerto, casi nueve mil quedaron heridas y más de 1.6 millones damnificadas, muchos a la intemperie, sin nada.

El impacto de dos terremotos Cifras consolidadas al 28 de febrero del 2001			
ASPECTO	TERREMOTO 13 DE ENERO	TERREMOTO 13 DE FEBRERO	TOTAL
Fallecidos	944	315	1,259
Heridos	5,565	3,399	8,964
Damnificados	1,364,160	275,013	1,639,173
Derrumbes	445	71	516
Viviendas dañadas	169,692	16,584	186,276
Viviendas destruidas	149,563	44,584	194,147

Figura 5. Impacto de los terremotos de El Salvador en 2001. Los daños económicos sumaron 1,603 millones de dólares, según la CEPAL⁴, que también estimó el costo de la reconstrucción en orden a los 1,940 millones de dólares.

El primer terremoto evidenció la vulnerabilidad de los ecosistemas naturales de cordilleras y laderas que contienen materiales frágiles y sueltos de origen volcánico, con poca resistencia a los movimientos sísmicos. Sea por licuefacción, por el deslizamiento de capas arenosas subyacentes, algunas de ellas saturadas, o por el efecto combinado del aumento de cargas dinámicas



y las elevadas pendientes, los movimientos sísmicos desencadenaron cientos de deslizamientos de tierra y rocas que interrumpieron muchas vías de comunicación, incluyendo la carretera Panamericana, y sepultaron casas y

colonias ubicadas en áreas de riesgo. El dato más estremecedor es que

⁴ Comisión Económica Para América Latina y el Caribe. ONU.

solamente en la colonia de Las Colinas, situada en el municipio de Santa Tecla, al oeste de la capital, se produjo un deslizamiento de tierras que acabó con la vida de más de 600 personas, más de la mitad de las víctimas ocasionadas por el primer sismo y más de las ocasionadas por el segundo.

Aunque el origen sísmico, magnitud y comportamiento, de los dos terremotos principales fue distinto, sus efectos fueron básicamente los mismos: muchos y considerables deslizamientos de tierra, aludes de ceniza volcánica blanca, profundización de cárcavas y grietas, daños en lugares ubicados en zonas de alto riesgo y en edificaciones vulnerables por sus técnicas constructivas y materiales inadecuados. El Ministerio del Ambiente salvadoreño estimó que el 25% del territorio nacional se vio afectado por los derrumbes o la inestabilidad de las laderas (Figura 5)

Estos datos demuestran que la intervención humana en el medio fue el principal condicionante de la tragedia de Las Colinas. La presión demográfica existente en el área metropolitana de San Salvador había hecho necesario el crecimiento incontrolado de las poblaciones limítrofes, sobre todo de las situadas en el corredor de la carretera que une la capital con Santa Ana, la segunda ciudad más importante del país. Santa Tecla creció en un altiplano encajonado entre las laderas del volcán de San Salvador al NE y la Cordillera del Bálsamo al Sur. Es precisamente en la cordillera del bálsamo donde se produjeron los mayores deslizamientos y flujos de tierra durante el terremoto del 13 de Enero y donde estaba situada la urbanización de Las Colinas. Aunque la extensión del área afectada por los movimientos de ladera en todo el país fuera tan grande, e incluso ocurrieran movimientos de mayor magnitud en otras zonas, solo la exposición al riesgo de deslizamiento por la falta de planificación territorial, produjo la mayoría de las muertes en el primer terremoto de El Salvador.

Sin embargo, se pueden reducir enormemente los daños causados por los movimientos de ladera si se utilizan **medidas de mitigación** apropiadas. Por ejemplo:

La cartografía de susceptibilidad y peligrosidad de movimientos de ladera se ha realizado internacionalmente desde los años 70 (ejemplos Brabb et al. 1972; Nilsen, et al. 1979; Kienholz, 1978). Los mapas han incorporado generalmente la frecuencia estimada de movimiento en un sentido cualitativo más que cuantitativo.

Estos mapas se han utilizado para gestionar el peligro y el riesgo de movimientos de ladera limitando el desarrollo urbano, la urbanización de algunas zonas de peligro más altas, y requiriendo la evaluación ingeniero-geotécnica de la estabilidad de las laderas antes de aprobar la urbanización en otras áreas. En algunos países, los mapas de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo de movimientos de ladera, han introducido en la regulación, así el PPR desde los años 80 en Francia y en Suiza más recientemente. En otros se han desarrollado reglamentaciones para limitar racionalmente en el uso del terreno: la ciudad de Los Angeles, California, creó un reglamento sobre pendientes máximas admitidas en función del tipo de terreno que ha traído como consecuencia una reducción del 90% de los daños relacionados con deslizamientos. La densidad alta de población e infraestructura aumenta el riesgo, haciendo que la mitigación del peligro sea aún más importante.

En la actualidad, muchas autoridades del gobierno local están requiriendo un acercamiento cuantitativo de la evaluación de riesgo para su gestión, especialmente del riesgo para las personas y para las adjudicaciones de edificios individuales. Han aceptado generalmente la evaluación cualitativa del riesgo para la propiedad. Estas valoraciones se realizan siguiendo el esquema basado en el proceso de que se muestra en la figura 6 (Fell et al. 2005). Este esquema general se ha logrado consensuar internacionalmente y en el se incluyen todos los componentes necesarios para el análisis y la evaluación del riesgo, pasos previos ineludibles para una gestión focalizada y eficaz.

3.2.1 Esquema de gestión del riesgo por movimientos de ladera

En la figura 6 se presenta un esquema general de gestión del riesgo por movimientos de ladera propuesto por Fell, Lacasse y Leroi en la Conferencia

Internacional sobre la Gestión de Riesgo de Movimientos de Ladera, celebrada en Vancouver, en junio de 2005.

Es recomendable que en todos los estudios y cartografías de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo de movimientos de ladera se utilice este marco general tanto si se considera un enfoque cuantitativo como cualitativo. En Spiker and Gori (2000), Cardinali et al., (2002); Bell & Glade, (2004); AGS (2000, 2002), Lee y Jones (2004) y en los documentos del estado del arte de la Conferencia Internacional sobre la Gestión de Riesgo de movimientos de ladera, Vancouver, junio de 2005 (Fell et al. 2005, Picarelli et al. 2005, Nadim et al. 2005, Hungr et al. 2005, Roberds 2005, Leroi et al. 2005, Cascini et al. 2005 y Wong 2005) se dan más detalles referentes al uso de la gestión del riesgo por movimientos de ladera.

Como veremos más adelante, la definición de la vulnerabilidad de cada uno de los elementos expuestos al peligro de movimientos de ladera será un dato imprescindible en el "análisis de consecuencias". El cálculo de la vulnerabilidad será necesario tanto para la definición de escenarios como para el análisis de la gravedad de las consecuencias adversas, que conducirán a la estimación del riesgo.

3.2.2 El comportamiento intrínseco de los movimientos de ladera

El efecto destructivo de los movimientos de ladera depende de su magnitud o intensidad y de su movilidad. (Corominas, 1990)

Los movimientos de ladera causan daño de dos maneras. La primera se debe a que el movimiento se inicia quitando el material de su posición preexistente de modo que produce una pérdida de tierra útil dando lugar al retranqueo de acantilados y/o a la formación de escarpes. El segundo daño resulta del movimiento de la masa de terreno movilizada y es función de la aplicación de cargas estáticas o dinámicas sobre los bienes a los que afecta (Leone et al., 1996). Estas cargas son:

1. Desplazamientos y deformaciones horizontales

2. Desplazamientos y deformaciones verticales
3. Presiones laterales
4. Presiones de impacto de la masa de terreno o bloques
5. Acumulación de cargas por sedimentación instantánea o por la descarga progresiva de derrubios tras la sucesión de varios eventos.

Las diferentes partes de un deslizamiento están sometidas a tensión, compresión, inclinación, contra inclinación, empuje, etc. en función de su situación y del estado de esfuerzos existente. Un determinado bien puede sufrir daños por la acción de diferentes tipos de cargas dependiendo de su ubicación relativa dentro del deslizamiento. Por ejemplo, en el caso de una tubería o conducción enterrada, la rotura completa y el subsiguiente derrame ocurre cuando se da alguno de los siguientes procesos:

1. Desplazamiento lateral. Rotura de la conducción como consecuencia de un movimiento diferencial de componente horizontal y/o vertical de la masa deslizada. El potencial de desplazamiento de la tubería dependerá de la profundidad del deslizamiento, el comportamiento mecánico de los materiales geológicos (Ej. Plástico o en bloques), la velocidad del movimiento, y el desplazamiento total acumulado que podría alcanzarse a lo largo del tiempo.
2. Arrastre. Rotura de la conducción como consecuencia de la eliminación de su sustento a lo largo de un tramo significativo como consecuencia del movimiento de material por debajo de la conducción. El potencial de arrastre es función del desplazamiento vertical de la masa deslizada o del retranqueo o erosión del escarpe a lo largo de la alineación de la conducción.
3. Carga. Rotura de la conducción como consecuencia de una imposición de cargas (por ejemplo el enterramiento producido por el material deslizado o el impacto de caída o rodadura de rocas). Esta es función de la profundidad y del alcance del movimiento, el tamaño y la altura de la caída del material sobre la conducción o la velocidad de los "proyectiles".

Estos mecanismos de rotura ilustran como la intensidad destructiva de un deslizamiento está relacionada con sus parámetros cinéticos, tales como la velocidad y aceleración, junto con las características del material involucrado y sus dimensiones (Leone et al, 1996).

3.3 Peligrosidad por movimientos de ladera

3.3.1 Magnitud e intensidad.

Según el RIC⁵ de British Columbia, Canadá (1997) la magnitud de un movimiento: es el volumen del material desplazado en el mismo. Se puede expresar de forma cualitativa con palabras como pequeña media o grande, o cuantitativamente como volúmenes o rangos de volúmenes. Es necesario enfatizar que algunos movimientos de tierra tales como los flujos de derrubios, suelen formarse por el concurso de varios arranques o deslizamientos menores y aislados, la magnitud de estos debe diferenciarse de la magnitud del evento total. A menudo, es difícil estimar el espesor actual o potencial de un movimiento de ladera, sobre todo con foto aérea; sin embargo el área afectada por los movimientos, estimando espesores, se ha utilizado como una estimación aproximada de la magnitud.

Por otro lado, intensidad: es la colección de parámetros físicos que describen la destrucción o el potencial destructivo de los movimientos de ladera. Son parámetros tales como la velocidad de movimiento ladera abajo, el espesor de los materiales deslizados, las fuerzas de impacto del material caído o las distorsiones internas en la masa desplazada.

La **velocidad máxima** es un factor clave en la capacidad destructiva de un movimiento. Cruden y Varnes en 1996 propusieron una escala de intensidad en movimientos de ladera que fue desarrollada a partir de clasificación formulada por Varnes en 1978 en función de su velocidad. Cruden y Varnes modifican algunos límites para ajustarlos a múltiplos de 100. La clasificación es la siguiente:

⁵ Resources Inventory Committee

Clase	Descripción	Velocidad (mm/s)	Velocidad típica
7	Extremadamente rápido	> 5.000	Más rápido de 5 m/s
6	Muy Rápido	5 a 5.000	De 3 m/min a 5 m/s
5	Rápido	0,5 a 5	De 1,8 m/h a 3 m/min
4	Moderado	0.005 a 0,5	De 13 m/mes a 1,8 m/h
3	Lento	0,00005 a 0,005	De 1,6 m/año a 13 m/mes
2	Muy lento	0,0000005 a 0,00005	De 0,16 m/año a 1,6 m/año
1	Extremadamente lento	< 0,0000005	Más lento de 0,16 m/año

Tabla 1. Escala de velocidad de deslizamientos, Cruden y Varnes (1996).

Podría compararse con la clasificación de intensidad de Mercalli previamente presentada, pero como los mismos autores reconocen en el caso de los movimientos de ladera no existe una relación tan directa entre un solo parámetro, como lo es la energía liberada en un terremoto o magnitud, con la generación de daños. Así, pequeñas avalanchas de derrubios pero rápidas causan destrucciones totales y muertos, mientras que grandes deslizamientos de velocidad moderada causan menos pérdidas porque pueden evitarse o bien las estructuras pueden evacuarse o ser reconstruidas. Este hecho demuestra que para medir del peligro de deslizamiento se deben tener en cuenta al menos dos parámetros: la velocidad y el área afectada. El producto de estos dos parámetros será aproximadamente proporcional al poder destructivo de los movimientos de ladera (Cruden y Varnes 1996). Cardinali et al (2002) consideran la intensidad de los movimientos de ladera (I) como una medida de su potencial destructivo y lo definen en función de su volumen (v) y la velocidad máxima (s):

$$I = f(v,s)$$

La tabla 2 presenta la intensidad estimada para un rango de deslizamientos en base a este criterio. Para un deslizamiento de un volumen definido, la mayor intensidad le corresponde a las caídas rápidas de bloques, una intensidad

intermedia corresponde a movimientos rápidos de flujos de derrubios y los deslizamientos lentos tendrán la intensidad menor.

Volumen estimado m ³	Movimiento muy rápido (caída de bloques)	Movimiento rápido (flujo de derrubios)	Movimiento lento (deslizamiento reactivado)
< 0,001	Baja		
< 0,5	Media		
> 0,5	Alta		
< 500	Alta	Baja	
500-10.000	Alta	Media	Baja
10.000-50.000	Muy alta	Alta	Media
> 500.000		Muy alta	Alta
>>500.000			Muy alta

Tabla 2. Matriz de intensidad para movimientos de ladera. Fuente: Cardinali et al (2002)

No obstante, existen otros parámetros como la distorsión interna producida por el movimiento en la masa deslizada que afecta principalmente a las estructuras construidas y cimentadas sobre las masas movilizadas, o las fuerzas de impacto producidas por la caída de bloques, que dependen básicamente de la tipología de movimiento de ladera. Así pues, el daño producido dependerá de esta tipología y su estudio requerirá una consideración por separado.

Pese a todo, la velocidad es el parámetro con más importancia a la hora de producir daños personales. Un límite importante aparece cerca de los 5 metros por segundo, aproximadamente la velocidad con que una persona puede escapar lejos del movimiento. En la tabla 3 se correlacionan poder destructivo

con las clases de velocidad en movimientos de ladera definidas por Cruden y Varnes (1996).

Clase	Trascendencia destructiva probable
7	Catástrofe muy violenta, los edificios expuestos son destruidos por impacto o alcance del material movilizado; muchos muertos, escapar es imposible.
6	Se producen algunos muertos, la velocidad es tan alta que no permite escapar a todas las personas; destrucción mayor.
5	La evacuación es posible, las estructuras, los equipamientos y las posesiones son destruidos.
4	Algunas estructuras temporales y poco vulnerables deben ser mantenidas frecuentemente si están localizadas a corta distancia del movimiento; daños extenso en las situadas sobre el movimiento.
3	Pueden emprenderse reformas constructivas durante el movimiento, las estructuras menos vulnerables pueden mantenerse con trabajos de mantenimiento frecuentes si el movimiento total no es muy grande durante una fase de aceleración particular.
2	Algunas estructuras permanentes afectadas por movimiento no sufren daños y si lo sufren pueden ser reparados
1	Imperceptible con instrumentos, sin daños en construcciones realizadas con precauciones

Tabla 3. Correlación entre poder destructivo y clases de velocidad de deslizamientos. Fuente: Cruden y Varnes, 1996.

También presentan algunos ejemplos de deslizamientos que relacionan velocidad de movimiento y daños producidos.

Clase	Nombre o localización	Referencia	Velocidad estimada	Daño
7	Elm, Suiza	Heim (1932)	70 m/s	115 muertos

Clase	Nombre o localización	Referencia	Velocidad estimada	Daño
7	Goldau, Suiza	Heim (1932)	70 m/s	457 muertos
7	Jupile	Bishop (1973)	31 m/s	11 muertos, casas destruidas
7	Frank, Canadá	McConnell and Brock (1904)	28 m/s	70 muertos
7	Vaiont, Italia	Mueller (1964)	25 m/s	1900 muertos por efectos indirectos
7	Ikuta, Japón	Engineering News Record (1971)	18 m/s	15 muertos, equipos destruidos
7	St. Jean Vianney, Canadá	Tavernas et al. (1971)	7 m/s	14 muertos estructuras destruidas
6	Aberfan, Gales	Bishop (1973)	4,5 m/s	144 muertos, algunos edificios dañados
5	Canal de Panamá	Cross (1924)	1 m/min	Equipos atrapados, las personas escaparon
4	Hadlova	Zaruba and Menci (1969)	6 m/día	150 casas destruidas, evacuación completa
3	Schuders	Huder (1976)	10 m/año	Mantenimiento de la carretera con dificultad
3	Wind Mountain, USA	Palmer (1977)	10 m/año	La carretera y el tren requieren frecuente mantenimiento, los edificios han de ajustarse periódicamente
2	Lungnez, Suiza	Huder (1976)	0,37 m/año	Seis pueblos sobre el deslizamiento sin alteración

Clase	Nombre o localización	Referencia	Velocidad estimada	Daño
2	Little Smoky	Thomson and Hayley (1975)	0,25 m/año	Puente protegido por junta de dilatación
2	Klosters	Haefeli (1965)	0,02 m/año	Mantenimiento en el túnel y puente protegido por junta de dilatación
2	Ft. Peck Spillway	Wilson (1970)	0,02 m/año	Movimiento aceptable, pendiente nivelada

Tabla 4. Clases de velocidad de deslizamientos y daños ocasionados en casos reales Fuente: Cruden y Varnes, 1996.

En el proyecto francés PER⁶ (DRM, 1990; en Informe TIGRA, IGME 1999) se desarrollaron dos escalas de intensidad para movimientos de ladera, una en base a las consecuencias económicas y otra en base al número de víctimas causadas por los movimientos.

Clase	Descripción	Comentarios
1	Pequeño	10% del valor de una casa unifamiliar (por ejemplo: impedir la caída de un bloque rocoso inestable).
2	Medio	Intervención técnica costeable por un pequeño número de propietarios: edificios o pequeños lotes (por ejemplo anclaje o construcción de barreras o redes de seguridad, drenaje de un talud inestable)
3	Alto	Intervención técnica importante y específica que interesa a una gran área con respecto a la extensión del lote construido (por

⁶ Plans des Zones Exposées aux Risques

		ejemplo. Estabilización de un gran deslizamiento; refuerzo de un talud rocoso inestable)
4	Muy alto	No es posible ninguna intervención técnica con un coste aceptable para la comunidad (por ejemplo deslizamientos o desprendimientos catastróficos).

Tabla 5. Escala de intensidad para movimientos de ladera en función de pérdidas económicas. Fuente: Informe TIGRA, IGME, 1999

Clase	Descripción	Comentarios
1	Ninguno	incidente improbable (con la exclusión de incidencias inducidas); movimientos lentos
2	Medio	incidentes aislados; caídas aisladas de rocas.
3	Alto	algunas víctimas; desprendimientos, flujos de tierra, deslizamientos
4	Muy alto	desastres (decenas de víctimas); deslizamientos o desprendimientos catastróficos, flujos de tierra, barro o derrubios rápidos

Tabla 6. Escala de intensidad para movimientos de ladera en función de pérdidas sociales. Fuente: Informe TIGRA, IGME 1999.

No obstante estas siguen siendo aproximaciones al problema basadas en los daños, lo cual no es una buena solución para la clasificación de la intensidad de los movimientos de ladera como ya hemos apuntado. Esto se debe a que los daños (riesgo total, R_T) ocasionados por la ocurrencia de un evento determinado en un área definida (que en el caso de los movimientos de ladera suele ser reducida) son el resultado de la interacción de tres variables la intensidad o magnitud del fenómeno (en este caso el movimiento de ladera), la vulnerabilidad y la exposición. Por lo tanto no es raro encontramos casos en los que un gran deslizamiento de ladera que no produzca víctimas o daños sea catalogado como clase 1, mientras que un flujo de lodo pequeño que

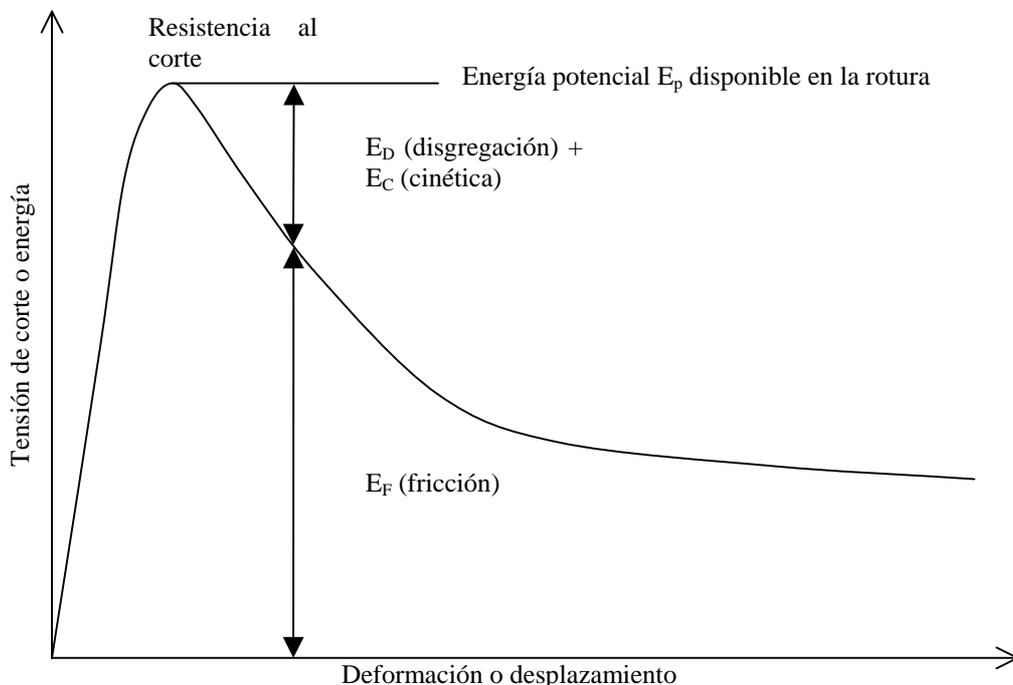
arrastró una casa en el Piemonte (Italia) en 1994 y mató a 14 personas pueda ser definido en la máxima categoría de intensidad.

Por todo ello es necesaria la formulación de una escala de intensidad basada en los parámetros de velocidad de movimiento, área afectada, fuerzas de impacto y distorsión de la masa deslizada, para cada tipo de movimiento reconocido.

3.3.2 Movilidad y alcance de los movimientos de ladera.

En su inicio los movimientos tienen una energía potencial (función de la pendiente y geometría de la ladera) que se disipa progresivamente en varios componentes (Leroueil et al. 1996). Energía de fricción por el movimiento del material sobre la superficie de deslizamiento. La cantidad de energía de fricción necesaria depende del comportamiento esfuerzo-desplazamiento del material. En materiales dúctiles o elasto-plásticos toda la energía potencial es disipada como energía de fricción, dando como resultado bajas tasas de movimiento y desplazamientos medios pequeños. Parte de la energía potencial se disipa en la desintegración y remoción del material (energía de desintegración) y en la aceleración de la velocidad de movimiento (energía cinética).

En materiales frágiles (Figura 7), donde hay una sustancial diferencia entre resistencia de pico y residual, la energía cinética puede ser muy grande, corriéndose el riesgo de que los movimientos tengan un gran alcance (alta relación alcance / altura de ladera), esto ocurre en avalanchas de rocas,



roturas en arcillas rápidas y deslizamientos submarinos. El alcance aumenta generalmente con el volumen de la masa rota, como la energía potencial por unidad de volumen desciende con la altura de la ladera y por lo tanto con su tamaño.

Figura 7 . Diagrama tensión-deformación hipotético para movimientos de ladera.

La reactivación de movimientos implica en general el deslizamiento de un bloque rígido sobre una base rígida. La tasa de desplazamiento depende de varios factores: la geometría local de la ladera, el esfuerzo total y la presión de poros inducida por el empuje ejercido por la masa de suelo, la relación entre la disipación de la presión de poros y las fluctuaciones en el nivel freático (Leruoel et al. 1996). Comúnmente las tasas de desplazamientos son muy variables, abarcando desde 10 m/mes hasta menos de 1 mm/mes. A veces los movimientos son progresivos, comenzando en algunas secciones y separándose ladera abajo por causa del empuje ejercido por el movimiento de la masa. Como resultado, los movimientos reactivados pueden comportarse como glaciares, donde zonas de tensión y compresión se manifiestan al mismo tiempo en diferentes partes del deslizamiento.

La determinación de la movilidad de un deslizamiento es difícil. Hsü (1975) observó una disminución del coeficiente de fricción equivalente (máxima altura de la pendiente dividida por el alcance o máxima distancia horizontal recorrida) con el volumen de roca involucrado que es más evidente en los grandes desprendimientos de rocas. Hutchinson (1988) obtuvo una nueva relación para roturas por desprendimiento en taludes de margas y por flujos de derrubios en margas y en materiales de escombrera de una mina de carbón, bastante diferente a la de Hsü. Observó un comportamiento diferente en los desprendimientos rocosos y en los dos flujos, deduciendo que tanto la litología específica como el mecanismo de rotura tienen una influencia muy importante en la reducción del volumen. Corominas y otros (1998) vieron un comportamiento diferente dependiendo del tipo de mecanismo de rotura para movimientos menos voluminosos. Este hecho puede explicarse

considerando que la roca cae disipando la mayor parte de su energía en el golpeo con el sustrato fracturándose en pequeños fragmentos de roca, mientras que los deslizamientos superficiales solo la disipan por fricción en la superficie de rotura. Los flujos disipan su energía por la fricción entre sus componentes clásticos (flujo grano-soportado), por lo que ocuparán un lugar intermedio. El uso de estas relaciones empíricas está limitado debido a la falta de datos más representativos.

No obstante la investigación continúa y dado que el alcance es determinante para la definición del área en peligro se han seguido desarrollando metodologías

En el caso de los desprendimientos, se utilizan modelos de análisis dinámico por ordenador que consideran el volumen y forma del bloque inicial y factores como la pendiente, la rugosidad de la ladera, etc. que permiten obtener alcances y trayectoria pero presentan problemas en la definición de parámetros como discuten Ayala-Carcedo (2001).

Para movimientos rápidos tipo flujo Zhang y otros (1985) han desarrollado correlaciones entre parámetros de factores desencadenantes como intensidad de lluvia y el máximo del pico de la descarga de las coladas en la provincia de Yunnan, China. Los flujos ocurren cuando las lluvias alcanzan un umbral de intensidad de 1,8 mm en 10 minutos, pero las mayores coladas (velocidad >100 m/s) ocurren cuando la intensidad excede los 5 mm en 10 minutos. Una determinación similar ha sido realizada por el autor de este texto en las laderas del volcán de San Miguel, donde se producen lahares de flujos de derrubios y flujos hiperconcentrados que afectan a comunidades pobres asentadas en sus proximidades. En este caso se obtuvieron umbrales de intensidad de precipitación para cada tipo avenida caracterizada: **avenidas de magnitud baja: 5 mm/ 10 min., avenidas de magnitud media: 10 mm/ 10 min., y avenidas de magnitud alta: 20 mm/min.**(García López-Davalillo 2001a).

Peligrosidad y susceptibilidad

Como se infiere de su definición la peligrosidad (*hazard*) implica la predicción espacial y temporal de los peligros expresada en términos probabilísticos. Esta evaluación es muy difícil y costosa en el caso de los movimientos de ladera.

Para ello es necesaria la evaluación de gran cantidad de sucesos ocurridos y de los factores, tanto condicionantes como desencadenantes que los caracterizaron. Es necesario, así mismo, conocer aspectos como el volumen, velocidad y alcance de la masa movida. Ante esta dificultad se ha optado por un paso intermedio, el análisis de la susceptibilidad.

Susceptibilidad se ha definido como la posibilidad de que una zona quede afectada por un determinado proceso, expresada en términos cualitativos y relativos. (González de Vallejo, 1999). En el caso de los movimientos de ladera ha sido tradicionalmente vinculada a los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos, que pueden ser intrínsecos a los propios materiales afectados o externos a ellos. Pero también se refiere a los factores desencadenantes o detonantes que son los procesos o fenómenos coyunturales que activan o aceleran el fenómeno considerado, como la precipitación, la sismicidad y el uso del terreno. Esto es fundamental para determinar el peligro, pues en una zona aparentemente estable, existen elementos que pueden cambiar las condiciones naturales en un momento determinado. Los detonantes son elementos dentro del sistema, sin embargo, por su característica de elementos coyunturales, muchas veces se confunden con elementos exteriores.

La susceptibilidad por tanto es una valoración del grado de estabilidad, tanto de la posibilidad de movilización como de su movilidad⁷. Ayala (2001) define dos tipos de susceptibilidad de un punto en una ladera, la susceptibilidad a la desestabilización o posibilidad de que un punto resulte movido por un movimiento subyacente y la susceptibilidad al alcance o posibilidad de que un punto sea alcanzado por una masa desestabilizada en su proceso de movimiento. Thurber y Golder (1993) han aplicado a flujos de derrubios potenciales en British Columbia, un concepto de intensidad próximo a la Susceptibilidad al alcance, que ha sido aplicado por Ayala-Carcedo y otros (2003) a desprendimientos en la Sierra de la Cabrera madrileña.

El análisis de susceptibilidad de una zona, representa el establecimiento de una relación entre los movimientos observables (fruto de la acción de los

⁷ La movilidad depende de la velocidad del movimiento y del alcance del mismo

factores condicionantes y desencadenantes a lo largo de un horizonte temporal) y un conjunto de "factores cartográficos", en principio fácilmente obtenibles, como la pendiente, litología, geomorfología, etc... que se extrapola a las zonas sin movimientos con objeto de evaluar su propensión a los mismos por vía estadística. Sobre estas bases Ayala-Carcedo (2001) define Susceptibilidad como: Propensión o tendencia de una zona a ser afectada por movimientos de ladera por desestabilización o alcance, determinada a través de un análisis comparativo de factores condicionantes y/o desencadenantes, cualitativo o cuantitativo, con las áreas movidas o alcanzadas, análisis que se materializa normalmente en forma de mapa de susceptibilidad y suele presuponer que el comportamiento futuro de la ladera seguirá las mismas pautas que hasta el presente.

La peligrosidad en cambio, implica el cálculo de la probabilidad de ocurrencia. La probabilidad de ocurrencia podría ser determinada estadísticamente mediante análisis rigurosos en el caso de encontrarnos con peligros naturales que ocurren frecuentemente en el mismo área, tal es el caso de las inundaciones. En el caso de los movimientos de ladera estos generalmente no ocurren en una determinada área con la frecuencia necesaria.

Un análisis de peligrosidad en un punto daría respuestas a estas dos preguntas: Para un deslizamiento lento ¿Cuál es la probabilidad de que el factor de seguridad sea menor de 1, es decir se produzca la desestabilización? Y para un alcance por desprendimientos o movimientos de alta o media movilidad, ¿Cuál es la probabilidad compuesta de que se produzca la inestabilidad ($FS < 1$) y el movimiento de la masa lo alcance? Por tanto para su realización debemos de hacer análisis rigurosos de otros factores que determinen el comportamiento geomecánico o geotécnico de las laderas, lo cual implicará grandes costes por la necesidad de gran cantidad de datos cuantitativos precisos sobre factores condicionantes como las características resistentes de los materiales su humedad, estado y su variación en el tiempo y sobre la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los factores desencadenantes que pueden dar lugar al suceso en esa zona.

Por otro lado, ante esta complejidad y coste la estimación de la probabilidad se realiza a menudo por medio de juicios valorativos basados en evidencias empíricas. Tales estimaciones pueden llegar a ser consensuadas por varios especialistas en cuyo caso se les conoce como “estimaciones pseudo-bayesianas”. Las verdaderas estimaciones Bayesianas (aplicaciones del teorema de Bayes) solo se pueden comprobar si los eventos tienen una ocurrencia relativamente alta, como es el caso de las avalanchas de nieve (McClung and Tweedie, 1994). Los resultados de las estimaciones pseudo-bayesianas a menudo se presentan como rangos. Un ejemplo son estas dos tablas (ver página siguiente). La primera propuesta por Gerath, Hungr y VanDine (1996) en la provincia de British Columbia, Canadá. Los rangos que se muestran en la tabla son puntos de referencia útiles, descienden de manera regular y escalonada y muestran además el grado de aceptación del peligro existente en determinadas circunstancias. La segunda fue propuesta por el autor en el estudio de amenazas de lahares en la ladera norte del volcán de San Miguel (El Salvador), Abril de 2001 (García López-Davalillo, 2001a).

Probabilidad relativa	Probabilidad anual de ocurrencia	Comentarios
Muy alta	> 1/20	1/20 indica que el peligro es inminente, y seguro dentro de la esperanza de vida de una persona o de una estructura. Los movimientos de ladera que ocurren con un intervalo de recurrencia de 1/20 o menor generalmente tienen signos de movimiento claros y relativamente frescos.
Alta	1/100 a 1/20	1/100 indica que el peligro puede pasar dentro de la esperanza de vida de una persona o de una estructura. Estos movimientos son fácilmente identificables por sus depósitos y vegetación pero no aparecen frescos.
Moderada	1/500 a 1/100	1/500 indica que el peligro no es probable dentro de la esperanza de vida de una persona o de una estructura, pero no imposible. Los signos de movimientos anteriores, tales como daños en la vegetación puede que no sean evidentes. En British Columbia utilizan 1/475 como valor de probabilidad de ocurrencia de peligros aceptable para

		autopistas, y para las bases de diseño antisísmico en la construcción de presas. En España este valor es de 1/500
Baja	1/2500 a 1/500	1/2500 indica que el peligro tiene una relevancia incierta.
Muy baja	< 1/2500	

Categoría	Descripción
5	Muy alta probabilidad de ocurrencia; indica que pueden ocurrir con frecuencia (T=2 años) lahares de menor magnitud que la del lahar de diseño calculado, con altas condiciones de escorrentía, y que el lahar de diseño puede asumirse que ocurra dentro de un corto plazo (T=5 años). Esto se aplica a quebradas que tengan registros históricos de más de un evento que haya movilizado más de 500 m ³ o a otras tengan características físicas comparables con estas.
4	Alta probabilidad de ocurrencia; indica que pueden ocurrir lahares de menor magnitud que la del de diseño con menos frecuencia que en la categoría 5 (T=10 años), pero también puede ocurrir el lahar de diseño. Se aplica a canales que tengan registros históricos de un único flujo importante. Se aplica también a cauces de los que no se conozcan datos históricos pero que posean parámetros físicos de similares características a los de la categoría 5.
3	Moderada probabilidad de ocurrencia; indica que el lahar de diseño puede ocurrir durante la vida útil de una estructura (Ejem. Un puente o una casa) a largo plazo (T = 100 años). Se aplica a todas aquellas quebradas o cauces tributarios que tengan características físicas determinantes que sobrepasen el umbral de generación de flujos laháricos, aunque no en el rango de la categoría 5. Para considerar estos cauces no han de existir referencias históricas de flujos, o haber experimentado eventos de origen incierto.
2	Baja probabilidad de ocurrencia; Indica que la generación de flujos de diseño es potencialmente baja. Se aplica en aquellos cauces cuyas características físicas son o están próximas a las del umbral de generación de flujos. Aunque sea posible la ocurrencia de un lahar durante la vida útil de una estructura a largo plazo (T=100 años), esto requeriría unas condiciones de escorrentía inusualmente altas además de inusuales.
1	Muy baja probabilidad de ocurrencia; indica que es virtualmente imposible que ocurran grandes flujos de derrubios, aun que puedan ocurrir flujos locales y pequeños y puedan desarrollarse flujos de magnitud variable en los tramos altos de las quebradas y canales tributarios. Se aplica para tramos de canales donde las características físicas están por debajo del umbral de generación de lahares.

Tabla 8: Ejemplo de términos relativos y rangos de probabilidad de ocurrencia de lahares en la ladera norte del volcán de san Miguel el Salvador. (García López-Davalillo, 2001).

3.4 Elementos en riesgo por movimientos de ladera

El término bienes "assets" se usa para designar todos los objetos o cualidades valoradas por los humanos. Todos los bienes que se encuentran en un área determinada y pueden ser afectados desfavorablemente por un peligro (ejem. un movimiento de ladera) son llamados elementos en riesgo "elements at risk". Estos elementos son extremadamente disímiles en su naturaleza y normalmente se dividen en los siguientes grandes grupos:

- **Población.** Es el número de personas presentes en un área propensa a sufrir impacto. Se puede realizar un análisis más detallado utilizando distribuciones por sexo, edad y estado de salud (buena salud, mala salud, enfermo, etc.), ya que estos aspectos tienen una especial influencia en las tasas de defunción y en la naturaleza y severidad de las lesiones que sufre una población afectada por peligros (Vulnerabilidad). El perjuicio generalmente se expresa en términos de número de muertos o heridos, aunque deberían considerarse también las consecuencias a largo plazo, como secuelas físicas y psicológicas y el deterioro de la salud.
- **Edificios, estructuras, servicios e infraestructuras.** El valor de estos bienes físicos puede determinarse a partir de datos reales de impuestos sobre la vivienda de las administraciones locales o nacionales y en el caso de las infraestructuras y servicios a partir de datos de los propietarios u operadores. El daño puede ser total o reparable.
- **Propiedad.** Incluye los contenidos de las casas, negocios o comercios, maquinaria, vehículos, animales domésticos o enseres personales. Su valor puede conseguirse en las cámaras de comercio o en las compañías de seguros.
- **Actividades.** Incluye todas las actividades realizadas para ganar dinero o disfrutar. Las principales actividades son el comercio, los negocios, el

entretenimiento, el transporte, la agricultura, la industria y manufactura, la minería y el turismo. Las pérdidas provocadas por los movimientos de ladera son equivalentes a las que se producirían por interrupción de estas actividades y se expresan en su mayoría en términos de pérdidas de renta o ingreso.

- **Medioambientales.** Incluyen flora, fauna, calidad medioambiental y bienestar.

El número de categorías de los elementos en riesgo dependerá de las características y naturaleza del área estudiada y del alcance y propósito de la evaluación de riesgo.

Los daños ocasionados por movimientos de ladera tienen lugar principalmente en: viviendas por estar cimentadas en laderas inestables, pudiendo afectar a casas aisladas o a núcleos de población, gastos de mantenimiento que se producen en la explotación de algunas grandes presas, problemas en la construcción y mantenimientos de redes de comunicación (autopistas, carreteras, vías férreas, etc.), tendidos eléctricos, redes de abastecimiento y saneamiento.

Los daños y problemas dependen del uso del suelo: Son mucho más frecuentes en regiones montañosas, donde las condiciones meteorológicas y relieve acusado favorecen su desarrollo. Sin embargo, la baja población e infraestructuras diluyen su incidencia.

3.4.1 Exposición

Exposición se define como la proporción del valor total de las personas o de los bienes que pueden sufrir deterioro por el impacto de un peligro o dicho de otra manera, **valor total por vulnerabilidad**. Pero el valor total no permanece constante en el tiempo, debido a factores como la inflación, desarrollo económico, decadencia y depreciación, que deben considerarse. La vulnerabilidad también cambia con el tiempo, debido a variaciones en el estado de salud y seguridad de las personas, en la forma de vivir, en la calidad de las viviendas, en la aplicación de nuevas tecnologías. Aunque estos cambios sean mejoras y hayan sido reconocidos como avances, no conducen

necesariamente a una reducción de la vulnerabilidad frente a los riesgos naturales tales como los movimientos de ladera (Ej. la existencia de tuberías para el abastecimiento de agua o de piscinas aumentan el potencial de movimientos de ladera). La exposición, por tanto, presenta tendencias y ciclos diferentes a corto medio y largo plazo.

La exposición también experimenta marcadas variaciones a muy corto plazo debido a las características dinámicas de la población y la naturaleza móvil de algunos bienes. A esto se le ha llamado probabilidad temporal "*temporal probability*" (Morgan et al., 1992; Australian Geomechanics Society, AGS, 2000) o vulnerabilidad temporal. Estas estimaciones de la exposición deberían tener en cuenta los siguientes grupos de bienes:

- **permanentes**, bienes fijos como los edificios o tuberías que podrían dañarse independientemente del tiempo en que se produzca el movimiento. Como el bien permanecerá siempre en la zona de impacto, las consecuencias adversas para una magnitud determinada se podrían considerar constantes.
- **temporales**, en los que el grado de riesgo puede variar con el tiempo de ocurrencia del evento, que sea de noche o de día, en fin de semana o día laboral, en periodo de vacaciones o en determinada temporada turística. Las consecuencias se reflejarán en aquellas ocasiones en las que los eventos ocurran a la vez que exista un alto número de bienes móviles dentro de la zona de impacto (Ej. un tren pasando por debajo de un talud en el momento en que hay un desprendimiento) o un alto nivel de concentración (Ej. la ocupación de las casas es mayor durante la noche). La exposición temporal se representa como un factor que toma valores desde 0 (nunca presente) hasta 1 (siempre presente o fijo).

Como saber con exactitud cuando ocurrirá un deslizamiento es incierto, es muy difícil predecir cuánta gente o qué valor de bienes temporales estará presente en el momento en que impacten (estar en el lugar equivocado en el tiempo equivocado). Así para poder realizar evaluaciones de riesgo podemos adoptar dos aproximaciones al problema:

- recopilar datos sobre la variación de bienes móviles en un área amenazada y usar estos datos para calcular la proporción del tiempo en que estos valores aparecen.
- usar estos datos para calcular valores medios.

El primer método da lugar a un rango de valores y en consecuencia a un gran número de cálculos. Como corolario, la mayoría de las evaluaciones de riesgo hasta la fecha más pragmáticas han tendido a adoptar el segundo método. Este necesita calcular:

- el valor medio del bien móvil
- la proporción de tiempo en que cada individuo o bien se espera se encuentre en la "zona de peligro"
- el valor medio de personas o bienes móviles que se encuentran en la zona de peligro a cualquier hora

En esencia la exposición conlleva estar en el lugar incorrecto (Ej. la zona peligrosa donde el deslizamiento impacta, la "probabilidad espacial") en el tiempo incorrecto (Ej. cuando el deslizamiento ocurra, la "probabilidad temporal").

Por ejemplo, un paseo marítimo de 500 metros de largo está situado directamente bajo un acantilado alto que presenta fenómenos de pequeños desprendimientos de rocas (bloques de 5 m de ancho) con una frecuencia media de uno al año.

La proporción del paseo que es afectada por una caída será:

$$\text{Zona peligrosa} = \text{Tamaño del desprendimiento} / \text{Longitud de paseo} = 5/500 = 0,1$$

La proporción de tiempo que un individuo que camina a 2,5 Km/h permanece en el paseo es:

$$\text{Ocupación} = \text{Longitud del paseo} / \text{velocidad (m/h)} = 500/2500 = 0,2 \text{ h.} = 2,28 \times 10^{-5} \text{ años}$$

La probabilidad de que se encuentre el lugar y tiempo equivocados será:

$$\text{Probabilidad (L-T equivocados)} = \text{Zona peligrosa} \times \text{Ocupación} = 2,28 \times 10^{-7}$$

Esto representa la porción del tiempo que un individuo puede encontrarse en la zona peligrosa. La probabilidad anual de que un individuo sea alcanzado por desprendimientos será:

$$\begin{aligned} \text{Prob. de alcance} &= \text{Probabilidad de desprendimiento} \times \text{Prob. (L-T equivocados)} = \\ &1 \times 2,28 \times 10^{-7} = 2,28 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

Si un grupo de usuarios del paseo se sienta en un banco de tres metros de ancho para admirar la vista del mar, la exposición (probabilidad espacial de estar en el sitio equivocado) es:

$$\text{Prob. espacial} = \text{Longitud del banco} / \text{longitud del paseo} = 3/500 = 0.006$$

Si el grupo permanece en el banco una hora, la posibilidad (probabilidad anual) de que este en el paseo en el momento en el que el desprendimiento ocurre será:

$$\text{Prob. temporal} = \text{Tiempo de ocupación} / 24 \times 365 = 1/87600 = 1,14 \times 10^{-4}$$

Si la probabilidad anual de desprendimiento fuera 0.5, la posibilidad de que un grupo que esté sentado sea alcanzado por un desprendimiento será:

$$\begin{aligned} \text{Prob. (impacto en el grupo)} &= \text{Prob de evento} \times \text{Prob. temporal} \times \text{Prob. espacial} \\ &= 0.5 \times 0.006 \times 1,14 \times 10^{-4} = 3,42 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

Se puede seguir una metodología similar para estimar la exposición de las personas en caso de tráfico en un área peligrosa. Así, la exposición de un vehículo que viaja atravesando un tramo de deslizamiento de 1 Km. de ancho a 30 Km/h. sería:

$$\begin{aligned} \text{Exposición de un vehículo} &= \text{tiempo de permanencia en el área peligrosa} / \text{año} \\ &= (\text{Distancia/velocidad})/\text{año} = (1/30)/(24 \times 365) = 3,8 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

Si la ocupación del vehículo fuera de tres personas la exposición anual sería:

$$\text{Exposición de personas anual} = 0.0000038 \times 3 = 1,14 \times 10^{-5}$$

Si el número de vehículos que cruzan la zona deslizada es de 1000 al día (todos con el mismo tiempo de permanencia) con una media de ocupación de 1,5 personas por vehículo la exposición media será:

Exposición = Número de vehículos al año × exposición de un vehículo × ocupación media = $1000 \times 365 \times 0.0000038 \times 1,5 = 2,08$.

Por lo tanto el paso de 1000 vehículos y 1500 ocupantes al día sobre el área deslizada equivale a que 2,08 personas permanecieran en el área peligrosa durante todo el tiempo.

Los siguientes ejemplos muestran como calcular un valor medio de exposición. En estos casos el objetivo es calcular cuanta gente es probable que esté expuesta al riesgo en un área concreta. Para ello hay que desarrollar modelos poblacionales que permiten estimar el número medio de personas que se espera se encuentren en un área peligrosa en un determinado periodo de tiempo (Ej. en cada hora, día, etc.) Para estimar la exposición media diaria para una población residencial se necesita calcular los distintos valores de ocupación en cada tipo de edificio en los diferentes periodos del día de forma actualizada por medio de modelos de ocupación, y después sumar los valores como un todo. Por ejemplo: un bloque de apartamentos tiene una ocupación total de 1000, pero la población real varía entre un 95% durante la noche hasta un 25% durante la mitad de la tarde:

Intervalo del día (horas)	Población residente (% de ocupación)
00-06	95
06-09	75
09-12	50
12-15	50
15-18	25
18-21	75
21-24	90

La media diaria se estimará de la siguiente forma:

$$\text{Media de población} = \text{Población total} \times (6/24 \times 0,95) + (3/24 \times 0,75) + (6/24 \times 0,5) + (3/24 \times 0,25) + (3/24 \times 0,75) + (3/24 \times 0,9) = \text{Población total} \times 0,69 = 690$$

La variación diaria en el número de personas que habitan el bloque es equivalente a fijar la población en 690 personas expuestas todo el tiempo, con exposición 1. Alternativamente, esto se puede expresar como una población de 1000 personas con una exposición del 0,69. Si esta estimación se considera demasiado cruda los datos se podrán agrupar en varias categorías temporales:

- 1000 personas × con una exposición del 0,9375 para el 37,5 % del tiempo

- 1000 personas × con una exposición del 0,75 para el 25 % del tiempo
- 1000 personas × con una exposición del 0,5 para el 25 % del tiempo
- 1000 personas × con una exposición del 0,25 para el 12,5 % del tiempo

La estadística puede tener mucho valor cuando se trate de desarrollar modelos para los escenarios peores (catástrofe máxima) o mejores (mínimo impacto).

4 Vulnerabilidad a los movimientos de ladera

El impacto de un evento en la población o en los bienes presentes en un área puede variar entre pérdidas no detectables a pérdidas totales (Ej. gastos de amortización para todas las propiedades o la muerte). Lo más normal es que ocurran pérdidas parciales, donde únicamente un porcentaje de la población o de los bienes sufre daño. Esta variación en el grado de impacto sobre los bienes y personas se conoce como vulnerabilidad (Ej. Leone et al. 1996). Según Timmerman (1981) "vulnerabilidad es el grado con que un sistema, o parte de un sistema, reacciona de forma adversa a la ocurrencia de un evento peligroso. El grado y características de esta reacción adversa están parcialmente condicionados por la resistencia del sistema, en que medida el sistema es capaz de absorber y recuperarse de la ocurrencia de un evento peligroso".

La vulnerabilidad también puede ser enfocada como el nivel de daño potencial, o grado de pérdidas esperables para un bien determinado (expresado en una escala de 0 a 1) cuando este es afectado por un evento de movimiento de ladera con una intensidad determinada (Fell, 1994). Esto puede ser muy difícil de cuantificar, ya que depende de la naturaleza y la intensidad de los esfuerzos mecánicos generados por la rotura existente (movimiento diferencial del terreno, subsidencia, empuje, carga, etc.) y las características de vulnerabilidad de los elementos en riesgo que están expuestos.

4.1 ¿Que es la vulnerabilidad a los movimientos de ladera?

La investigación de la vulnerabilidad a los movimientos de ladera requiere en primer lugar una breve conceptualización del peligro. La litología, la pendiente y el clima en conjunto predisponen áreas a la actividad de movimientos de ladera. Las litologías más débiles, tales como las arenas no consolidadas no forman las laderas con riesgo de movimiento alto, pero la cohesión, la consolidación o la inter-estratificación de materiales con permeabilidades muy variadas pueden conducir a altos grados de fracturación, de discontinuidad o de disección erosiva. En resumen, la naturaleza debe crear laderas grandes

que sean escarpadas en relación con las condiciones de esfuerzo de las litologías a las que cortan (Cruden and Varnes, 1996).

En lugares donde aflora el sustrato rocoso duro, el clima no es tan fundamental, pero en el resto de litologías es el determinante principal de los procesos de movimiento como fuente principal de agua en los sistemas de ladera (Enoki et al. 1999). En general, los movimientos son estimulados normalmente por las presiones de poros que son el resultado de las lluvias intensas o prolongadas, las presiones del hielo que crece en las juntas o a lo largo de planos potenciales de cizalla, y por las fuerzas térmicas de expansión y contracción. En este sentido, la vulnerabilidad es un fenómeno temporal en el que la peligrosidad que la pone en juego varía con los patrones del clima - de manera que llegarán a ser conocidos solo ahora con una investigación detallada (Miller, 1988; Crosta, 1998).

Como la vulnerabilidad humana depende fundamentalmente de los patrones de actividad y del uso del suelo, los escenarios característicos de movimientos de ladera tendrán lugar cuando estos coincidan con terrenos susceptibles y grandes eventos climáticos. (Dai et al. 2002b).

En áreas montañosas tropicales, la topografía "salvaje" evoluciona como respuesta a las altas tasas de alteración y erosión. Las litologías más duras dan lugar a caídas de rocas y flujos de derrubios; las más flojas a flujos de barro y deslizamientos (Franks, 1999). La vulnerabilidad agregada es mayor allí donde los asentamientos son más densos o se encuentran más expuestos a los peligros (por ejemplo concentrados a lo largo del pie de un escarpe). El asentamiento más vulnerable incluye los edificios de varios pisos en las partes establecidas de ciudades importantes o los tugurios precarios de la cubierta informal en las áreas urbanas más pobres (Jiménez Díaz, 1992).

Observando la categoría anterior, Hong Kong y Kuala Lumpur son ejemplos preeminentes (Lumb, 1975). La mayoría de la urbanización en Hong Kong se caracteriza por su alta densidad y sus edificios altos. Se alinea en la Península de Kowloon e islas limítrofes y se extiende hacia atrás, dentro de laderas de gran ángulo con mucha vegetación en materiales rocosos fracturados y alterados. Figura 8.



Figura 8 .- Durante un periodo de lluvias continuadas en Hong Kong en el mes de Junio de 1972 ocurrieron en dos deslizamientos importantes: uno en el estado de *Kowloon* con la rotura de un terraplén de 40 metros de alto que produjo un flujo de tierras que mató a 70 personas y dejó 60 heridos, y otro en *Sau Mau Ping* (en la foto), flujo deslizante rápido que se llevó por delante un edificio de 12 plantas matando a 67 personas e hiriendo a otras 20.

Con una población media de 5.800 personas por kilómetro cuadrado es inevitable que las principales roturas de las laderas sean letales. Las lluvias torrenciales, asociadas comúnmente al paso de los tifones, aumentan las presiones de poro en los suelos de las laderas hasta niveles muy altos (Zhou et al. 2002). Por ello, en las décadas de los 60 y los 70, se produjeron algunas roturas muy destructivas (So, 1971).

Las autoridades de Hong Kong han adoptado un programa de reducción de la peligrosidad por movimientos de ladera muy activo que ha tenido un impacto considerable en los niveles de vulnerabilidad. Además de monitorizar, cartografiar y predecir los peligros (Dai and Lee, 2002), se realiza una microgestión de las laderas a través de la definición de Regiones Administrativas Especiales. El mantenimiento de un buen drenaje y de la cubierta vegetal es la base de esta política, sin embargo también se utilizan extensamente el

hormigón proyectado, los gaviones, los muros de contención y los contrafuertes. Esto ha permitido disminuir el riesgo de movimientos sin la reducción o la alteración significativa de los elementos en riesgo principales: las áreas urbanas. Éste es por lo tanto un caso sencillo de reducción del peligro sin construir un descenso en vulnerabilidad.

Una vulnerabilidad similar, aunque quizá con una menor mitigación del riesgo, existe en otros lugares del Sudeste de Asia. Por ejemplo, en los 80 y los 90 hasta 10 grandes edificios colapsaron total o parcialmente en Malasia, pero el único caso que afectó a una estructura ocupada fue el bloque de apartamentos de lujo de Menara Highlands en Ulu Kelang, cerca de Kuala Lumpur, que fue demolido por un deslizamiento el 11 de Diciembre de 1993. El edificio de 12 plantas contenía 52 apartamentos, y 48 de sus ocupantes murieron en el colapso. La urbanización no regulada fue el principal factor de desestabilización, ya que el área superior de la ladera había sido desestabilizada por los trabajos de construcción. El agua de lluvia se infiltró en el suelo y el movimiento del terreno resultante destruyó los cimientos del edificio (Chang, 1998).

La segunda forma de vulnerabilidad a los movimientos de ladera mayor es la de los asentamientos precarios en barrios pobres que han sido construidos en la base de escarpes o sobre laderas inestables en las grandes ciudades de países en desarrollo. Caracas (Jiménez Díaz, 1992), Río de Janeiro (Jones, 1973), Ponce (Puerto Rico), Bogotá, Cali, (Colombia) y Cuzco (Perú), todas ellas contienen áreas de casas informales (barrios, fabelas, champas, bidonvilles) que se aferran precariamente a laderas inestables y que pueden ser arrastradas por flujos de derrubios o barro durante episodios de lluvia torrencial (Alexander, 1989). En la ciudad de Guatemala los bordes de los barrancos están urbanizados y son vulnerables a los derrumbes causados por el efecto de amplificación de los esfuerzos sísmicos que se producen durante los terremotos importantes (Harp et al. 1981), mientras que los huracanes proporcionan los factores climáticos necesarios para la rotura catastrófica de las laderas en los barrios de Tegucigalpa, Honduras. Es importante resaltar que este riesgo no se asume voluntariamente por los habitantes de las laderas inestables ya que no tienen otra opción que ocupar estos sitios peligrosos. De modo análogo una

forma de riesgo llamado "voluntario" es la urbanización de los barrancos con laderas inestables en el sur de California, donde las condiciones económicas no constituyen una barrera para evitar el riesgo.

La tercera clase de vulnerabilidad importante se encuentra en asentamientos situados en áreas de montaña. Las laderas expuestas, tectónicamente desestabilizadas afectan sobre caminos y asentamientos, produciendo daños y muertes durante terremotos y / o estaciones húmedas. Están incluidos la mayoría de los grandes orógenos del mundo. Por ejemplo, los Alpes y los Himalayas, las áreas de Karacorum e Hindo Kush sufren este problema de forma considerable, lo mismo que los Andes. La vulnerabilidad a los movimientos de ladera en suelo rural tiene mucho que ver con la fragilidad esencial de los sistemas socioeconómicos de estas áreas donde son comunes la pobreza y la privación. El terremoto de Faizabad, Afganistán (Magnitud = 6,9) ocurrido el 30 de Mayo de 1998 produjo la muerte de más de 5.000 personas, la mayoría de ellas por movimientos de ladera desencadenados por el sismo que sepultaron decenas de poblaciones. Este fenómeno se repitió el 11 de marzo de 2002 tras un terremoto de magnitud 7,2 y que dio lugar a un deslizamiento que sepultó el pueblo de Dahani-Zeu matando a 150 personas. No existía ninguna forma de protección o micro-zonación de la peligrosidad. Pero aún más en Francia, España e Italia, donde el conocimiento científico detallado de los peligros de movimiento de laderas se ha acumulado durante décadas, zonas de acampada se han visto sepultadas por flujos de barro (Biescas, España), vías de comunicación han sido cortados al tráfico por las avalanchas de derrubios, y edificios han sido destruidos por los deslizamientos rocosos.

Sin embargo, en general el riesgo sobre la vida se considera mayor en los países en vías de desarrollo, especialmente en Asia Central y en Centro y Sur América. En estas regiones la gran tasa de levantamiento tectónico conduce a pronunciar las laderas haciéndolas inestables, y las poblaciones se concentran en los valles profundos adonde los desprendimientos rocosos, los deslizamientos de derrubios y las avalanchas de roca pueden ocurrir repentinamente y dar lugar a una gran devastación.

Un subtipo de vulnerabilidad en áreas montañosas es el peligro de rotura catastrófica de las represas naturales producidas en los valles tras la ocurrencia de movimientos de ladera. Costa y Shuster (1988) revisaron 65 casos de movimientos de ladera que invadieron cursos de agua activos y concluyeron que la mayoría de las presas naturales formadas rompieron dos semanas después de su formación. Ha habido varios casos en los que estas roturas han ocasionado catástrofes en los asentamientos situados río abajo (ejemplo: Monte Huascarán en Perú en 1970 – Browling, 1973 o La Josefina, Ecuador en 1993 – Leone & Velásquez, 2002) o han estado amenazados (ejemplo: Alpes italianos en 1987 – Alexander, 1988)

Finalmente, existe una vulnerabilidad a movimientos de ladera considerable allí donde las laderas de los volcanes, o los valles que las drenan están densamente pobladas. El ejemplo por excelencia es el lahar que sepultó el pueblo de Armero, Colombia durante la erupción del Volcán Nevado del Ruiz en 1985 y que acabó con la vida de 22.000 personas (Voigh 1990). Sin embargo existieron otros muchos casos de este tipo. Por ejemplo el daño producido por lahares es recurrente en las laderas del Volcán Pinatubo en Filipinas (Pierson, 1992) y el lahar generado en las laderas del Volcán Casitas en Nicaragua por las lluvias asociadas al huracán Mitch en 1998 provocó un gran número de víctimas (Sheridan et al. 1999). En este contexto, hay que resaltar que los movimientos de ladera pueden ocurrir en ausencia de erupciones. Solo la mitad de las 17 diferentes causas de lahares incluyen directamente la acción de un cataclismo volcánico (Alexander, 1993:99). Por ejemplo, la rotura de las paredes del cráter del Volcán Casita pudo deberse a un aumento de la presión de poros producida por la lluvia continuada. En todo caso, la presencia de aglomeraciones de población en las áreas de alcance potenciales de los lahares u otros movimientos de ladera volcánicos es un ejemplo llamativo de la vulnerabilidad a peligros intermitentes que tienden a cambiar su foco de lugar en función de los efectos de las erupciones sobre el paisaje físico, alterando así los niveles del riesgo continuamente.

Por tanto, existen cuatro fuentes principales de vulnerabilidad por movimientos de ladera: la expansión de las ciudades tropicales (ejemplo: Cuzco, Caracas, Bogotá), los suburbios de las afueras de las ciudades (ejemplo: Río de Janeiro y

su escarpe próximo de Serra das Araras), las áreas montañosas habitadas (ejemplo la región del Karakorum en el Himalaya) y los terrenos volcánicos escarpados densamente ocupados (ejemplo el volcán Casita en Nicaragua). A estas puede añadirse las áreas que han sufrido un cambio significativo en los usos del suelo, especialmente aquellas que han sido deforestadas (Glade, 2003) y las áreas periféricas suburbanas donde el desarrollo ha interferido con la estabilidad de las laderas.

4.2 Determinación, evaluación y aplicación de la vulnerabilidad en análisis de riesgo por movimientos de ladera

4.2.1 Consideraciones generales

Como se explicó anteriormente, la vulnerabilidad está integrada generalmente en el análisis del riesgo. Este concepto ha sido transferido al campo de los movimientos del terreno por diferentes autores (Brabb 1984; Einstein 1988; Fell 1994; Gill 1974; Eran and Griffiths 2001; Hicks and Smith 1981; Leone et al. 1996; Leoni 1996; Stevenson 1977; Stevenson and Sloane 1980; Wu and Swanston 1980, Cruden y Fell (1997) Desde entonces, se han publicado varios estudios sobre el riesgo de movimientos del terreno en diferentes casos (e.j. Dai et al. 2002; Finlay et al. 1999; Guzzetti 2000; Hardingham et al. 1998; Eran and Griffiths 2001; Michael-Leiba et al. 2000). La Sociedad de Geomecánica Australiana (Australian Geomechanics Society 2000) y el IUGS Working Group on Landslides-Committee on Risk Assessment (1997) han propuesto una definición general y comprensible de riesgo por movimientos de terreno. Este informe proporciona no solo las definiciones ya citadas, sino también los términos de riesgo "específico" y "total", "aceptable" y "tolerable", "individual" y "colectivo", y de este modo los aspectos sociales incluidos en el riesgo de movimientos del terreno. No obstante, la mayoría de la literatura sobre riesgo y peligrosidad por movimientos del terreno está basada en aspectos técnicos de este riesgo (Aleotti and Chowdhury 1999).

Normalmente, la evaluación de la vulnerabilidad en riesgo por movimientos de ladera está basada en metodologías de las ciencias naturales como las de Liu

et al (2002). A diferencia de otros procesos naturales como las inundaciones y terremotos, es muy difícil valorar la vulnerabilidad en movimientos de ladera debido a su complejidad y a la gran variedad de procesos que los generan (Leoni 1996). Deben considerarse varias cuestiones:

- La vulnerabilidad de los diferentes elementos en riesgo varía para procesos similares.

Fell(1994: 263) expone que "... una casa puede tener similar vulnerabilidad frente a un movimiento de terreno de movilidad lenta o rápida, pero las personas que viven en las casas pueden tener una vulnerabilidad baja frente a movimientos lentos (pueden salir fuera) pero tener una alta vulnerabilidad frente a movimientos rápidos..." porque no pueden escapar. Si la escala de investigación crece, hay además diferencias para una única casa. Por ejemplo, las habitaciones que están situadas enfrente a la ladera son más vulnerables de ser destruidas, por ejemplo flujos de derrubios en habitaciones orientadas hacia el valle. Además, el tamaño de las ventanas hace más vulnerables a las habitaciones que las tienen mayores. Igualmente las personas que duerman en estas habitaciones serán más vulnerables que las que ocupen otra estancia de la casa (Fell 1994; Fell and Hartford 1997)

- La probabilidad temporal de que una persona está presente durante un evento de movimiento de terreno es variable.

Mientras que una casa está fija en el suelo, un coche o los habitantes son móviles y puede que no están presentes durante el evento. Por ejemplo, por la noche, una familia está durmiendo en casa mientras que durante el día, los niños están en el colegio y los padres trabajando, por lo que la casa puede llegar a estar vacía. Por el contrario, mucha menos gente estará presente en un centro comercia durante la noche, por lo que las consecuencias potenciales serán menos severas, aunque el daño en la propiedad sea de gran alcance.

- Los distintos grupos de personas tienen un diferente potencial para hacer frente a la amenaza.

Al contrario que la mayoría de los adultos, los niños pueden no estar preparados para reaccionar adecuadamente frente a procesos potencialmente peligrosos. De igual forma, los ancianos o incapacitados puede que no tengan capacidad de escapar a pesar de que ellos puedan ser igualmente capaces de juzgar la magnitud del riesgo. Este es un ejemplo de los diferentes potenciales de afrontar la amenaza que han sido enfocadas el análisis del riesgo por movimientos del terreno por *Liu et al.* (2002).

- Los sistemas de alerta temprana modifican la vulnerabilidad de las personas.

Si se instala un sistema de alerta, la gente puede ser capaz de escapar (*Smith 2001*), o al menos de alcanzar lugares seguros (*Fell and Hardford 1997*) y en consecuencia cambiar su vulnerabilidad para eventos de determinada magnitud.

- La probabilidad de ocurrencia espacial de un movimiento de ladera es variable.

La probabilidad de ocurrencia espacial de un evento potencialmente dañino que afecta a un determinado lugar debe ser examinada. Por ejemplo, aunque un deslizamiento ocurra en un lugar previsto, la probabilidad de que un edificio pequeño o una única persona sean afectados es significativamente diferente para un desprendimiento de roca (*rock fall*) individual o para un flujo de derrubios (*debris flow*) que afecte a áreas extensas. Por tanto, **es absolutamente esencial diferenciar los tipos de movimientos del terreno**, tales como desprendimientos de roca, *debris flow*, o deslizamientos de tierras traslacionales o rotacionales por nombrar algunos pocos (*Fell 2004*)

Aunque esta lista puede ampliarse, nos da una primera impresión sobre los aspectos que deberían considerarse en la valoración de la vulnerabilidad dentro de un análisis del riesgo por movimientos del terreno. A pesar de todas estas limitaciones y complejidades, incluso problemas irresolubles a veces, existe una necesidad política y económica de valorar la vulnerabilidad por deslizamientos. Se han realizado varios intentos. Para estudios preliminares, la vulnerabilidad se ha tomado como 1, aludiendo a un daño total tan pronto como un elemento expuesto es alcanzado por un movimiento de terreno (ej.

Carrara 1993, Glade and von Daverthofen en preparación). Investigaciones en más detalle aplican matrices (Leone et al. 1996) basadas bien en aproximaciones cualitativas (Ej. Cardinalli et al 2002) o cuantitativas (Ej. Fell 1994, Finlay and Fell 1997, Heinimann 1999b, Leone et al. 1996, Michael-Leiba et al. 2000, Ragozin 1996).

4.2.2 Determinación y aplicación desde las ciencias naturales e ingenierías.

En la práctica es demasiado duro separar la vulnerabilidad de la peligrosidad y del riesgo, ya que estos conceptos están íntimamente interrelacionados de forma compleja (Alexander, 2000: 16-20; Figura 2). Por tanto es difícil diseñar una metodología estándar y completa para gestionar la vulnerabilidad de las personas y los bienes a los movimientos de ladera. Generalmente las pérdidas potenciales se evalúan en términos económicos y en función de las muertes totales. Como obtener los datos en términos cuantitativos es una tarea ardua, en muchos casos la metodología se basa en grupos o categorías cuyos valores se acumulan (ver tabla xxxx). En otros casos, la evaluación se limita a unas categorías particulares, como por ejemplo a edificios únicamente (Carrara et al. 1992). Algunos autores han adoptado una política basada en la aproximación (Olshanski, 1990), mientras que otros se han concentrado en calcular la peligrosidad, dejando que la vulnerabilidad se cuide de sí misma (Morgenstern, 1997).

Un problema particular que complica la evaluación de la vulnerabilidad en el caso de los movimientos de ladera es la posibilidad de reactivación de movimientos preexistentes (Galadini et al. 2003). Consideraremos el caso de Campomaggiore, al sur de los Apeninos Italia, villa que fue fundada en la antigüedad clásica como un fuerte romano. En 1885 fue completamente destruida por un importante desprendimiento de rocas caídas de un escarpe próximo de calizas. Los supervivientes trasladaron la ciudad entera hasta un lugar aparentemente seguro a tres kilómetros del emplazamiento original. Por desgracia, el lugar elegido resultó estar situado sobre un paleodeslizamiento en arcillas Plio-pleistocenas y los trabajos de construcción lo reactivaron. El daño fue menor por ocurrir en ese instante, pero no menos profundo. La

reactivación de los movimientos de ladera es tan común que la mayoría de las cartografías de peligrosidad por movimientos de ladera están basadas en la asunción de que cuando se han producido movimientos de ladera en el pasado, estos se pueden producir en el futuro (Wiezorek, 1984). Sin embargo, no puede asumirse que la reactivación sea función de la vulnerabilidad, sino que ésta es solamente una capa de complicación adicional que se añadirá al riesgo por movimientos de ladera.

A pesar de estas complicaciones existe una clara distinción entre la vulnerabilidad a movimientos de ladera lentos y rápidos. Todos los eventos incluidos como extremadamente rápidos en la clasificación de Varnes (Cruden and Varnes, 1996) pueden amenazar la vida, pues no hay prácticamente tiempo para reaccionar ante ellos. Los sistemas de alerta temprana frente a los movimientos de ladera pueden ayudar a comunidades y familias vulnerables, mediante la evacuación o la toma de otras precauciones antes de que los desprendimientos o los flujos de derrubios destruyan los edificios, pero no son demasiado comunes. En el otro extremo, los movimientos de ladera lentos o extremadamente lentos raramente amenazan la vida, pero pueden destruir los edificios inexorablemente (Alexander, 1984). No es usual que el daño no pueda ser reparado o parado, pero el coste económico para ponerlo bien es desorbitado. Así una vez que el gran movimiento haya comenzado a desestabilizar los cimientos de una estructura, esta puede ser vulnerable inexorablemente a sufrir más daños. Esto se puede medir y clasificar usando las escalas de la intensidad de daños de movimientos de ladera (Alexander, 1989)

Infraestructuras	Edificios y producción rural
<p>Carreteras</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caminos rurales sin asfaltar • Caminos rurales asfaltados • Carreteras secundarias • Autovías • Autopistas • Vías urbanas • Vías privadas 	<p>Casas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Casas unifamiliares • Duplex o adosados • Bloques de pisos • Manzanas • Casas rurales • Edificaciones rurales: Establos, pajares, tenadas, almacenes,... • Villas y viviendas aisladas • Edificios prefabricados
<p>Ferrocarril</p> <ul style="list-style-type: none"> • Líneas principales • Ramales • Apeaderos • Estaciones y otros edificios 	<p>Edificios Públicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ayuntamientos y Oficinas de Administración Pública • Hospitales y Clínicas • Centros deportivos, estadios y campos de deporte • Cementerios • Iglesias y capillas • Escuelas y otros centros educativos • Parques de bomberos y de ambulancias • Cuarteles y comisarías
<p>Puentes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puentes principales de carreteras, ferrocarriles, conducciones y viaductos • Puentes menores • Drenajes transversales 	<p>Patrimonio arquitectónico:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Edificios históricos • Fortificaciones • Monumentos
<p>Transmisión de electricidad</p> <ul style="list-style-type: none"> • Líneas de baja tensión, en postes • Líneas de alta tensión, en torres • Transformadores, estaciones y subestaciones 	<p>Edificios comerciales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tiendas y almacenes • Bloques de oficinas • Almacenes y áreas de almacenaje • Fábricas • Locales de artesanos y pequeños negocios • Talleres mecánicos, concesionarios y venta de manufacturas • Grandes plantas industriales y refinerías
<p>Teléfono</p> <ul style="list-style-type: none"> • Líneas de baja tensión, en postes • Repetidores de telefonía móvil y sus generadores 	<p>Agricultura</p> <ul style="list-style-type: none"> • Campos de cultivo • Invernaderos
<p>Conducciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abastecimiento de agua: conducciones principales y redes de distribución • Alcantarillado • Gaseoductos: conducciones principales y redes de distribución • Fosas sépticas y sus sistemas de alimentación 	
<p>Otros</p> <ul style="list-style-type: none"> • Canales, ríos navegables y canales de drenaje. • Depósitos o torres de agua • Instalaciones de almacenamiento de carburantes • Aeropuertos y aeródromos 	

Tabla . Elementos en riesgo.

Revisión y estado del arte.

Se han podido recopilar pocas referencias que traten el problema de la vulnerabilidad por deslizamientos, dada la escasez de los estudios sobre este componente del riesgo en particular. No obstante en los últimos años, algunas valoraciones de la vulnerabilidad han sido introducidas en el análisis de la peligrosidad y el riesgo de origen natural, y algunas de ellas incluso han sido diseñadas específicamente para el análisis de movimientos del terreno. Seguidamente serán presentadas algunas aplicaciones con objeto de dar una visión de las metodologías existentes y disponibles actualmente.

La mayoría de los primeros trabajos se centraron en el estudio de la vulnerabilidad de las **personas, edificios, estructuras e infraestructuras** frente a los movimientos de ladera en detalle y sugieren clasificaciones. Estas incluyen metodologías que describen los elementos expuestos y su vulnerabilidad potencial a un evento específico de movimiento del terreno (Ej. Dikau et al. 2001, Moser and Weidner 1998). Cardinali et al. (2002) propone una aproximación cualitativa en el análisis del riesgo y distingue entre tres tipos de daños diferentes:

- daño superficial (estético, menor): daño bajo que no compromete la funcionalidad de las estructuras y se repara fácilmente con un coste bajo.
- daño funcional (medio): estos comprometen la funcionalidad de las estructuras y su reparación cuesta tiempo y bastante dinero.
- daño estructural o daño severo a total: con estos daños los edificios, carreteras, etc. son muy dañadas o destruidas, por lo que se necesitará realizar trabajos de demolición y reconstrucción muy costosos.

Estas clases pueden subdividirse a su vez. Algunos ejemplos de clasificación de daños estructurales son:

Grado	Descripción
Nulo	El edificio se sostiene sin daño significativo

Grado	Descripción
Ligero	No presenta daño estructural, pero el coste de reparación representa un porcentaje significativo del valor del edificio
Moderado	No presenta daño estructural significativo, los daños no estructurales serán ligeros o medios. La estabilidad y funcionalidad no están comprometidas, aunque su evacuación sea necesaria para facilitar la reparación. Podrían utilizarse contrafuertes o puntales para el sostenimiento a corto plazo.
Serio	El edificio sufre importantes daños no estructurales y algunos daños estructurales. Será evacuado en interés de la seguridad personal Aunque la reparación sea posible será costosa y compleja.
Muy serio	El edificio ha sufrido daños estructurales importantes y será considerado inseguro para cualquier uso. Será desalojado de inmediato y se procederá a su derribo o apuntalamiento para evitar su colapso incontrolado.
Colapso parcial	Partes del edificio han caído. Normalmente serán cornisas, esquinas, partes del techo o estructuras suspendidas como escaleras. Su reconstrucción puede ser técnicamente compleja y muy costosa. La demolición del resto del edificio puede ser la mejor opción
Colapso total	El lugar debe ser declarado en ruina. Algunos edificios de especial importancia deben ser reconstruíos (normalmente por razones culturales) pero la mayoría no lo serán.

Tabla 5.4.- Clasificación de daño estructural (Alexander, 2002)

Grado	Descripción del daño
0	<i>Ninguno</i> ; edificio intacto
1	Insignificante; pequeñas grietas en muros o elementos estructurales, sin distorsión de la estructura o desprendimiento de detalles arquitectónicos externos
2	<i>Ligero</i> ; los edificios continúan siendo habitables; reparación no urgente. Los posibles asentamientos en la cimentación, distorsiones en la estructura e inclinación de los muros no son suficientemente importantes para comprometer la estabilidad general.
3	<i>Moderado</i> ; los muros se inclinan entre 1-2°, aparecen importantes grietas en

Grado	Descripción del daño
	elementos estructurales, y los cimientos sufren asentamientos diferenciales por subsidencia de hasta 15 cm. La evacuación es necesaria y los edificios necesitan una rápida intervención para lograr su mantenimiento
4	<i>Serio</i> ; los muros se inclinan varios grados y aparecen grietas abiertas; se rompen los elementos estructurales y la mampostería; asentamientos diferenciales de más de 25 cm que comprometen la cimentación, los suelos pueden inclinarse hasta 1-2°, o romperse por levantamiento; rotura interna de los muros que necesitarán remplazarse, la distorsión de los marcos de puertas y las ventanas las hará inservibles, los habitantes han de ser evacuados y las reparaciones será muy importantes.
5	Muy serios; los muros se inclinan 5-6°, las estructura está muy dañada y el asentamiento diferencial producirá serias grietas en muros y suelos o causará un gran giro del edificio (los edificios de madera pueden ser arrancados completamente de su cimiento). Las paredes y los tabiques de partición se habrán derrumbado por lo menos en parte; habitaciones, pórticos patios se dañarán más seriamente incluso que la propia estructura principal. Los ocupantes necesitaran ser realojados a largo plazo, y no será factible la rehabilitación del edificio.
6	Colapso parcial; requiere la evacuación inmediata de los ocupantes y el acordonamiento de la zona próxima para evitar accidentes por derrumbe
7	Colapso total; requiere el desescombros del solar.

Tabla 5.5. Escala de intensidad de daños por movimientos de ladera (Alexander 1986).

Las estimaciones de la vulnerabilidad pueden basarse en relaciones de inferencia entre el grado de intensidad del movimiento de ladera esperado (ver [tabla 5.3](#)) y el posible daño que podría causar ([tabla 5.5](#)).

La [tabla 5.6](#) presenta una clasificación simple desarrollada por Cardinali et al. (2002) del daño que se espera en edificios y carreteras por movimientos de ladera de diferente tipología (desprendimientos, flujos de derrubios o deslizamientos) e intensidad (baja, media, alta o muy alta). Sin embargo hay que reconocer que tales escalas de intensidad tienen un límite de uso. Solo son válidas bajo circunstancias parecidas de rangos de tipología de edificios presentes en la zona, de los materiales locales presentes, de las técnicas constructivas, de la calidad de la mano de obra, de los estilos de edificación y de las condiciones económicas del área estudiada.

Intensidad del movimiento		Edificios	Carreteras principales	Carreteras secundarias	Caminos	Tuberías enterradas	Líneas de ferrocarril
Baja	Desprendimiento	S	S	S	S	S	S
	Colada de derrubios	S	S	F	F	S	S

Intensidad del movimiento		Edificios	Carreteras principales	Carreteras secundarias	Caminos	Tuberías enterradas		Líneas de ferrocarril
	Deslizamiento	S	S	F	E	F	E	S
Media	Desprendimiento	F	F	F	F	S		F
	Colada de derrubios	F	F	F	F	S		F
	Deslizamiento	F	F	E	E	E		F
Alta	Desprendimiento	E	E	E	E	S		E
	Colada de derrubios	E	E	E	E	S		E
	Deslizamiento	E	E	E	E	E		E
Muy alta	Desprendimiento	E	E	E	E	S		E
	Colada de derrubios	E	E	E	E	S		E
	Deslizamiento	E	E	E	E	E		E

Nota: S=superficial/cosmético; F=funcional; E=Estructural

Tabla 5.6 Vulnerabilidad de un conjunto de bienes a movimientos de ladera de diferente intensidad (basado en Cardinali et al., 2002)

Las clasificaciones tipológicas de edificios más típicas deben recoger la siguiente información (Alexander, 2002):

- Tipo de construcción: Muros de carga (adobe, mampostería, sillería, ladrillo, etc.).
- Naturaleza de los componentes verticales y horizontales que soportan la carga (muros de ladrillo, vigas de acero, etc).
- Tamaño del edificio, número de plantas, número de lados, metros cuadrados de espacio ocupado, metros cúbicos de capacidad.
- Regularidad de la planta y el alzado.
- Grado de mezcla de técnicas constructivas en el edificio.

- Categoría de edad del edificio, esta puede generalizarse según el material constructivo predominante durante un periodo (Ej. pre-1900, 1901-1950, 1951-1965, 1966-actualidad).
- Estado de mantenimiento del edificio.

Utilizando el árbol de grados de división descritos con anterioridad, se puede desarrollar un índice de vulnerabilidad simple (de 0 a 1) para estimar el porcentaje relativo del valor medio de los bienes que puede perderse en un evento que cause cada uno de los grados de daño del árbol. Por ejemplo, la tabla 5.7 presenta los resultados obtenidos cuando se aplican estos principios para estimar la vulnerabilidad de los edificios sometidos a un movimiento de deslizamiento complejo antiguo, profundo y lento, de alta o muy alta intensidad.

Daño	Grado de daño	Índice de vulnerabilidad	Daño estimado sobre una propiedad de 100.000 €	Reparación necesaria más común.
Estructural	4-7	0,55-1,0	55.000-100.000	reconstrucción completa
Funcional	2-3	0,15-0,5	15.000-50.000	recalce apuntalamiento y reconstrucción parcial
Superficial	0-1	0,01-0,1	1.000-10.000	reddecoración, relleno de grietas

Tabla 5.7. Un ejemplo de vulnerabilidad estimada para edificios sometidos a movimientos antiguos y complejos.

Estos tipos de daños han sido usados por Leone et al. (1996) y Cardinali et al. (2002) para definir la intensidad de daño y el grado de pérdidas. Considerando que factores humanos, tecnológicos, económicos, institucionales, funcionales, y estructurales influyen en la vulnerabilidad.

Liu et al. (2002) diferencian entre cuatro categorías de vulnerabilidad: Física, económica, medioambiental, y social. Definen una ecuación para cada tipo de vulnerabilidad y combinan los resultados con valores de peligrosidad obtenidos. El producto final es clasificado de acuerdo con una clasificación tradicional de valores equidistantes y se calcula el riesgo regional por coladas de derrubios (*debris flow*) para cada prefectura de Yunnan, provincia del suroeste de China (Liu et al. 2002).

Leone et al. (1996) sugiere matrices de daño basadas en factores dañinos y la resistencia que los elementos expuestos presentan frente a estos procesos. En la tabla 1 se muestra la vulnerabilidad para varios elementos expuestos.

Elemento expuesto	Intensidad de daño	Tipo de daño	Vulnerabilidad (0-1)
Edificios	I	Daño ligero no estructural, no afecta a la estabilidad, daños en mobiliario o accesorios.	0.01-0.1
	II	Grietas en muros, no afectan a la estabilidad, no urge la reparación.	0.2-0.3
	III	Deformaciones fuertes, huecos enormes en los muros, grietas en las estructuras de soporte, afectan a la estabilidad, puertas y ventanas inservibles, evacuación necesaria.	0.4-0.6
	IV	roturas estructurales, destrucción parcial, evacuación necesaria, reconstrucción de las partes destruidas.	0.7-0.8
	V	Parcial o totalmente destruidas, evacuación necesaria, reconstrucción completa.	0.9-1
Carreteras	I	Daño pequeño en la carretera.	0.05-0.3
	II	Daño en la carretera, para su reparación son necesarias 10 t th m ³ de material	0.3-0.6
	III	Daño en la carretera, para su reparación son necesarias 100 t th m ³ de material	0.5-0.8
	IV	Destrucción de la carretera	0.8-1
Personas	I	Daño moral	0.001
	II	Problemas psicológicos	0.002
	III	Lesión física leve	0.003-0.005
	IV	Lesión física severa. Invalidez	0.04-0.1
	V	Muerte	1

Tabla 1. Vulnerabilidad de varios elementos expuestos de acuerdo con el tipo de daños por movimientos del terreno (modificado de Leone et al 1996; Glade 2003).

Una metodología propuesta para la evaluación de vulnerabilidad se recoge en el Informe del Proyecto TEMRAP⁸ (Ferrer, 2000), con participación del IGME, en el que para el estudio del riesgo por movimientos de ladera se proponen dos funciones de vulnerabilidad, una estructural y otra social. Una función de vulnerabilidad es definida por la relación entre severidad (intensidad o magnitud) del peligro y los daños esperados. Para obtenerlas es necesario caracterizar suficientes eventos históricos o recientes para que permitan construir gráficos de dispersión intensidad-daño que definan una función suficientemente fiable.

Según Ayala (1993) la vulnerabilidad estructural por movimientos de ladera depende de: el volumen o tamaño de bloque, la velocidad de la masa movilizada, de la causa del daño y de la aplicación de medidas correctoras o preventivas en el caso de movimientos lentos.

En la escala de intensidad propuesta se han tenido en cuenta los tres últimos parámetros.

$$I = [A (I_v) + B (I_{cd})] C$$

Donde: I = intensidad final (de 0 a 100)

I_v = intensidad asignada (de 0 a 1) para la velocidad del movimiento que puede medirse en la escala de velocidad de Cruden y Varnes (1996)

I_{cd} = intensidad por causa del daño

A, B= factores de peso

C = factor de corrección que depende de la aplicación de medidas de corrección rápidas.

Para la obtención de estos parámetros se propone la siguiente matriz:

Factor		Intensidad	Factor peso
	< 5 x 10 ⁻⁷ mm/s	0	A = 50

⁸ The European Multihazard Risk Assessment Proget.

Factor			Intensidad	Factor peso	
	< 5 x 10 ⁻⁷ mm/s		0		
Velocidad	< 5 x 10 ⁻⁸ - < 5 x 10 ⁻⁵		0,2		
	< 5 x 10 ⁻³ - < 5 x 10 ⁻¹		0,5		
	< 5 x 10 ⁻¹ - < 5 x 10 ¹		0,7		
	< 5 x 10 ¹ - < 5 x 10 ³		0,8		
	> 5 x 10 ³ mm/s		1		
Causa del daño	Rotación o daño en la cimentación	Movimiento diferencial	Homogeneo	0	B = 50
			Heterogeneo	0,5	
			Muy heterogeneo	1	
	Empuje y enterramiento	Densidad de material x altura del depósito		0	
				1	
	Impacto		0,1-10	0,1-0,25	
			10-30	0,25-0,50	
			30-50	0,50-0,75	
			50-75	0,75-0,9	
			> 75	1	
		Ninguno		1	
		Parcial		0,5	
Total		0			

El grado de daño puede estimarse en costes de reparación/coste total del edificio, o número de edificios expuestos/número de edificios dañados.

La vulnerabilidad social depende sobretodo de la velocidad de los movimientos, aunque depende también del volumen y extensión del área afectada. Según Ayala (1993) los flujos de derrubios y barro son los causantes de la mayoría de las muertes (87,7%), seguidas por los deslizamientos y avalanchas de rocas (12,2 %) y las arcillas rápidas (0,1 %). No obstante aunque los flujos sean los peligros que mas muertes ocasionan son los que generalmente ocurren en las zonas más pobladas, al contrario de lo que sucede con las avalanchas de roca que tienen lugar en regiones montañosas menos pobladas

Por otro lado existe una importante relación entre las causas desencadenantes y el número de muertes. Los deslizamientos provocados por terremotos representan el 81%, los producidos por lluvias e intervenciones antrópicas representan el 13,9% restante. La imprevisibilidad de los terremotos no permite la evacuación.

La función de vulnerabilidad social propuesta por el ITGE fue la siguiente:

$$I = A (I_v) + B (I_{vol}) + C (I_a)$$

Donde:

I = intensidad final (de 0 a100)

I_v = intensidad asignada (de 0 a 1) para la velocidad del movimiento que puede medirse en la escala de velocidad de Cruden y Varnes (1996)

I_{vol} = intensidad asignada al volumen de la masa movida (de 0 a 1)

I_a = intensidad asignada al área afectada (de 0 a 1)

A, B, C = factores de peso (de 0 a 100)

Los parámetros se obtienen usando la siguiente matriz:

	Factor	Intensidad	Factor peso
Velocidad (mm/s)	$< 5 \times 10^{-7}$	0	A
	$< 5 \times 10^{-7} - < 5 \times 10^{-5}$	0,2	
	$< 5 \times 10^{-5} - < 5 \times 10^{-3}$	0,3	
	$< 5 \times 10^{-3} - < 5 \times 10^{-1}$	0,5	
	$< 5 \times 10^{-1} - < 5 \times 10^1$	0,7	
	$< 5 \times 10^1 - < 5 \times 10^3$	0,8	
	$> 5 \times 10^3$	1	
		0	

Factor		Intensidad	Factor peso
		0	
Volumen			B
		100	
		0	
		100	

El grado de daño puede estimarse mediante la relación n/N , siendo N la población expuesta y n el número de muertos, nº de heridos, nº de desplazados o nº de evacuados en cada caso.

Esta metodología descrita nunca fue aplicada por la falta de datos, por ello la indefinición de muchos de los parámetros y pesos de las matrices propuestas. No obstante es una de las primeras aproximaciones empíricas al problema de la cuantificación de la vulnerabilidad total.

La Sociedad Australiana de Geomecánica (2000) identificó una serie de factores para determina la **vulnerabilidad de las personas** en el contexto de los movimientos de ladera:

- Volumen del movimiento
- Profundidad del movimiento
- Si el deslizamiento entierra a la gente
- Si la gente está dentro o fuera de edificios o vehículos
- Si el edificio o el vehículo colapsan cuando son alcanzados por el movimiento
- El tipo de colapso que sufren los vehículos o edificios

La tabla 5.9 presenta los factores de vulnerabilidad desarrollados como parte de un programa de investigación para aplicar métodos de evaluación del riesgo en áreas expuestas a peligro de movimientos de terreno en Hong Kong (Halcrow, 1999). Los factores expresan la probabilidad de muerte de un individuo que se encuentra en un área afectada por movimientos de distinta

magnitud teniendo en cuenta si la persona está dentro o fuera de los edificios afectados.

Volumen del movimiento m ³	Vulnerabilidad	
	Dentro de los edificios	Fuera de los edificios
50	0,0002	0,03
100	0,006	0,054
500	0,011	0,078
1.000	0,026	0,11
2.500	0,04	0,15
5.000	0,17	0,48

Tabla 5.9 Factores de vulnerabilidad para movimientos de terreno en laderas de Hong Kong (DNV Técnica, 1996; Halcrow, 1999)

Los factores de vulnerabilidad utilizados por Michael Leiba et al. (2000) en una evaluación del riesgo por deslizamientos en la región de Cairns, Australia se presenta en la tabla 5.10

Evento de movimiento de ladera	Vulnerabilidad de los residentes
Roturas en la ladera	0.05
Flujos de derrubios en la zona proximal	0.9
Flujos de derrubios en la zona distal	0.05

Tabla 5.10 factores de vulnerabilidad para residentes en el área de Cairns Australia (Michael Leiba et al, 2000)

Algunos deslizamientos pequeños y caídas de boques individuales pueden causar la muerte. La habilidad para escapar de los movimientos de ladera está relacionada directamente con su velocidad. En Hong Kong, Finlay et al. (1999) observaron que una persona es muy vulnerable cuando es enterrada por la masa deslizada o el evento causa el colapso del edificio que ocupa (Tabla 5.11). Si la persona es enterrada por la masa movilizada, es más probable que la muerte se produzca por asfixia que por el impacto o aplastamiento en sí. Si la persona no es enterrada, es más probable que sufra

heridas a que muera. Además, las investigaciones de los efectos de terremotos (Coburn y Spence, 1992) demostraron que el diseño de los edificios y la calidad de los materiales de construcción tienen una influencia importante en las tasas de supervivencia, por ello deberían de considerarse en el caso de los movimientos de ladera.

Caso	Rango de valores	Valor recomendado	Comentarios
Persona situada en espacio abierto, si es alcanzada por un desprendimiento	0.1-0.7	0.5	Puede sufrir heridas pero es improbable que muera
Persona situada en espacio abierto, si es enterrada por la masa deslizada	0.8-1.0	1.0	Muerte por asfixia casi segura
Persona situada en espacio abierto, si no es enterrada por la masa deslizada	0.1-0.5	0.1	Probabilidad alta de sobrevivir
Persona que se encuentra en un vehículo, si este es alcanzado o enterrado	0.9-1.0	1.0	Muerte casi segura
Persona que se encuentra en un vehículo, si este resulta únicamente dañado	0-0.3	0.3	Probabilidad alta de sobrevivir
Persona que se encuentra en un edificio, si este colapsa	0.9-1.0	1.0	Muerte casi segura
Persona que se encuentra en un edificio, si este es inundado por la masa deslizada y entierra a la persona	0.8-1.0	1.0	Muy alta probabilidad de muerte
Persona que se encuentra en un edificio, si la masa golpea únicamente al edificio	0-0.1	0.05	Probabilidad muy alta de sobrevivir

Tabla 5.11. Resumen de los factores de vulnerabilidad para las personas afectadas por deslizamientos en Hong Kong (Finlay et al., 1999; Australian Geomechanics Society, 2000)

Cruden (1997) sugirió que una relación de **tres heridos por cada muerto** podría ser un punto de partida útil para estimar la relación de fatalidad asociada a los movimientos de ladera. Esta podría ser útil **para movimientos de lentos e intermedios**, pero para deslizamientos grandes y rápidos la relación entre muertes y supervivientes heridos es generalmente muy superior, como se ha

constatado en fenómenos relacionados con erupciones volcánicas donde “muy pocos escapan heridos; una pequeña línea separa a los rápidos de los muertos” (Baxter, 1990). Por ejemplo, el flujo de barro que sepultó Armero Colombia en 1985 mató a más de 21.000 personas y tan solo 65 pudieron ser rescatadas del lodo (Voight, 1990).

La tabla 5.8 presenta índices de vulnerabilidad para edificios y personas en un área susceptible de actividad de flujos de derrubios en Montrose, Victoria (Australia):

Zona de riesgo por flujo de derrubios	Factores	Intensidad	Indice de vulnerabilidad	
			Edificios	Personas
Extremadamente alto	Velocidad alta Profundidad alta	Muy alta	1,0	0,8
Alto	Velocidad alta-media Profundidad media	Alta	0,7	0,5
Medio	Velocidad Alta-baja Profundidad baja	Media	0,4	0,1
Bajo	Velocidad media-baja Profundidad baja	Baja	0,1	0,01

Tabla 5.8 Índices de vulnerabilidad por actividad de flujos de derrubios en Montrose, Victoria, Australia (Moon et al. 1992; Fell and Hartford, 1997)

Wong et al. (1997) examinan la gente expuesta a los movimientos del terreno y determina la vulnerabilidad de las personas situadas en espacios abiertos, en vehículos o en edificios frente a ellos. Aunque esta investigación está realizada en Hong Kong, nos da una primera introducción a los diferentes tipos de vulnerabilidad que podemos aplicar a las personas. (Tabla 2)

Lugar	Descripción	Vulnerabilidad de una persona
-------	-------------	-------------------------------

		Rango de datos	Valor recomendado	Comentarios
Espacio abierto	Alcanzado por un desprendimiento de roca	0.1-0.7	0.5	Puede ser lesionado pero improbablemente puede morir
	Enterrado por derrubios	0.8-1	1	Muerte por asfixia
	No enterrado, pero alcanzado por derrubios.	0.1-0.5	0.1	Gran probabilidad de sobrevivir
Vehículo	Vehículo enterrado/ aplastado	0.9-1	1	Probablemente muerte
	Vehículo dañado	0-0.3	0.3	Gran probabilidad de sobrevivir
Edificio	Colapso del edificio	0.9-1	1	Probablemente muerte
	El edificio es inundado de derrubios y las personas son enterradas	0.8-1	1	Gran probabilidad de morir
	El edificio es inundado de derrubios pero las personas no son enterradas	0-0.5	0.2	Gran probabilidad de sobrevivir
	Los derrubios alcanzan únicamente el edificio	0-0.1	0.05	Virtualmente no peligroso

Tabla 2. Vulnerabilidad de una persona cuando es alcanzada por un movimiento de terreno en un espacio abierto en un vehículo o en un edificio (modificado de Wong et al 1997; Glade 2003).

Michael-Leiba et al. (2000) realizan un análisis de la vulnerabilidad de los residentes, edificios y carreteras frente a los movimientos del terreno (incluyendo debris flows) para Cairns City Council en Australia. Para las

personas y edificios situados en laderas, los datos fueron obtenidos de la base de datos de deslizamientos en Australia y para las carreteras situadas en laderas, la evaluación se basó en información proveniente del Cairns City Council. A pesar de que tuvieron que adoptarse numerosas suposiciones para obtener valores de vulnerabilidad a escala regional, esta metodología tuvo una aplicación práctica, y tiene realmente un gran interés para los agentes de planificación (Tabla 3).

Proceso	Vulnerabilidad de		
	Residentes	Edificios	Carreteras
Movimientos de terreno en laderas	0.05	0.25	0.3
Susceptible a coladas de derrubios proximales	0.9	1	1
Susceptible a coladas de derrubios distales	0.05	0.1	0.3

Tabla 3. Vulnerabilidad de varios elementos expuestos a movimientos del terreno incluyendo los flujos de derrubios (modificado por Michael-Leiba et al. 2000; Glade 2003)

Ragozin and Tikhvinsky (2000) comparan la vulnerabilidad de la población y los edificios frente a los movimientos de ladera. Ellos además incluyen otros peligros naturales y tecnológicos y diferencian entre lesiones o daños ligeros, serios o fatales. De esta manera se considera no solo la vulnerabilidad a la pérdida de vidas sino los diferentes tipos de daños que están tenidos en cuenta. Los autores puntualizan, sin embargo, que las vulnerabilidades máximas corresponden a eventos de terremotos. De esta manera sus categorías de valoración de vulnerabilidad no están solamente asignadas para deslizamientos. Por ejemplo, en el terremoto de Nicaragua de 1972 resulta un valor de vulnerabilidad de 0.7 para edificios y de 0.012 para pérdida de vidas. En el terremoto de Spitak (Armenia) de 1988 el resultado fue de 0.51 y 0.025 y para el terremoto de Neftegrosk 1 y 0.58 respectivamente. Tabla 4.

Vulnerabilidad de edificios y construcciones	Población daños-lesiones			
	leves	serios	fatales	total

0.1	0.0012	0.00016	0.0004	0.0014
0.3	0.0138	0.00184	0.00046	0.0161
0.5	0.0686	0.00914	0.00229	0.08
0.7	0.2229	0.02971	0.00743	0.26
0.9	0.39	0.22	0.105	0.675
1.0	0.4	0.4	0.2	1

Tabla 4 Vulnerabilidad de edificios y construcciones y población frente a movimientos del terreno y otros peligros naturales y tecnológicos (modificado de Ragozin and Tikhvinsky 2000; Glade 2003).

Heinimann (1999b) presenta un método comprensible para el análisis del riesgo enfocado específicamente a los movimientos en masa gravitacionales. En esta metodología, son clasificados diferentes tipos de movimientos del terreno y son clasificados respecto a su probabilidad de ocurrencia en un determinado lugar (Tabla 5).

Probabilidad espacial	Clase	Tipo de movimiento de terreno
0.01	Mínima	Desprendimiento
0.1	Muy baja	Desprendimiento, deslizamiento de tierras.
0.3	Baja	
0.5	Media	
0.7	Alta	
0.9	Muy alta	
1.0	Cierta	Deslizamiento de rocas o tierras

Tabla 5 Clasificación de la probabilidad espacial de ocurrencia para diferentes tipos de movimientos de terreno (modificado de Heinimann 1999b)

Aunque está basada en un análisis cualitativo, esta tabla aporta una visión general de la probabilidad espacial de los diferentes tipos de movimientos del

terreno. Para incluir la información de vulnerabilidad en el análisis también son clasificados los elementos expuestos. En la tabla 6 se clasifican las estructuras construidas en base a la estimación de su resistencia como tipos de elementos expuestos.

Categoría de edificio	Estructura del edificio	Resistencia
0	Estructuras más ligeras (construcciones de entibación simple)	Nula
1	Estructura ligera	Muy débil
2	Estructura mixta (hormigón y entibación)	Débil
3	Hormigón y muros de ladrillo	Media
4	Hormigón armado	Fuerte
5	Estructuras reforzadas	Muy fuerte

Tabla 6 Categorías de edificios y resistencia estimada según Heinemann (1999a)

Para cada categoría se determina la vulnerabilidad frente a eventos de diferente magnitud. En la tabla 7 se muestra un ejemplo de valores para desprendimientos de roca además de su vulnerabilidad estructural, se delimita también la probabilidad de muerte dentro de los diferentes tipos de construcciones para diferentes magnitudes. En la tabla 8 se muestran ejemplos de dichos valores.

Heinemann (1999^a) expone claramente que la mayor limitación de la metodología es que la mayoría de los datos tienen que ser supuestos. Sin embargo esta metodología proporciona una aproximación general inicial a la evaluación de la vulnerabilidad en el análisis del riesgo por movimientos de ladera, que incluyen los desprendimientos de roca, los flujos de derrubios y los deslizamientos traslacionales y rotacionales.

Una de ellas es el Informe del Proyecto TEMRAP⁹ (Ferrer, 2000), con participación del IGME, en el en el que para el estudio del riesgo por movimientos de ladera se proponen dos funciones de vulnerabilidad, una estructural y otra social. Una función de vulnerabilidad es definida por la relación entre severidad (intensidad o magnitud) del peligro y los daños esperados. Para obtenerlas es necesario caracterizar suficientes eventos históricos o recientes para que permitan construir gráficos de dispersión intensidad-daño que definan una función suficientemente fiable.

Según Ayala (1993) la vulnerabilidad estructural por movimientos de ladera depende de: el volumen o tamaño de bloque, la velocidad de la masa movilizada, de la causa del daño y de la aplicación de medidas correctoras o preventivas en el caso de movimientos lentos.

En la escala de intensidad propuesta se han tenido en cuenta los tres últimos parámetros.

$$I = [A (I_v) + B (I_{cd})] C$$

- Donde:
- I = intensidad final (de 0 a 100)
 - I_v = intensidad asignada (de 0 a 1) para la velocidad del movimiento que puede medirse en la escala de velocidad de Cruden y Varnes (1996)
 - I_{cd} = intensidad por causa del daño
 - A, B = factores de peso
 - C = factor de corrección que depende de la aplicación de medidas de corrección rápidas.

Para la obtención de estos parámetros se propone la siguiente matriz:

Factor		Intensidad	Factor peso
Velocidad	$< 5 \times 10^{-7}$ mm/s	0	A = 50
	$< 5 \times 10^{-7} - < 5 \times 10^{-5}$	0,2	
	$< 5 \times 10^{-5} - < 5 \times 10^{-3}$	0,3	
	$< 5 \times 10^{-3} - < 5 \times 10^{-1}$	0,5	

⁹ The European Multihazard Risk Assessment Proget.

Factor			Intensidad	Factor peso	
	$< 5 \times 10^{-1} - < 5 \times 10^1$		0,7		
	$< 5 \times 10^1 - < 5 \times 10^3$		0,8		
	$> 5 \times 10^3 \text{ mm/s}$		1		
Causa del daño	Rotación o daño en la cimentación	Movimiento diferencial	Homogeneo	0	B = 50
			Heterogeneo	0,5	
			Muy heterogeneo	1	
	Empuje y enterramiento	Densidad de material x altura del depósito		0	
				1	
	Impacto	$(\text{Vol}_{\text{bloque deslizado}} / \text{Vol}_{\text{edificio}}) \times 100$	0,1-10	0,1-0,25	
			10-30	0,25-0,50	
			30-50	0,50-0,75	
			50-75	0,75-0,9	
			> 75	1	
	Corrección rápida	Ninguno		1	
		Parcial		0,5	
Total		0			

El grado de daño puede estimarse en costes de reparación/coste total del edificio, o número de edificios expuestos/número de edificios dañados.

La vulnerabilidad social depende sobretodo de la velocidad de los movimientos, aunque depende también del volumen y extensión del área afectada. Según Ayala (1993) los flujos de derrubios y barro son los causantes de la mayoría de las muertes (87,7%), seguidas por los deslizamientos y avalanchas de rocas (12,2 %) y las arcillas rápidas (0,1 %). No obstante aunque

los flujos sean los peligros que mas muertes ocasionan son los que generalmente ocurren en las zonas más pobladas, al contrario de lo que sucede con las avalanchas de roca que tienen lugar en regiones montañosas menos pobladas

Por otro lado existe una importante relación entre las causas desencadenantes y el número de muertes. Los deslizamientos provocados por terremotos representan el 81%, los producidos por lluvias e intervenciones antrópicas representan el 13,9% restante. La imprevisibilidad de los terremotos no permite la evacuación.

La función de vulnerabilidad social propuesta por el ITGE fue la siguiente:

$$I = A (I_v) + B (I_{vol}) + C (I_a)$$

Donde:

I = intensidad final (de 0 a 100)

I_v = intensidad asignada (de 0 a 1) para la velocidad del movimiento que puede medirse en la escala de velocidad de Cruden y Varnes (1996)

I_{vol} = intensidad asignada al volumen de la masa movida (de 0 a 1)

I_a = intensidad asignada al área afectada (de 0 a 1)

A, B, C = factores de peso (de 0 a 100)

Los parámetros se obtienen usando la siguiente matriz:

	Factor	Intensidad	Factor peso
Velocidad (mm/s)	$< 5 \times 10^{-7}$	0	A
	$< 5 \times 10^{-7} - < 5 \times 10^{-5}$	0,2	
	$< 5 \times 10^{-5} - < 5 \times 10^{-3}$	0,3	
	$< 5 \times 10^{-3} - < 5 \times 10^{-1}$	0,5	
	$< 5 \times 10^{-1} - < 5 \times 10^1$	0,7	
	$< 5 \times 10^1 - < 5 \times 10^3$	0,8	
	$> 5 \times 10^3$	1	
Volumen		0	B
		100	
		0	

Factor		Intensidad	Factor peso
		0	
		100	

El grado de daño puede estimarse mediante la relación n/N , siendo N la población expuesta y n el número de muertos, nº de heridos, nº de desplazados o nº de evacuados en cada caso.

Esta metodología descrita nunca fue aplicada por la falta de datos, por ello la indefinición de muchos de los parámetros y pesos de las matrices propuestas. No obstante es una de las primeras aproximaciones empíricas al problema de la cuantificación de la vulnerabilidad total.

La Sociedad Australiana de Geomecánica (2000) identificó una serie de factores para determina la **vulnerabilidad de las personas** en el contexto de los movimientos de ladera:

- Volumen del movimiento
- Profundidad del movimiento
- Si el deslizamiento entierra a la gente
- Si la gente está dentro o fuera de edificios o vehículos
- Si el edificio o el vehículo colapsan cuando son alcanzados por el movimiento
- El tipo de colapso que sufren los vehículos o edificios

La tabla 5.9 presenta los factores de vulnerabilidad desarrollados como parte de un programa de investigación para aplicar métodos de evaluación del riesgo en áreas expuestas a peligro de movimientos de terreno en Hong Kong (Halcrow, 1999). Los factores expresan la probabilidad de muerte de un individuo que se encuentra en un área afectada por movimientos de distinta magnitud teniendo en cuenta si la persona está dentro o fuera de los edificios afectados.

Tabla 5.9 Factores de vulnerabilidad para movimientos de terreno en laderas de Hong Kong (DNV Técnica, 1996; Halcrow, 1999)

Volumen del movimiento m ³	Vulnerabilidad	
	Dentro de los edificios	Fuera de los edificios
50	0,0002	0,03
100	0,006	0,054
500	0,011	0,078
1.000	0,026	0,11
2.500	0,04	0,15
5.000	0,17	0,48

Los factores de vulnerabilidad utilizados por Michael Leiba et al. (2000) en una evaluación del riesgo por deslizamientos en la región de Cairns, Australia se presenta en la tabla 5.10

Evento de movimiento de ladera	Vulnerabilidad de los residentes
Roturas en la ladera	0.05
Flujos de derrubios en la zona proximal	0.9
Flujos de derrubios en la zona distal	0.05

Tabla 5.10 factores de vulnerabilidad para residentes en el área de Cairns Australia (Michael Leiba et al, 2000)

Algunos deslizamientos pequeños y caídas de boques individuales pueden causar la muerte. La habilidad para escapar de los movimientos de ladera está relacionada directamente con su velocidad. En Hong Kong, Finlay et al. (1999) observaron que una persona es muy vulnerable cuando es enterrada por la masa deslizada o el evento causa el colapso del edificio que ocupa (Tabla 5.11). Si la persona es enterrada por la masa movilizada, es más probable que la muerte se produzca por asfixia que por el impacto o aplastamiento en sí. Si la persona no es enterrada, es más probable que sufra heridas a que muera. Además, las investigaciones de los efectos de terremotos (Coburn y Spence, 1992) demostraron que el diseño de los edificios y la calidad de los materiales de construcción tienen una influencia importante en las tasas de supervivencia, por ello deberían de considerarse en el caso de los movimientos de ladera.

Caso	Rango de valores	Valor recomendado	Comentarios
Persona situada en espacio abierto, si es alcanzada por un desprendimiento	0.1-0.7	0.5	Puede sufrir heridas pero es improbable que muera
Persona situada en espacio abierto, si es enterrada por la masa deslizada	0.8-1.0	1.0	Muerte por asfixia casi segura
Persona situada en espacio abierto, si no es enterrada por la masa deslizada	0.1-0.5	0.1	Probabilidad alta de sobrevivir
Persona que se encuentra en un vehículo, si este es alcanzado o enterrado	0.9-1.0	1.0	Muerte casi segura
Persona que se encuentra en un vehículo, si este resulta únicamente dañado	0-0.3	0.3	Probabilidad alta de sobrevivir
Persona que se encuentra en un edificio, si este colapsa	0.9-1.0	1.0	Muerte casi segura
Persona que se encuentra en un edificio, si este es inundado por la masa deslizada y entierra a la persona	0.8-1.0	1.0	Muy alta probabilidad de muerte
Persona que se encuentra en un edificio, si la masa golpea únicamente al edificio	0-0.1	0.05	Probabilidad muy alta de sobrevivir

Tabla 5.11. Resumen de los factores de vulnerabilidad para las personas afectadas por deslizamientos en Hong Kong (Finlay et al., 1999; Australian Geomechanics Society, 2000)

Cruden (1997) sugirió que una relación de **tres heridos por cada muerto** podría ser un punto de partida útil para estimar la relación de fatalidad asociada a los movimientos de ladera. Esta podría ser útil **para movimientos de lentos e intermedios**, pero para deslizamientos grandes y rápidos la relación entre muertes y supervivientes heridos es generalmente muy superior, como se ha constatado en fenómenos relacionados con erupciones volcánicas donde "muy pocos escapan heridos; una pequeña línea separa a los rápidos de los muertos" (Baxter, 1990). Por ejemplo, el flujo de barro que sepultó Armero Colombia en 1985 mató a más de 21.000 personas y tan solo 65 pudieron ser rescatadas del lodo (Voight, 1990).

Discusión

Las metodologías descritas anteriormente son significativamente diferentes tanto en su nivel de detalle como en los valores de vulnerabilidad resultantes. Con la excepción de Heinemann (1999b), la mayoría de las metodologías no distinguen entre los distintos tipos de procesos (ej. Leone et al 1996, Radozin and Tikhvinsky 2000, Wong et al. 1997) o magnitudes (ej. Leone et al. 1996, Michael-Leiba et al. 2000, Radozin and Tikhvinsky 2000, Wong et al. 1997). Por otro lado, la vulnerabilidad estimada para los elementos expuestos varía. A pesar de que la vulnerabilidad para edificios es asignada en términos de grado de pérdidas (ej. Leone et al 1996), los valores absolutos de vulnerabilidad difieren significativamente. De igual manera, la vulnerabilidad social es valorada de formas totalmente diferentes. Algunos autores distinguen entre diferentes niveles de daño que incluyen las pérdidas de vidas actuales (ej. Radozin and Tikhvinsky 2000), mientras que otros solo definen la probabilidad de pérdidas de vidas (ej. Michael-Leiba et al. 2000; Wong et al. 1997). Además, los valores absolutos son dispersados en amplios rangos que hacen muy difícil la comparación de las metodologías.

Existen varias razones para estas dificultades:

No todos los autores muestran explícitamente, o en detalle, como han obtenido estos valores. Por lo que se sospecha que la mayoría de los valores han sido estimados debido a la falta de información.

La mayoría de los estudios son empíricos, por ejemplo Wong et al (1997) que obtiene valores en y para Hong Kong.

Las bases de datos históricos que han sido revisadas, y los resultados obtenidos son muy dependientes de lo que las bases de datos contienen actualmente de indicadores socio-económicos o de la vulnerabilidad comunitaria frente a los peligros naturales (ej. King 2001). Por ejemplo, Michael-Leiba et al. (1999) valoran la vulnerabilidad de los edificios y de las personas usando la base de datos australiana de deslizamientos y para las carreteras la información proviene del Cairns City Council.

Análisis retrospectivos de eventos pasados específicos. Ej. Ragozin and Tikhvinsky (2000) examinan eventos de deslizamientos y terremotos pasados y Heiniman (1999a, 1999b) investiga eventos pasados y obtiene estimaciones, pero también asume carencia de valores.

Ciertamente, la incertidumbre es inherente a todo estudio. Se puede concluir que, a pesar de que Heiniman (1999a, 1999b) introduce una metodología muy detallada para determinar el riesgo frente a movimientos en masa gravitacionales, aún falta una estrategia general para determinar la vulnerabilidad de los elementos expuestos frente a eventos de movimientos del terreno específicos. Esa es la mayor laguna e inconveniente en cualquier análisis de riesgo de movimientos del terreno.

Nuevas Metodologías

A pesar de estas sombrías conclusiones, los ejemplos siguientes muestran tres aplicaciones potenciales de la valoración de la vulnerabilidad en diferentes entornos. El primer estudio es una evaluación regional a escala 1:25.000 que ha sido realizada en Rheinhessen, Alemania, en un área de 50 Km². La segunda aplicación fue acometida por la comunidad de BÍldudalur, localizada en el Noroeste de Islandia, a escala 1:5.000 para el estudio de un área de unos 5 Km² aproximadamente. La tercera es una metodología para la estimación de la vulnerabilidad que tiene en cuenta la potencialidad de pérdidas parciales.

Un estudio preliminar de vulnerabilidad en Rheinhessen, Alemania.

El estudio de Rheinhessen pretendía alcanzar un análisis del riesgo por movimientos del terreno aplicando una vulnerabilidad simplificada. Los detalles de la región y una recopilación general de la inestabilidad de laderas en Rheinhessen se dan en Glade and von Davertzhofen (en preparación). Los tipos de movimientos dominantes son movimientos translacionales superficiales y deslizamientos rotacionales.

El análisis de riesgo está basado en un mapa de peligrosidad por movimientos de ladera realizado por Jäger (1997). Los elementos expuestos fueron

clasificados según la clasificación de usos del terreno en: Áreas residenciales, Áreas industriales, Áreas de usos múltiples, Áreas especiales (MURL 2000), Áreas agrícolas, Pastos, Autopistas y Carreteras (Pflügner 1997), Viñedos (KTBL 1996), y Bosques (HMWVL 1996). Estas unidades han sido digitalizadas a partir de mapas de usos del suelo oficiales. Para cada elemento expuesto, se ha definido un daño potencial, que se ha basado en la revisión de la literatura anteriormente mencionada y en datos de anuarios estadísticos nacionales. En Alemania, la literatura de daños económicos potenciales para determinados elementos expuestos está bien desarrollada en el caso de las inundaciones. Así, estos valores han sido transferidos a los elementos expuestos (Tabla 9).

Elemento expuesto	Daño potencial (€/m²)
Área residencial	255
Área industrial	205 - 255
Área de usos múltiples	255 - 410
Áreas especiales (Escuelas, guarderías,...)	205
Área agrícola	0.3
Pasto	0.5 - 0.7
Carretera	13 - 15
Autopista	85 - 128
Viñedo	10
Bosque	2

Tabla 9 Elementos expuestos con daño potencial atribuido en €/m² (para obtener detalles de fuentes y cálculos ver Glade and von Davertzhofen (en preparación)).

Para el área de estudio no estaba disponible ninguna información sobre la vulnerabilidad de los elementos expuestos al inicio de movimientos del terreno.

Por ello, la vulnerabilidad fue valorada asumiendo que si un elemento expuesto es afectado por un movimiento, será totalmente destruido. Por tanto, se le asigna vulnerabilidad 1 a todos los elementos en riesgo. Debido a la baja probabilidad de que una persona sea herida o resulte muerta por un deslizamiento no se ha tenido en cuenta el riesgo personal en el análisis. Todas las unidades de usos del suelo han sido clasificadas en cuatro grupos de daño: Bajo (Pasto, área agrícola, Bosque), Moderado (Viñedos), Alto (Carreteras y autopistas) y Muy Alto (áreas residenciales, áreas industriales, áreas de usos múltiples y áreas especiales).

La combinación entre estas clases de daño potencial con la información de peligrosidad natural y de los elementos en riesgo conduce a una matriz cualitativa de las diferentes clases de riesgo por movimientos de ladera. La matriz de riesgo por movimientos de ladera incluye las clases de riesgo bajo, moderado, alto y muy alto. Estas clases fueron establecidas mediante la combinación de el grado de peligrosidad natural definido por Jäger (1997) y las clases de daño potencial en los elementos expuestos (Bajo:<5€/m²; Moderado: 5-13 €/m²; Alto: 13-150 €/m²; Muy Alto: >150 €/m²). La combinación y clasificación de ambos parámetros da lugar a las clases de riesgo Bajo, Moderado, Alto y Muy Alto (ver Glade and von Davertzhofen (en preparación) para más detalles).

El 90% del área total fue clasificada como riesgo bajo, el 8 % como moderado, el 2% como alto y el 0.2% como muy alto. En general el bajo riesgo hace referencia a laderas ligera o moderadamente empinadas con pasto. En contraste las clases alto o muy alto se refieren a laderas empinadas con edificios. Este resultado demuestra la importancia de los efectos potenciales de los deslizamientos en el área de estudio, que puede ser considerada como representativa de toda el área de Rheinhessen.

Evaluación avanzada de la vulnerabilidad en Bıldudalur, Islandia.

Jensen y Sórson (2002) han realizado un estudio comprensible para valorar la peligrosidad por deslizamientos en la región de la costa este de Islandia, y Glade and Jensen (2003) para la región de los fiordos del noroeste. Estos últimos realizan detalladas descripciones del escenario medioambiental de

Bíldudalur, la historia de movimientos de ladera locales y el método y los resultados del cálculo de las zonas de alcance de flujos de derrubios y desprendimientos presentes en el área.

Basándose en este estudio. Bell y Glade (próxima aparición a) desarrollan una metodología para el análisis de riesgo por movimientos de ladera en Bíldudalur. Además Bell y Glade (próxima aparición b) aplican la aproximación de Heinimann (1999b) y determinan la vulnerabilidad de estructuras edificadas y su resistencia, con respecto a flujos de derrubios y desprendimientos de rocas de diferentes magnitudes. La vulnerabilidad de las personas en los edificios fue valorada en base a los procesos, magnitudes y tipos de edificios. Una revisión de datos históricos no pudo añadir veracidad a los valores de vulnerabilidad debido a que la información necesaria no estaba disponible Bell y Glade (próxima aparición b). Los datos históricos no revelan la existencia de muertes por eventos de movimiento de laderas (Glade and Gensen 2003). Por lo tanto, la probabilidad de pérdida de vidas dentro fuera de las construcciones se asume como muy baja. No obstante, la diferenciación entre casa valor de vulnerabilidad para los respectivos elementos expuestos se describe con detalle en Bell and Glade (próxima aparición a). Un resumen de las vulnerabilidades para procesos específicos y magnitudes respectivas se muestra en la tabla 10.

Magnitud	Elementos en riesgo	Flujos de derrubios	Desprendimientos
Baja	Líneas de energía	1	1
	Carreteras e infraestructuras	0.2	0.2
	Edificios, propiedades	0.1	0.1
	Personas	0.2	0.2
	Personas en edificios	0.02	0.02
Media	Líneas de energía	1	1
	Carreteras e infraestructuras	0.4	0.2
	Edificios, propiedades	0.2	0.3
	Personas	0.3	0.4
	Personas en edificios	0.06	0.12
Alta	Líneas de energía	1	1
	Carreteras e infraestructuras	0.6	0.4
	Edificios, propiedades	0.5	0.5
	Personas	0.5	0.5
	Personas en edificios	0.25	0.25

Tabla 10 Valores de vulnerabilidad para diferentes elementos en riesgo para flujos de derrubios y desprendimientos de roca de diferentes

magnitudes aplicado a BÍldudalur, Noroeste de Islandia (modificado de Bell y Glade 2004).

Tras definir los valores de vulnerabilidad, las zonas de alcance de movimientos del terreno calculadas por Glade y Jensen (2003) fueron transformadas en zonas de peligrosidad atribuyéndoles periodos de retorno para cada magnitud de evento. El riesgo por movimientos de ladera fue calculado usando estas zonas de peligrosidad en combinación con los valores de daño potencial y las respectivas vulnerabilidades de los elementos en riesgo. Se dibujaron seis mapas de riesgo, dos para el riesgo de pérdida de vidas individual (suponiendo que en cada casa hay una sola persona), dos para el riesgo de pérdidas de vidas objetivo (teniendo en cuenta el número de personas que habitan cada casa) y dos para el riesgo económico, uno para cada clase de movimiento (flujo de derrubios y desprendimientos).

Metodología de evaluación de basada en la identificación de los bienes y la estimación de las lesiones personales y de los costes de los daños en bienes materiales (Alexander, 2004).

A continuación se describe una metodología de evaluación de la vulnerabilidad a los movimientos de ladera basada en la identificación de los bienes y la estimación de las lesiones personales y de los costes de los daños en bienes materiales (Alexander, 2004).

Es un ejemplo de **metodología para la estimación de la vulnerabilidad empleando datos que se pueden recoger mediante encuestas de campo u otros métodos**. Con respecto a los elementos en riesgo, la vulnerabilidad puede considerarse bien como la susceptibilidad de daño por movimientos de ladera de tipos o tamaños definidos, o bien en términos de valor, que se expresa utilizando las tres formas siguientes:

- **Valor monetario** El precio o valor actual del activo (conjunto de todos los bienes y derechos con valor monetario que son propiedad de una empresa, institución o individuo, y que se reflejan en su contabilidad), o el valor de sustitución (el coste de substituirlo por un activo similar o idéntico si este ha quedado totalmente perdido o siniestrado).

- **Valor intrínseco** el grado para el cual un activo (tal como un monumento antiguo) se considera importante e irremplazable.
- **Valor de utilización** la utilidad de un activo dado, o el valor monetario de su utilización media durante un intervalo de tiempo especificado.

La vida humana, cuando es amenazada por un peligro tal como los movimientos de ladera, constituye un caso especial ya que su valor intrínseco es incalculable. A pesar de esto, se han utilizado varias medidas en el trabajo actuarial de compañías de seguros que otorgan un valor monetario a la muerte o lesión (Linnerooth, 1979). Primeramente, el **valor de una vida estadística** "*value of a statistical life*", asigna simplemente una cifra estándar, basada en las ganancias perdidas. En cifras de 1990, como media para los países industrializados, se estimó en unos 1,75 millones de dólares USA para la muerte, 10.000 \$ para la lesión seria, y 1.000 \$ para lesión de menor importancia. En segundo lugar, el llamado **valor privado de una vida estadística** "*private value of a statistical life*", que se basa en las ganancias perdidas, los costes médicos y los costes indirectos. El tercero, conocido como **el valor social de una vida estadística** "*social value of a statistical life*", incluye el valor privado mas, los impuestos no recaudados y los costes médicos, de emergencia, legales, judiciales y ayudas de la administración pública. Los impuestos no recaudados se estiman desarrollando un perfil de la edad, del sexo y de la renta de víctimas potenciales y calculando sus responsabilidades fiscales futuras. En base a esto, se han estimado varias veces los valores monetarios medios de una vida humana, resultando valores entre 873.000 \$ y 7 millones de dólares USA. La gran variación no solamente refleja la edad, el estado social y la capacidad, sino también el valor de las indemnizaciones cuando se reclaman los daños.

Como las muertes y lesiones son inverosímiles en la mayoría de las situaciones de movimiento lento, el análisis siguiente se ha restringido a la valoración de las pérdidas la propiedad y de otros costes materiales. Así, para caracterizar los activos con objeto de valorar la vulnerabilidad y el riesgo se consideran apropiados los tres métodos siguientes (véase el cuadro 5.7):

- **Método del valor individual** “*Single asset method*”: En cada zona de peligro delimitada deben determinarse el valor máximo posible de daño o de pérdidas ocasionados por los movimientos de ladera para cada activo que esté presente. Las cifras obtenidas no se promedian entre los activos. Esto es apropiado donde los activos muestren claramente unos niveles diversos de vulnerabilidad, especialmente donde los usos, las funciones y los valores difieren substancialmente de un activo a otro. Sin embargo, puede producir una representación excesivamente detallada de la vulnerabilidad y posiblemente las pérdidas se inflen excesivamente al desagregarlas.
- **Método del valor sumado** “*Summed asset method*”: Se establecerán las vulnerabilidades de los activos individuales para cada zona de peligro delimitada. Los datos obtenidos se deben sumar, promediar y redondear por lo bajo al número entero más cercano entre 0 y 4, con objeto de representar la vulnerabilidad media de los activos presentes en la zona de peligro dada, en los términos de las clases descritas más adelante.
- **Método del valor generalizado** “*Generalized asset method*”: Ha de estimarse de forma heurística un nivel general de vulnerabilidad para todos los activos presentes en una zona de peligro delimitada.

Los activos se caracterizan como elementos en riesgo y pueden ser seleccionarse de entre las categorías mostradas en la tabla 5.1.

La asignación de las clases de la vulnerabilidad para cada activo, o agrupación espacial de los elementos en riesgo, puede realizarse en base a hipótesis sobre el grado de pérdidas que probablemente se sufrirán cuando ocurra el movimiento de ladera (es decir cuando el peligro se manifiesta). Mientras que la naturaleza de la vulnerabilidad diferencie entre edificios y estructuras, vidas de seres humanos y actividades socioeconómicas, éstos se deben codificar por separado. Es preciso destacar que es poco probables las distintas clases generen los mismos valores de vulnerabilidad. Por ejemplo, es probable que la vulnerabilidad alta a la muerte (V3-V4) se concentre en pocas

localizaciones y se da en pocos casos, mientras que una vulnerabilidad alta de daños en los edificios sea mucho más común y extensa.

Las clases son como sigue:

Edificios y estructuras.

V0 La suma de pérdidas total no causaría problemas severos o no representaría una pérdida significativa del valor para su uso general o intrínseco, esta pérdida es solamente probable en el caso en que los activos no tengan ningún valor (por ejemplo edificios abandonados).

V1 La suma de pérdidas total causaría problemas de menor importancia o los costes resultantes serían pequeños y abordables. El daños podría repararse fácilmente y no sería necesaria una interrupción de las actividades socioeconómicas.

V2 La suma de pérdidas total sería moderadamente significativa o dará lugar a costes o dificultades moderados. El daño sería reparable, aunque podría ser costoso.

V3 La suma de pérdidas total sería muy significativas o costosas en relación con los recursos o las reservas disponibles. El daños producido no sería reparable y si lo fuera sería extremadamente costoso de remediar.

V4 La suma de pérdidas total podría ser extremadamente significativa o muy costosa (en relación con los recursos o las reservas disponibles) y podría ser difícil o imposible de rectificar.

Vidas humanas.

V0. No hay amenaza para la vida o existe seguridad.

V1. Las muertes son altamente inverosímiles y la fatalidad virtualmente se elimina. Si ocurrieran lesiones probablemente no serían peligrosas para la vida.

V2. Las víctimas son inverosímiles, especialmente los muertos. Si sucede lo peor, sólo es probable que una pequeña cantidad de gente este implicada.

V3. Las víctimas pueden ocurrir y la muerte debida a un movimiento de ladera es posible, aunque no probable. Las lesiones no mortales podían ser serias.

V4. Las muertes podrían ocurrir fácilmente y en los peores casos podrían producirse muchas muertes y lesiones muy serias.

Actividades socioeconómicas.

V0. No hay interrupción en las actividades o probabilidad de pérdidas asociadas.

V1. La interrupción de actividades socioeconómicas podría ocurrir, en todo caso, a nivel de molestia solamente.

V2. Las actividades socioeconómicas se podrían interrumpir significativamente, con interrupciones de algunos servicios básicos durante la duración de la emergencia y con costes incurridos para desvíos, reprogramaciones u otras formas de adaptar otras actividades.

V3. Las actividades socioeconómicas podrían ser interrumpidas seriamente y algunas de las más importantes podrían paralizarse por la duración de la emergencia del movimiento de ladera. Probablemente deberían producirse grandes pérdidas.

V4. Las actividades socioeconómicas serían paralizadas. En consecuencia, las pérdidas serían muy altas. La interrupción podía durar meses o años.

Para determinar la vulnerabilidad usando estas escalas, deben encontrarse los medios para comparar el daño a los edificios, la gente y las actividades. Probablemente es recomendable tomar el peor caso de la distribución de cada una de las tres escalas, ya que éste representa la vulnerabilidad máxima (a las estructuras, a los servicios o al daño a la vida) en cada sitio. La categoría se debe reducir un grado (ejemplo: de V4 a V3) si la pérdida es parcial pero al menos alcanza un 50%, o aumentar un grado si es menor del 50% (tabla 5.4), a menos que el valor intrínseco esté comprometido irremediamente por la pérdida, en cuyo caso se debe tratar como total. Éste será el caso cuando se presume la pérdida de vidas humanas.

Pérdidas = 100 %	100% > Pérdidas > 50 %	100% > Pérdidas > 50 %
V0	V0	V0
V1	V1	V0

Pérdidas = 100 %	100% > Pérdidas > 50 %	100% > Pérdidas > 50 %
V2	V1	V0
V3	V2	V1
V4	V3	V2

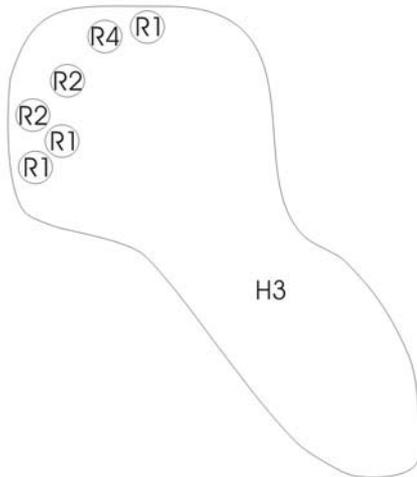
Tabla 5.4 Determinación de las categorías de vulnerabilidad en función de la proporción de pérdidas esperadas (excluyendo la vulnerabilidad a pérdida de vida humana)

Guzzetti y sus colegas (IRPI, 2000) redujeron la definición de elementos en riesgo a diez clases: asentamientos de alta densidad, asentamientos rurales, infraestructuras deportivas, áreas industriales, explotaciones agrícolas animales, minas y escombreras, carreteras principales, carreteras secundarias y locales, líneas ferroviarias, y cementerios. En este contexto es necesario decidir si agrupar los elementos individuales que van a constituir estas categorías (e.g. considerar los asentamientos enteros) o desagregarlos (es decir considerar los asentamientos como los grupos de edificios individuales y estructuras de la vulnerabilidad variada). El primero es un método más rápido, más barato, mientras que el último es decididamente más exacto.

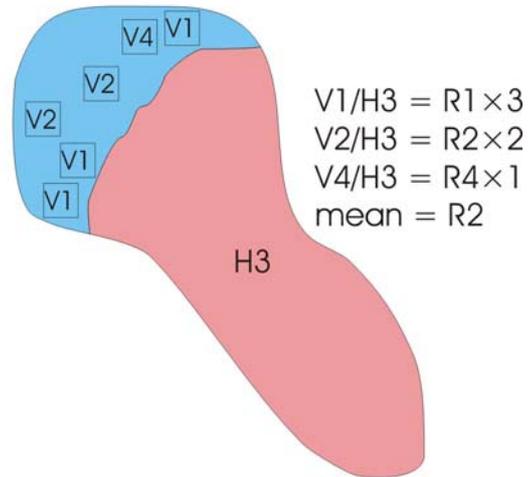
Las determinaciones de la vulnerabilidad hechas con este método se pueden cartografiarse y compararse con determinaciones similares de la peligrosidad para determinar y manejar riesgo, usando $H \times V = R$ o relaciones similares.

Un diagrama de flujo para este proceso se muestra en la figura 9.

Estimación del riesgo por valor individual



Estimación del riesgo por valor sumado



Estimación del riesgo por valor generalizado

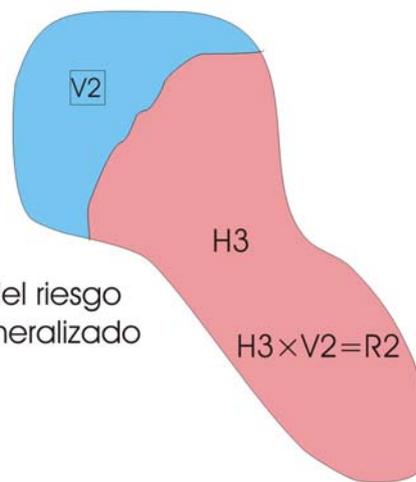


Figura 9. Diagrama de flujo de los pasos a seguir en la estimación del riesgo de movimientos de ladera

4.2.3 Determinación y aplicación desde las ciencias sociales.

Ahondando aún más, la aplicación del concepto de vulnerabilidad a personas o sociedades es más problemática que en el caso de estructuras físicas e infraestructuras. Los impactos en la gente no solo son los muertos y los heridos sino que incluyen todos aquellos efectos más sutiles que a largo plazo conducen a pérdidas de bienestar. Esto no es solamente una medida de la robustez de los humanos en cuanto a la peligrosidad física a la que deben hacer frente. La fragilidad de la gente, junto con cualquier limitación relacionada con falta de protección, habilidad para sobrevivir o capacidad de recuperación, se deben sobretodo a las condiciones sociopolíticas o en palabras de Hewitt (1992) a la "construcción de la vulnerabilidad por la actividad humana". Esta noción se aplica igualmente la creación de las condiciones anteriores al impacto del peligro y a lo que ocurre durante e inmediatamente después de un evento. La potencialidad de ocurrencia de consecuencias adversas asociadas a muchos peligros inducidos (Ej. saqueo, enfermedad) así como a peligros secundarios (Ej. fuego), está generalmente en función de la falta de gestión del riesgo. De igual manera, que la incompetencia en las tareas de búsqueda o rescate de víctimas, la falta de movilización de servicios médicos adecuados, etc, pueden dar lugar a un aumento de las pérdidas en lo que Alexander (2000) llama vulnerabilidad secundaria. Por tanto, la vulnerabilidad humana es un concepto complejo que todavía está refinándose en una profusa y a menudo confusa producción literaria.

Como Hewitt (1997) observa, "la evaluación de la vulnerabilidad está relacionada en esencia con la ecología humana de la peligrosidad". La potencialidad de que las personas sean impactadas por un deslizamiento es función de un gran número de factores, algunos incluyen probabilidad (Ej. exposición temporal), algunos están relacionados con la robustez y resistencia de las persona que se encuentran amenazadas, algunas están relacionadas con las condiciones sociales existentes y otras están relacionadas con la naturaleza y violencia de los movimientos del terreno y los peligros subsecuentes.

Claramente, la edad, el estado de salud, la aptitud y el conocimiento del riesgo son factores importantes. De la misma manera, el estado en la evolución del proceso de movimiento de ladera en el que una persona o personas estén siendo afectadas puede determinar además el desenlace, al igual que la velocidad y la eficiencia en las tareas de búsqueda y rescate. Por último, la suerte juega un papel importante, no solo en la implicación, sino también en la posibilidad de supervivencia o en la limitación de las heridas. Hay numerosos ejemplos casi milagrosos de supervivientes, entre ellos el de un hombre que sobrevivió al flujo deslizante de loess en Salashan, China en Marzo de 1983 (Jones, D.K.C. 1992; Sassa, 1992) aferrándose a un árbol solitario que flotaba verticalmente en una pequeña balsa de terreno de 700 m rodeada de 3 millones de metros cúbicos de loess fluyendo que destruyeron tres pueblos y mataron más de 200 personas.

Desde un punto de vista más amplio, la vulnerabilidad también determina el diferente impacto de los movimientos de ladera en los distintos sectores de la sociedad (Ej. los barrios más pobres y baratos o las chabolas tienden a ser más vulnerables) y la habilidad de una comunidad para resistir y recuperarse del impacto de un movimiento de ladera. La vulnerabilidad social incluye tres factores íntimamente relacionados (Cannon, 1993, Blaikie et al, 1994):

- Resistencia, o habilidad para mantener un sistema y recuperarlo del impacto. Se usa tanto para comunidades como para sistemas económicos o generadores de riqueza presentes en un área. Una economía muy dependiente de un número limitado de vías de transporte o de una industria determinada puede ser muy susceptible a los movimientos de ladera.
- Robustez, o habilidad para responder al amplio espectro de incertidumbres o amenazas físicas actuales. Se aplica a instituciones, organizaciones, comunidades e individuos organizados dentro de un grupo, que son reflejo de fortaleza y vitalidad social y económica. Los seguros por ejemplo pueden hacer que los individuos se recuperen más fácilmente de los daños ocasionados por los eventos.

- Preparación, es un reflejo tanto de la protección brindada a un determinado grupo como de la buena voluntad para actuar en beneficio propio.

Muchos sociólogos y planificadores piensan que la vulnerabilidad de los grupos dentro de una sociedad puede tener mayor importancia que la intensidad a la hora de determinar el impacto de un movimiento de ladera. Un grupo muy vulnerable, como un asentamiento ilegal en una ladera inestable a las afueras de una ciudad, puede ser afectado fácilmente por deslizamientos grandes y rápidos, mientras que grupos de baja vulnerabilidad experimentarán impactos mínimos ante los mismos eventos. Así el número de personas que exhibe determinados niveles de vulnerabilidad, con respecto a movimientos de ladera de una intensidad particular, proporcionará una medida del impacto potencial.

Por tanto **para estimar la vulnerabilidad social se necesita** tratar de obtener algunos o todos estos datos:

- Definir los posibles escenarios en términos de características físicas e intensidad
- estimación de los comportamientos e intensidades de daño / destrucción en edificios e infraestructuras.
- estimación de la probabilidad, naturaleza y severidad de peligros secundarios
- estimaciones del número de personas que se espera se encuentren en el área afectada por el peligro principal y los secundarios, después de la consideración del tiempo y la viabilidad de la alerta y evacuación.
- estimación de las principales características de las personas presentes en el área (edad, sexo, estado de salud, etc.)
- estimación de las tasas de supervivencia en función de naturaleza de la destrucción y la probabilidad de eficiencia en la respuesta de emergencia

Naturalmente existen otros aspectos de vulnerabilidad. La **vulnerabilidad económica**, o la vulnerabilidad de los sistemas económicos, en el sentido de cómo se reduce la actividad económica como consecuencia del impacto de

un peligro de diferente severidad. El daño o destrucción de fábricas, negocios o lugares de producción, pérdidas en las cosechas, interrupción de vías de transporte, o de suministro de energía o de agua o la reducción de la mano de obra disponible son alguno de los factores que tienen consecuencias económicas a corto plazo. En el caso de grandes desastres, las pérdidas pueden quedar reflejadas en términos de cambio en el PIB. Donde el coste de la destrucción o del daño representan una parte importante del PIB, la sobrecarga financiera necesaria para la reconstrucción supondrá un efecto adverso en el comportamiento económico. Los movimientos de ladera difícilmente alcanzan semejantes impactos aunque contribuyen en gran medida en el caso de deslizamientos generados por otros eventos mayores como terremotos. Lo más común es que los efectos de los movimientos de ladera **aumenten los efectos de la marginación económica**. La marginación económica describe la situación en que los ingresos de una actividad económica apenas exceden los costes. La destrucción, daño o interrupción debidos a deslizamientos pueden conducir a un descenso de ingresos y un aumento de costes que combinados pueden hacer inviable e irre recuperable la, de por sí precaria, actividad económica. Ambas consecuencias pueden suponer por tanto un bloqueo para la economía local. Estas consecuencias económicas pueden hacerse mayores con el paso del tiempo después de un evento. Una buena evaluación del riesgo necesita identificar si existe vulnerabilidad económica y la escala y duración de sus consecuencias.

El término **vulnerabilidad medioambiental** se utiliza para designar el grado en que la calidad y el disfrute medioambiental puede verse adversamente afectado como consecuencia del impacto de un evento peligroso. En el caso de los movimientos de ladera habría que identificar un número de aspectos. Primero, los eventos generadores de movimientos de ladera pueden iniciar una erosión futura que provocará una degradación generalizada del suelo. Tales procesos ocurren cuando el terreno es particularmente propenso a cambios seguidos de distorsión (alta sensibilidad) y tiene dificultades para recuperar sus anteriores capacidades (baja elasticidad). Las consecuencias serán pérdidas en los recursos de suelo, fealdad y restricción en los usos del suelo, junto con la posible sedimentación y el aumento de la potencialidad de inundación en otros lugares. Para movimientos de ladera individuales, los impactos están

principalmente relacionados con la aparición lóbulos de derrubios o escarpes que puede percibirse como estéticamente feos, junto con los efectos de carga descarga de sedimentos en torrentes y ríos. Obviamente, el impacto visual disminuirá gradualmente a medida que los procesos geomorfológicos y la vegetación regeneren progresivamente el paisaje, mezclando las marcas del movimiento de ladera con las de sus alrededores, pero este proceso puede durar años o décadas. Medir cada impacto en términos de pérdida de amenidad es extremadamente difícil y se hace generalmente de forma cualitativa, aunque pueden usarse técnicas de evaluación económica (Bateman et al. 2002, DTLR 2002).

Finalmente, está la vulnerabilidad ecológica, que extiende el concepto de **vulnerabilidad a la fauna y a la flora** que serían afectadas adversamente por un cambio en las condiciones medioambientales (fuerte como el calentamiento global o más leve como polución o un movimiento de ladera). Cuando se trata con organismos no humanos en medioambiente, es usual hacer referencia a influencias que distorsionan (stressors) actuando en las unidades espacialmente identificables conocidas como ecosistemas. El concepto de ecosistema tiene una importancia fundamental. Se refiere a las áreas de la superficie de la tierra caracterizadas por la existencia de relaciones funcionales reconocibles y distintivas entre los organismos y entre estos y su entorno físico (Ej. un estanque, un árbol o un arbusto, un meandro de un río, la parte alta de una ladera, etc.). También puede describirse como una comunidad dada que se encuentra dentro de este hábitat. Esta focalización en ecosistemas hace que normalmente el término vulnerabilidad se reemplace normalmente por fragilidad del ecosistema.

Sánchez y Mendoza (2001) realizan una valoración de la vulnerabilidad, analizado el problema desde una perspectiva social y teniendo en cuenta todos los factores que integran la vulnerabilidad total de una determinada comunidad. Estos autores analizan el riesgo por movimientos de terreno en el distrito de Yumbo, sito en las laderas marginales de la ciudad de Cali, Colombia. No se detienen específicamente en la búsqueda de una relación tipo de peligro - intensidad de peligro – daño producido, sino que analizan los

diferentes tipos de vulnerabilidad y su interrelación en la comunidad estudiada aplicando un análisis de **vulnerabilidad global**.

Las variables que los autores tomaron en cuenta para determinar la vulnerabilidad son las siguientes (Ver Fig. 10):

1. **Vulnerabilidad Económica:**

La vulnerabilidad económica se refiere al nivel de exposición de una sociedad o de un grupo, frente a la posibilidad de recuperarse o encarar un desastre de forma tal que pueda garantizar su supervivencia, entendiendo por supervivencia unas condiciones mínimas para una vida digna (Blaikie et al, 1996). Este tipo de vulnerabilidad puede ser considerado a diversas escalas donde se tienen en cuenta el problema de la dependencia económica nacional, la ausencia de adecuados presupuestos, la falta de diversificación de la fase económica, etc. (Lavell, 1996).

Esta vulnerabilidad se evalúa a nivel familiar, dependiendo del nivel de Ingresos Familiares, el cual se ve modificado de una familia a otra por factores como la estabilidad laboral, el grado de educación familiar, el número de personas que trabajan y el número de personas que compone la familia.

En el trabajo de Sánchez y Mendoza (2001) se estimó a partir de entrevistas y de cruzar esta información con el mapa de estratificación económica.

2. **Vulnerabilidad de la Infraestructura Física:**

Se consideran dos niveles: el individual, donde se tiene en cuenta el Tipo de Construcción y el Colectivo: Cobertura y calidad de redes de servicios, distribución de servicios vitales (hospitales, servicios de emergencia, albergues) y las redes de acceso.

a. Vulnerabilidad Técnica Familiar:

Entendida como el nivel de exposición de un grupo familiar por el tipo de construcción de la vivienda donde habita. La vulnerabilidad técnica

se refleja en el tipo de materiales utilizados, la calidad de servicios públicos domiciliarios y la técnica de construcción.

En el caso analizado por Sánchez y Mendoza (2001), en el que la mayoría de las construcciones eran realizadas por los propios habitantes, esta vulnerabilidad es producto de las complejas relaciones entre las condiciones económicas de la familia, del acumulado cultural que posee, de las características topográficas del terreno, de los conocimientos previos sobre construcción y del conocimiento del funcionamiento natural de los eventos. Es decir, este tipo de vulnerabilidad fue en su caso, uno de los más importantes al integrar múltiples aspectos socioculturales, relacionado íntimamente con la vulnerabilidad económica.

b. Vulnerabilidad de la Infraestructura Colectiva:

Bajo este apartado se agrupa el grado de afectación que pueden sufrir las redes de servicios públicos: Luz, red de agua potable, alcantarillado; así como las instalaciones e instituciones sociales denominadas vitales y críticas: hospitales, escuelas, parques y vías de acceso, etc.; que son las que se consideran deben mantenerse en pie durante una emergencia pues pueden servir como albergues provisionales o ayudar a las posibles víctimas en la evacuación y transporte.

En el caso estudiado por Sánchez y Mendoza, al igual que para el caso del tipo de construcción, la calidad y nivel de presencia de las redes de servicios públicos es producto de relaciones complejas entre diferentes elementos del conjunto social: Antigüedad del barrio, tipo de urbanización propuesta, nivel de organización interna del barrio, bien sea para asegurar mecanismos de autoconstrucción de las redes o para ejercer presión para que la Administración las instale o las mejore, incluso depende de las condiciones topográficas del terreno.

i. Vulnerabilidad de las redes de servicios públicos

Se refiere al grado de afectación que puede sufrir estos servicios, al presentarse un evento ligado a la dinámica de laderas. Además de mirar su existencia y localización actual

en las laderas, también se deben evaluar la resistencia y flexibilidad de los materiales, así como su calidad técnica. Normalmente, solo existen registros de su existencia y localización pero no de la resistencia de las redes, por lo tanto las consideraciones de evaluación podrían ser aproximaciones generales hechas a partir de observación de campo.

ii. Vulnerabilidad por Accesibilidad

En este tipo el grado de vulnerabilidad se establece con base en el nivel de acceso de un barrio o un sector de este, dependiendo de la existencia y la calidad de la infraestructura de acceso. Así, si existe una buena red: vías pavimentadas o por lo menos amplias que permitan la rápida afluencia de organismos de socorro o en su defecto, la rápida evacuación de los afectados el nivel de vulnerabilidad es menor.

iii. Vulnerabilidad de los Servicios Vitales

La existencia, localización y calidad de servicios vitales, como centros de salud, de educación y de recreación, es otro aspecto importante para evaluar la vulnerabilidad, ya que al no tener, o no brindar los servicios generales o estar en instalaciones inadecuadas para el buen funcionamiento, la vulnerabilidad puede incrementar. Asimismo, estas instalaciones pueden servir de albergue temporal para las víctimas de un desastre.

3. **Vulnerabilidad Socio-Política:** De acuerdo a Wilches (1993) corresponde al grado de autonomía que tiene una comunidad para autogestionar su desarrollo. Su estimación se hace considerando: el Nivel de Organización y Participación Comunitaria, tanto al interior del barrio, como de su influencia dentro del municipio; el nivel de identidad y pertenencia al lugar y las Prácticas Políticas en el municipio: politiquería, gamonalismo, etc. Dependiendo el grado de participación y organización, la comunidad presenta un mayor o menor nivel de

vulnerabilidad sociopolítica. Este tipo de vulnerabilidad es uno de los más importantes en la definición de vulnerabilidad global, pues contempla el grado de unión, de autonomía y de autogestión de una comunidad y depende del nivel de organización y participación al interior de cada barrio, el grado de representatividad de las Juntas de Acción Comunal, la existencia de grupos sociales (cooperativas, ONGs, etc.) que trabajen en el barrio; también depende del nivel de influencia que alcanza el barrio en las políticas municipales y de las prácticas políticas presentes en el municipio. Para estimar los diferentes grados de este tipo de vulnerabilidad Sánchez y Mendoza hicieron entrevistas y recorridos con habitantes y líderes barriales, que permitieron estimar de forma general esta vulnerabilidad.

4. Vulnerabilidad Institucional:

Esta vulnerabilidad alude al grado de preparación y de idoneidad de las instituciones del municipio (Policía, Protección Civil, Bomberos...). Se tiene en cuenta: la existencia y localización de las entidades que Conforman el Comité Local de Emergencias; la existencia o no de planes específicos para las zonas amenazadas y con población vulnerable y el grado de aprehensión social de las instituciones, entendido como el nivel de aceptación de la gestión de las instituciones.

Las entidades que desarrollen funciones de prevención y rescate gubernamentales o no, son vitales para la población; ya que dada la ocurrencia de un desastre, sin distinción del tipo y de la causa, debe quedar en pie sin alguna afectación que perturbe el buen funcionamiento para poder responder rápidamente a la comunidad. Es decir, las edificaciones de estas entidades deben localizarse en áreas de amenaza nula o baja, ya que sería contradictorio que estas también estuvieran en peligro al igual que la población; también deben situarse en sitios estratégicos para una mayor facilidad de acceso, tanto para ellos, como para la comunidad, en caso de alguna emergencia; su cobertura debe ser equitativa y no restringirse al centro de la ciudad, pues en cualquier tipo de desastre lo apremiante es el tiempo que demoran en acudir para desarrollar actividades de rescate; además hay que tener en cuenta la

construcción de estas edificaciones, pues deben ser óptimas para continuar en pie estando en capacidad de atender de manera inmediata alguna eventualidad después del desastre.

Sin embargo, los principales factores a evaluar en la vulnerabilidad institucional son las formas de ver y concebir que tiene la administración sobre ocupación o utilización de las laderas y las formas en que la comunidad percibe y representa las acciones de las instituciones. La manera como la administración o el gobierno en general toma decisiones sobre el espacio en que vivimos, es a lo que Lefebvre llama las representaciones del espacio, es decir a los espacios concebidos que están derivados de una lógica particular y de saberes técnicos y racionales, que están vinculados con las instituciones del poder dominante (Oslender, 1999). La realización de planes y programas gubernamentales para desarrollar actividades de prevención, contingencia, mitigación y recuperación se hacen en su mayoría en un espacio abstracto, mediante estadísticas, informaciones generalizadas, mapas e intereses particulares, sin tener en cuenta las opiniones o disposiciones de la comunidad a la cual va a implantar determinado proyecto o sin haber realizado un trabajo en campo conjunto con la población para diseñar desde la realidad misma las mejores propuestas que beneficien tanto a la comunidad como al gobierno; "lo que produce una visión normalizada que oscurece luchas, ambigüedades, y otras formas de ver, percibir e imaginar el mundo" (Ibid).

5. Vulnerabilidad Comunitaria por Empatía con la Amenaza:

Se refiere a si existe una coexistencia consciente con la amenaza o no. Para ello, se plantean básicamente dos variables: Conocimiento del funcionamiento natural de los eventos y percepción frente a la amenaza de acuerdo a distancia, memoria histórica, razones para el tipo de construcción. Esta variable exige la adopción de técnicas hermenéuticas, como entrevistas, dentro de las que se analizaron relatos orales de los eventos anteriores e historias de vida.

Thomas y Suavita (2000) proponen la determinación de esta vulnerabilidad a partir de porcentajes de pobladores que conocen y perciben la amenaza en una unidad de estudio, pero para Sánchez y Mendoza esto no

es suficiente y se corre el riesgo de perder calidad en la información y percepción del investigador; por ello no lo estimaron a nivel de barrio en su estudio.

Uno de los principales inconvenientes en la comprensión de los riesgos ha sido la falta de atención sobre las construcciones mentales que hacen los individuos y los grupos sociales sobre los eventos y desastres, en particular y de su entorno, en general. Cada ser humano construye imágenes, símbolos, discursos en torno a los fenómenos que vive. Para el caso de los riesgos, la interpretación que se hace de los desastres así como la percepción de las condiciones de seguridad del lugar que se habita es determinante por cuanto representan en buena parte el éxito o fracaso de políticas tendientes y también permiten entender las formas de organización colectivas que emergen en coyunturas específicas.

a. Conocimiento del Funcionamiento Natural de los Procesos

Esta variable permite mirar cómo varían las interpretaciones sobre los fenómenos que han afectado la vida cotidiana en los lugares amenazados, y así mismo permite establecer un grado de vulnerabilidad de acuerdo con estas interpretaciones. Estas interpretaciones varían de acuerdo con concepciones mitológicas, religiosas, culturales, académicas, entre otras.

Para el caso de Yumbo el conocimiento depende directamente de haber presenciado o haberse visto afectado por un evento anterior (Deslizamientos y Flujos de lodo). Aunque las causas de los deslizamientos involucran condiciones intrínsecas del terreno, cuya acción no es siempre visible, no fue común oír hablar de causas sobrenaturales o divinas, pero tampoco fue común oír a los habitantes expresar que las causas de los deslizamientos eran naturales, sino que estas se remontaban a la mala calidad de las redes de acueducto y alcantarillado, y a la ineficiencia de la administración.

b. Percepción de la Amenaza

Entendida como la coexistencia consciente o no con una amenaza, es decir, si la población reconoce estar amenazada y en qué grado, y si es posible por cuales causas.

El primer factor que influye es el grado de amenaza al que está expuesto el grupo social, es decir, existe un mayor reconocimiento de la amenaza cuando se está en amenaza alta. Un factor que se había supuesto que influía de manera notable era la distancia a los eventos anteriores o potenciales (por ejemplo, la distancia a bloques de piedra que se pueden derrumbar o desprender). Aunque esto es cierto para muchos casos no se puede afirmar que sea una regla. Más bien lo que es claro es que la percepción depende de la existencia directa y palpable de precursores o pequeños eventos, es decir, de desplazamientos de puertas, cercas, etc., de pequeños desprendimientos, entre otros. Es decir, la percepción de que se está amenazado depende de la existencia de hechos que hayan afectado a la familia (Sánchez y Mendoza, 2001).

Vulnerabilidad global

La vulnerabilidad surge como aquel complemento a la amenaza, que permite comprender la "forma como estas afectan a la gente de diversas maneras y con diferente intensidad" (Blaikie et al., 1996) y que tiene origen en procesos socioeconómicos y políticos complejos. La complejidad de las relaciones existentes entre factores económicos, políticos, culturales, históricos hacen de la determinación de la vulnerabilidad una evaluación compleja y arriesgada, que se propone a través del análisis de vulnerabilidades parciales, pues cada una de ellas, se refiere al nivel de preparación de un elemento o factor del sistema social: siendo el reto principal volver a integrar esos factores, esas vulnerabilidades parciales, en una vulnerabilidad global.

Sánchez y Mendoza utilizan la siguiente metodología para la determinación de la vulnerabilidad global: como lo sugieren Thomas y Suavita (2000), la determinación se realiza a partir de la combinación ponderada de cada vulnerabilidad, a nivel de la unidad básica de análisis. Es decir, cada factor tiene un peso relativo, identificando indicadores de vulnerabilidad más

importantes que otros. La determinación de cuáles son los factores más importantes en la determinación global de la vulnerabilidad es un ejercicio basado en el conocimiento adquirido en el campo, pero no por ello se altera la base metodológica propuesta. La determinación de la vulnerabilidad global se realiza mediante una matriz simple, donde se le asigna un peso relativo a cada tipo de vulnerabilidad parcial y finalmente se obtiene un índice aproximado de vulnerabilidad global.

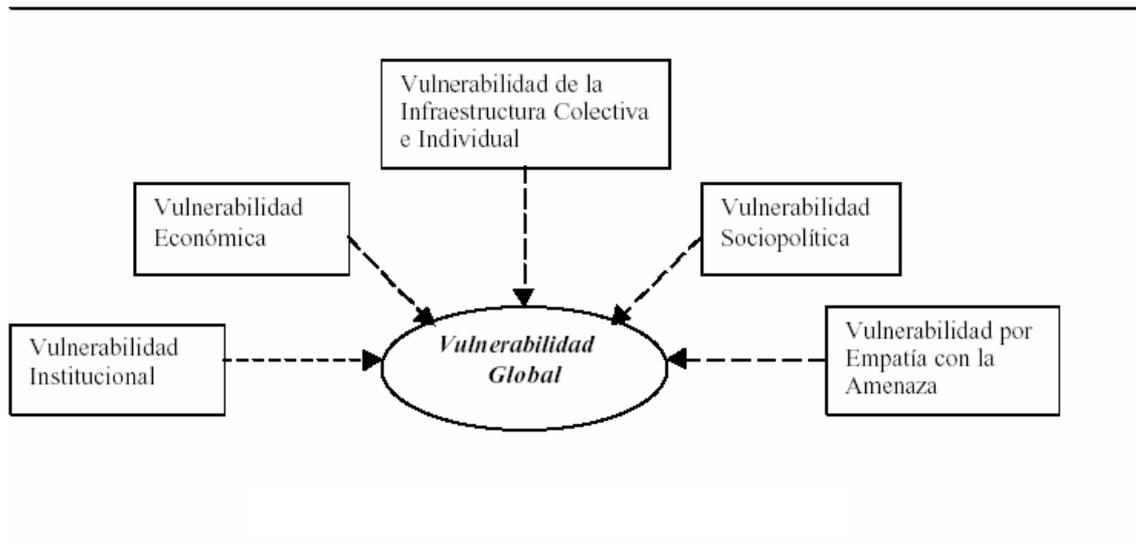


Figura 10. Elementos para determinar la Vulnerabilidad.

Como se mencionó, la integración de estas vulnerabilidades en un grado único de vulnerabilidad es un reto y debe considerarse en este caso como una propuesta metodológica de carácter general ante la inexistencia de metodologías que expliciten la forma de determinar la vulnerabilidad. Para Sánchez y Mendoza, los factores más importantes en Yumbo fueron la vulnerabilidad técnica familiar, la vulnerabilidad sociopolítica y los dos indicadores de la vulnerabilidad por empatía con la amenaza. La vulnerabilidad técnica familiar, como se anotó es un producto de relaciones entre múltiples factores: tiempo de permanencia en el barrio, nivel de ingresos familiares, conocimiento de los eventos naturales, las condiciones topográficas y los conocimientos previos sobre construcción; por ello, se la considera como la variable más importante para la determinación de la vulnerabilidad global. La importancia de la vulnerabilidad sociopolítica radica en que presenta (de manera aproximada) el grado de cohesión interna del barrio, determinante para las implicaciones políticas que condicionan la gestión del riesgo.

Finalmente y aunque se evaluaron a nivel de barrio, el conocimiento del funcionamiento Natural de los eventos y la Percepción de la Amenaza, son los otros dos elementos que integran el conjunto de variables más importantes, representando elementos intangibles de las relaciones sociales y sionaturales.

. Determinación de la Vulnerabilidad Global por Barrios

BARRIO	Técnica Familiar	Sociopolítica	Conoc. Funcio. Nat.	Percepción	Económica	Serv. Vitales	Serv. Públicos	Accesibilidad	Institucional	GLOBAL
Bellavista	M	M	n.e.	n.e.	A	A	M	B	A	M
Nuevo Horizonte	M	A	n.e.	n.e.	A	A	M	B	A	MA
Las Cruces	M	M	n.e.	n.e.	A	M	M	B	A	M
San Fernando	M	M	n.e.	n.e.	A	M	M	B	A	M
Buenos Aires	M	M	n.e.	n.e.	A	M	M	M	A	M
Juan Pablo II	A	A	n.e.	n.e.	A	A	A	A	A	A
Puerto Isaacs	A	A	n.e.	n.e.	A	M	A	A	A	A
Las Américas	B	M	n.e.	n.e.	A	M	B	B	A	B
San Jorge Alto	A	B	n.e.	n.e.	A	A	A	M	A	MA
Panorama	A	B	n.e.	n.e.	A	A	A	M	A	MA
Corvivalle	B	M	n.e.	n.e.	M	B	B	B	A	B
Invivumbo San Jorge	M	A	n.e.	n.e.	A	A	B	B	A	MA

A: Alta; MA: Media-Alta; M: Media; B: Baja; n.e: no evaluado.

El siguiente cuadro muestra los valores obtenidos para cada barrio por cada factor de vulnerabilidad. El valor sugerido para cada factor se multiplica por (3) si el barrio posee alta vulnerabilidad por ese factor, por (2) si es media y por (1) si es baja. Sánchez y Mendoza (2001)

Matriz de Asignación de Pesos Relativos.

BARRIO	TIPO DE VULNERABILIDAD							
	Técnica Familiar	Sociopolítica	Económica	Serv. Vitales	Serv. Públicos	Accesibilidad	Institucional	GLOBAL
Valor Sugerido	7	6	5	4	3	2	1	
Bellavista	14	12	15	12	6	2	3	64
Nuevo Horizonte	14	18	15	12	6	2	3	70
Las Cruces	14	12	15	8	6	2	3	60
San Fernando	14	12	15	8	6	2	3	60
Buenos Aires	14	12	15	8	6	4	3	62
Juan Pablo II	21	18	15	12	9	6	3	84
Puerto Isaacs	21	18	15	8	9	6	3	80
Las Américas	7	12	15	8	3	2	3	50
San Jorge Alto	21	6	15	12	9	4	3	70
Panorama	21	6	15	12	9	4	3	70
Corvivalle	7	12	10	4	3	2	3	41
Inviyumbo Sn Jorge	14	18	15	12	3	2	3	67

Los grados de Vulnerabilidad fueron determinados según la siguiente escala:

Entre 28-50:	Bajo
Entre 51-66:	Medio
Entre 67-74:	Medio Alto
Entre 75-84:	Alto.

El resultado obtenido es una valoración relativa del grado de vulnerabilidad de cada barrio que siendo representada cartográficamente y puede ser superpuesta al mapa de amenaza o peligrosidad para la obtención de un mapa de riesgo. Por ello metodológicamente, la superposición de los mapas de amenaza y vulnerabilidad es la herramienta fundamental para llegar al mapa de riesgos. Operacionalmente, se puede realizar utilizando la herramienta SIG. Sin embargo, debe quedar claro que la superposición no es un proceso meramente técnico, sino que es sobre todo conceptual, donde el investigador conoce los resultados esperados y sabe las categorías de riesgo que va a establecer; entonces el SIG actúa como un facilitador y optimizador de esta tarea.

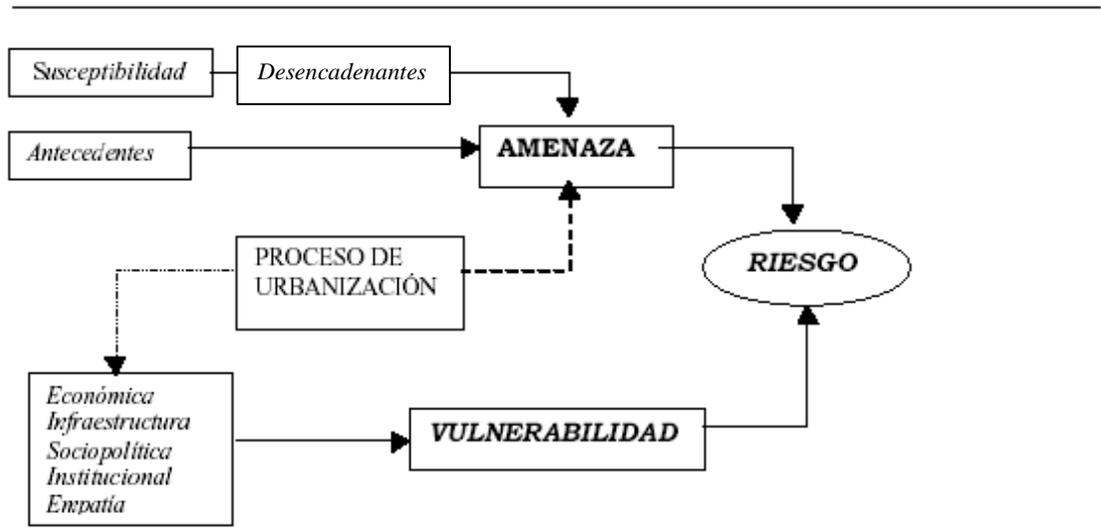


Fig. 6 Metodología General

4.3 Vulnerabilidad a los movimientos de ladera en el periodo 1993-2002

Para investigar la vulnerabilidad los movimientos de ladera en el contexto de una secuencia de acontecimientos reales, la recopilación siguiente se centrará en el período comprendido entre agosto de 1993 y Mayo de 2002, para el cual está disponible una información comprensible. Durante este período Alexander ha recopilado informes de situación y noticias relacionadas con desastres naturales, entre los cuales en cerca de 350 los daños o las muertes han sido causados por los movimientos de ladera. Este conjunto de datos, que incluye 8,75 años de recopilación continua de material de informes y de noticias del servicio de bomberos, de informes de ONG'S, de informes de situación de agencias de la ONU e informes de campo de los profesionales del desastre que incluyen eventos naturales peligrosos que han producido daños. Los datos , que son de alcance mundial, se han verificado de forma cruzada y se ha verificado tanto como ha sido posible las referencias a los artículos de prensa y a otras fuentes académicas. El resultado es razonablemente comprensivo, pero tiene las desventajas siguientes:

- No todos los acontecimientos significativos de movimientos de ladera se divulgaron internacionalmente en los medios de comunicación y en las agencias de la ayuda. Se produce un indudable y significativo silencio informativo del daño y de las muertes ocurridos. De hecho, se constata que la información sobre impactos por movimientos de ladera se publica sistemáticamente incluso menos que la de otras formas de riesgos naturales, tales como inundaciones, erupciones volcánicas y terremotos.
- No se desprende ninguna definición clara en cuanto al umbral más bajo de daño y perturbación que anime a los medios y a las agencias a divulgar un evento. Además, aquí no se hace ninguna distinción entre un desastre y un mero incidente: todos los acontecimientos que fueron divulgados durante el período del estudio se han analizado de igual manera.

- La elección de una fecha de comienzo fue algo arbitraria y la fecha del conclusión es simplemente el último acontecimiento pasado que se divulgó a la hora de escribir este capítulo. No está claro si el periodo en cuestión es representativo de las condiciones con respecto a cualquier otro intervalo comparable de la historia reciente, especialmente porque el impacto de los desastres naturales tiende para ser muy desigual en el tiempo.
- los desastres por movimientos de ladera no están siendo solo silenciados informativamente, también tienden ser descritos sin distinguirlos de las inundaciones, de los terremotos o de las erupciones volcánicas que los causaron. Por tanto, es necesario distinguir particularmente entre las muertes, lesiones y efectos y que son resultado del impacto de los movimientos de ladera indudablemente de aquellos cuyos efectos se deban a inundaciones o a otros agentes desencadenantes.

Sin embargo, se hicieron todos los esfuerzos posibles para recopilar un conjunto de datos exhaustivo, y el resultado fue una imagen detallada de los impactos de movimientos de ladera, e implícitamente de los patrones humanos de vulnerabilidad que les dieron lugar (por ejemplo de los aspectos de la vulnerabilidad que, obrando recíprocamente con peligros, facilitaron el desastre), durante el período de estudio. No obstante, la estadística que se presenta más adelante debe considerarse como valores mínimos, ya que probablemente no se denunciaron otros tantos incidentes, muertes y daños.

Un solo acontecimiento, las inundaciones y los flujos de derrubios ocurridos el 16 de diciembre de 1999 en el estado de Vargas, Venezuela, domina el cuadro hasta tal punto que el coste de vidas, aproximadamente 30.000, es tres veces más alto que el del resto de los acontecimientos de la lista en su conjunto. Sin embargo, a pesar del importante efecto de sesgo de esta catástrofe, son evidentes muchas tendencias.

Según lo divulgado en la literatura de peligrosidad existen variaciones significativas entre los números medios de muertes en desastres producidos por los movimientos de ladera. El Centro para la Investigación sobre la

Epidemiología de Desastres la Universidad de Lovaina (CREDUL) publicó la cifra de 790 muertos al año en todo el mundo durante el último cuarto del siglo XX, aumentando a 955 durante la última década, 1991-2000 (ICRCRCS, 2001). Alexander (1989) divulgó un valor levemente más bajo para el periodo entre los años 60 y los 80. Los desastres por movimientos de ladera incluyen cerca del 4,4% de las muertes producidas en todos los desastres naturales, aunque en ciertos años se alcanzó casi el doble eso, o por encima de la media de muertes por movimientos de ladera, o por debajo de la media de muertes en otros tipos de desastre. Los datos actuales (tablas 5.2 y 5.3) presentan valores de 716 a 5.443 muertes por año, dependiendo de los criterios usados para sumarlos y hacer un promedio, si se tiene en cuenta o no el evento de 1999 en Venezuela, y qué proporción de muertes relacionadas con inundaciones está directamente causada por movimientos de ladera.

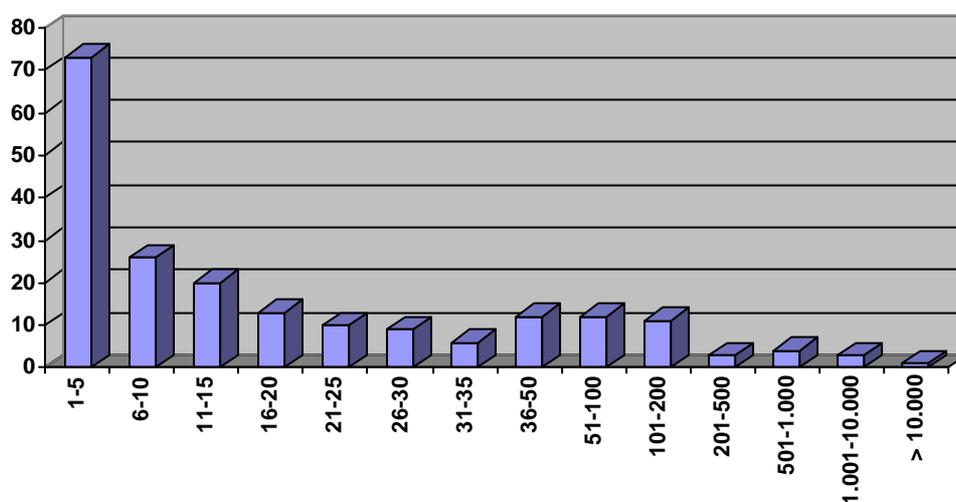


Figura 11 Relación magnitud-frecuencia del número de muertes por evento de movimiento de ladera, para el periodo agosto, 1993-Mayo, 2002 (eje de x: número de muertes por evento, eje de y: número de eventos).

Al margen de si se tiene en cuenta el evento de Venezuela, América Latina ocupa el triste primer lugar en muertes producidas por movimientos de ladera, seguida por el Centro-este de Asia (tabla 5.2). Como demuestra la tabla 5.3, hay dos tipos de países que son particularmente susceptibles a los desastres: las naciones tropicales afectadas por tormentas de grandes huracanes o por

las lluvias torrenciales del monzón; y aquellos países que tienen sismicidad asociada a orógenos activos. Venezuela y de China entran en ambas categorías. Por lo tanto, la vulnerabilidad alcanza su pico, y los desastres por movimientos de ladera son los más recurrentes, en las áreas donde existen altas las densidades demográficas y la inestabilidad de laderas se provoca por lluvia torrencial, condiciones de inundación, sacudidas de terremotos o volcanismo. La inmensa mayoría de las muertes se debieron a flujos de derrubios y flujos de barro. Otros fenómenos menos comunes de desastre fueron los deslizamientos, las avalanchas de derrubios y las caídas de rocas. Los eventos de movimiento de ladera que implicaron un daño alto fueron causados principalmente por precipitaciones intensas y prolongadas, en muchos casos asociadas a tormentas tropicales y acompañado generalmente de inundaciones. Los terremotos y la actividad volcánica fueron fuentes mucho menos frecuentes y por supuesto estuvieron limitadas a determinadas áreas del mundo. Las muertes por eventos de movimientos de ladera en general fueron pequeñas. Como se muestra en la clásica relación entre magnitud y frecuencia de los peligros naturales: la mitad de los acontecimientos mortales en el conjunto de datos implicaron menos de diez muertes, dos tercios, 20 o menos, y el 90% menos de 100 muertes. Solamente tres acontecimientos que ocurrieron durante el período del estudio de 8,75 años implicaron más de 1.000 muertes (cuadro 5.6).

Región	Sub-región	Número de eventos	Número total de muertos atribuidos directamente a movimientos de ladera	Número total de muertos atribuidos a movimientos con otros eventos	Número de eventos sin noticia de muertes
África		7	237	40	1
	Norte	2	40	40	-
	Central	3	20	-	1
	Sur	2	177	-	-
América		126	36.263	538	45
	Norte	30	19	2	24
	Caribe	10	787	132	2

	Central	21	3.214	264	6
	Sur	65	32.243	140	13
		153	3.682	6.271	38
Asia	Sur	35	1.362	2.409	5
	Centro-este	75	1.710	1.651	25
	Sureste	43	610	2.211	8
		11	121	-	4
Oceanía	Australia y Nueva Zelanda	3	19	-	1
	Islas del Pacífico	8	102	-	3
		50	337	71	26
Europa	Este	13	39		10
	Oeste	37	298		16
Medio Oriente		5	62		2
TOTALES		352	40.702	6.920	116

Tabla 5.2 Agrupación regional de los desastres por movimientos de ladera, en el periodo Agosto de 1993 a Mayo de 2002 (Alexander, 2003)

Eventos de movimientos de ladera que han causado muertos o daños importantes durante el periodo Agosto 1993-Mayo 2002 (Alexander 2003).

Ranking	País	Número de eventos	Número total de muertos atribuidos directamente a movimientos de ladera	Número total de muertos atribuidos a movimientos con otros eventos	Número de eventos sin noticia de muertes
1	Venezuela	7	30.218	-	2
2	Nicaragua	1	2.200	-	-
3	Colombia	15	1.438	-	1
4	China	19	1.173	1.544	2
5	Haití	2	777	-	-
6	El Salvador	3	712	-	1
7	India	17	624	2.150	3
8	Perú	11	356	-	4

9	México	11	276	202	4
10	Filipinas	25	256	894	2
11	Indonesia	11	226	1.225	5
12	Nepal	4	203	-	-
13	Italia	11	169	59	3
14	Mozambique	1	169	-	-
15	Afganistán	4	154	200	1
16	Japón	25	119	10	8
17	Taiwán	19	119	86	10
18	Brasil	13	118	88	-
19	Tayikistán	1	100	-	-
20	Malasia	4	98	-	-
21	España	3	77	6	-
22	Papua Nueva Guinea	3	70	-	1
23	Ecuador	8	68	52	-
24	Pakistán	3	65	-	1
25	Tibet	1	53	-	-
26	Kirguizistán	1	51	-	-
27	Sri Lanka	1	50	-	-
28	Irán	1	50	-	-
29	Bhután	1	50	-	-
30	Bolivia	2	41	-	-
31	Etiopía	1	40	-	-
32	Corea del Sur	6	36	11	1
33	Tailandia	3	30	20	-
34	Portugal (azores)	1	29	-	-
35	Rusia	3	24	-	1
36	Kenia	1	20	-	-
37	Australia	2	19	-	-
38	Estados Unidos	36	17	2	17
	Otros	71	407	371	37
	TOTAL	352	40.702	6.920	104

El conocimiento es la llave para evitar la amenaza de muerte planteada por los movimientos de ladera. La mayoría de la gente implicada en las muertes, juzgando por la carencia de una evacuación previa, era inconsciente del peligro que corría cuando el evento ocurrió. La evacuación generalmente es uno de los mejores medios para evitar el peligro inminente pero solo se puede realizar si hay conocimiento y preparación suficientes. Una de las causas más significativas de mortalidad en esta categoría es el desarrollo de flujos de derrubios rápidos que golpean y derriban viviendas por la noche mientras sus inquilinos están dormidos. Otro ejemplo, con una mortandad menos cuantiosa pero no menos significativa, ocurre en las vías de comunicación por el arrastre y enterramiento de coches, autobuses, vehículos de mercancías, etc... alcanzados por flujos de barro o, menos comúnmente, cuando son machacados por desprendimientos de rocas.

Durante el período de estudio ocurrieron cuatro ejemplos de desastre por movimientos de ladera en terrenos volcánicos. Ninguno de ellos tubo una conexión directa con una erupción, pero tres dieron lugar a lahares secundarios, es decir, a flujos de derrubios y/o barro volcánico que ocurren durante un período de inactividad volcánica. Popocatepetl en México y Pinatubo en Filipinas son edificios volcánicos que generan lahares con frecuencia, muchos de los cuales son muy destructivos. Sin embargo, el derrumbamiento de una pared del lago del cráter en el volcán Casita en Nicaragua, que siguió a las lluvias torrenciales causadas por el Huracán Mitch en octubre de 1998, generó un lahar que sepultó a 2.200 personas en la base de la montaña. En contraposición, la mayoría de los movimientos causados por lluvias intensas en Papua-Nueva Guinea fueron el resultado de una saturación general de los suelos volcánicos, lo que condujo a la aparición de deslizamientos y flujos de derrubios muy extensos.

Como se sabe bien los refugios precarios, que construyen los habitantes más pobres de la ciudad en laderas peri-urbanas escarpadas, son particularmente vulnerables a ser arrastrados por movimientos de ladera: deslizamientos y caídas de rocas durante los terremotos o flujos de derrubios y flujos de barro causados por tormentas y precipitaciones intensas. Durante el período de

estudio, fueron devastadas "favelas" en el estado de Sao Paulo en Brasil, y "barrios" en el estado de Vargas en Venezuela, así como en Haití. Aunque en el caso brasileño las muertes fueron limitadas, en Haití murieron 750 personas (durante la tormenta tropical Gordon en noviembre de 1994) y en Venezuela (diciembre de 1999) una proporción importante de las 30.000 muertes estimadas ocurrió en los tugurios de los más pobres (ICRCRCS, 2001: 83). Este evento venezolano siguió a un episodio anterior, fechado en agosto de 1993, en el que flujos de derrubios irrumpieron en dos barrios de Caracas causando la muerte de 100 personas.

Los terremotos desencadenaron al menos 34 eventos del movimiento de laderas. Las magnitudes variaron entre 4,3 y 7,6 y el efecto divulgado más común fue la obstrucción de caminos, que causó accidentes de tráfico y obstaculizó las acciones de socorro. Aunque el número de movimientos de ladera causados fue muy alto, lo que generalmente implicaba un gran catálogo de roturas en laderas, la mayoría de los 34 eventos no ocasionaron muchos muertos directamente relacionados con los movimientos de ladera. Hubo tres excepciones: el acontecimiento de magnitud 6,4 que ocurrió en Colombia en junio de 1994, en el que los movimientos enterraron varias aldeas y mataron a 1.109 personas; el evento de magnitud 7,6 ocurrido en El Salvador en enero de 2001 que produjo un deslizamiento que mató a 700 residentes del barrio de Las Colinas; y el acontecimiento de la magnitud 7,2 ocurrido en marzo de 2002 en Afganistán, en por el cual murieron 150 personas alcanzadas por caídas de roca y otros movimientos. América Central y el Hindu Kush tienen los historiales más amplios de devastación mortal por movimientos de ladera de origen sísmico.

Los huracanes (ciclones tropicales y tifones) provocaron casi 50 eventos de movimientos de ladera. 36 de ellos en Asia. Los países más afectados fueron las Islas Filipinas (que sufren un promedio de 22 tifones al año), Taiwán, Japón, la costa meridional de China (incluyendo Hong-Kong) y Corea del Sur. Los terrenos tectónicamente activos del archipiélago japonés estaban particularmente en riesgo, pero las laderas deforestadas de Filipinas exhibieron la vulnerabilidad más grande, especialmente a los flujos de derrubios, muchos de los cuales estuvieron asociados a "inundaciones relámpago" ocurridas

durante o poco después del paso de los huracanes. Igualmente ocurre en América Central (Honduras, Nicaragua, El Salvador, México, etc.) donde, por ejemplo, en el Huracán Mitch en octubre de 1998, causó un número enorme de flujos de derrubios en laderas desnudas y desprotegidas. Aunque no se sabe cuántas de las 7.000 víctimas totales reportadas tras el Mitch se debieron a movimientos de ladera, en las Filipinas, el tifón Babs, contemporáneo al Mitch, mató más de 200 personas atrapadas en flujos de derrubios, incluyendo 36 en un solo evento. Un ejemplo típico es el tifón Danas que en septiembre de 2001 provocó 83 derrumbamientos en Japón. No obstante, una buena mitigación del riesgo, mediante sistemas de gestión de alerta y emergencia en este y otros 13 tifones similares han reducido al mínimo las muertes causadas por movimientos de ladera en este país. Igualmente ocurre en Hong Kong, donde solo murieron dos personas tras los seis tifones que dieron lugar a movimientos de ladera durante el período de estudio. El riesgo de muerte por movimientos de ladera desencadenados por ciclones tropicales que afectaron a islas oceánicas a también fue limitado. Aunque en el huracán Georges en septiembre de 1998 mató a 140 personas en tres países del Caribe. La mayoría de ellos murieron en Haití, donde la deforestación persistente había predispuesto la tierra para ocurrieran flujos de derrubios.

Las lecciones de estos eventos están claras. Independiente del nivel de peligrosidad, el nivel de muerte y destrucción es mucho mayor en comunidades pobres y desprotegidas que en áreas bien financiadas, con herramientas de mitigación y un estado de preparación tecnológicamente avanzados. La pobreza no es exactamente sinónima de vulnerabilidad, pero está tan cerca que se confunde (Cannon 1994). Así aunque exista la amenaza de peligros muy serios de movimientos de ladera en áreas densamente pobladas de Japón y Hong-Kong, no se alcanzará la devastación y la pérdida de vidas que ocurren generalmente en Venezuela, Brasil o Nicaragua. **De este modo, se concluye que en el caso de los movimientos de ladera en relación a otros peligros naturales, el riesgo está más determinado por la vulnerabilidad que por la peligrosidad** (Hewitt, 1983).

5 Aplicación de la caracterización de la vulnerabilidad por movimientos de ladera: La estimación de consecuencias adversas.

5.1 Introducción

¿Que podría pasar si ocurre un movimiento de ladera? Es una pregunta crucial para la determinación del riesgo. Su respuesta requiere que de alguna forma se haga una valoración de las consecuencias que se esperan estimando los daños y las pérdidas probables que deberían esperarse. La naturaleza de estos perjuicios es muy variada:

Hewitt (1997) sugiere cuatro grandes grupos de perjuicios (*detriment*):

- muertos, heridos y personas desalojadas
- destrucción de la propiedad, recursos y herencias
- interrupción de actividades, y negación de fuentes y servicios
- violaciones éticas, espirituales y culturales.

De todos los movimientos de ladera que ocurren en la naturaleza tan solo un porcentaje causan perjuicios bien a corto o a largo plazo en las áreas a las que afectan directamente, pero también causan perjuicios en actividades, servicios, etc.. que son más difíciles de identificar y cuantificar.

Desde una perspectiva de escala y complejidad de los perjuicios que generan, se pueden distinguir varias clases en eventos de deslizamiento que incluyen:

- *Eventos simples*: aquellos que causan perjuicio como una consecuencia directa de un movimiento simple o repetido. Por ejemplo una rotura rotacional o un deslizamiento de tierras determinado.
- *Eventos compuestos*: que causan perjuicio directo donde el evento se manifiesta en una serie continúa de movimientos de diferente tipología (caídas, flujos y deslizamientos) que, si se dan condiciones las

favorables, pueden alcanzar grandes tamaños, velocidades y violencia. Un ejemplo sería la avalancha de roca y hielo del nevado de Huascarán que destruyó la ciudad de Yungay en Perú, matando entre 15 y 20 mil personas (Plafker and Ericksen, 1978).

- *Eventos múltiples:* eventos que dan lugar a un gran número de movimientos en áreas extensas con perjuicios considerables. Este tipo de eventos suele estar relacionado con la ocurrencia de terremotos, tormentas intensas, erupciones volcánicas y deforestación. Por ejemplo el huracán Mitch que afectó durante 6 días a Centro América en Octubre de 1998.
- *Eventos complejos:* en los que una parte importante del daño total está causado por la generación de peligros secundarios subsecuentes, tales como inundaciones, tsunamis o erupciones volcánicas. Por ejemplo, el colapso del flanco norte del volcán Mount St Helens, en el estado de Washington USA, que el 18 de Mayo de 1980 fue afectado por un importante terremoto de $M=5,1$. El inmenso deslizamiento puso al descubierto el magma rico en gases que había sido emplazado en el edificio volcánico durante meses. La descompresión dio lugar a que el magma explotara y se disgregara formando una nube de gas y material volcánico que corrió ladera abajo a una velocidad entre 300 y 500 Km/h. Este flujo junto con la explosión aérea esparcieron cenizas y productos volcánicos sobre unos 600 Km² de terreno en 2 minutos

La magnitud de los movimientos no determina en si misma su potencialidad de causar daño; algunas roturas grandes prácticamente no producen consecuencias adversas. La naturaleza de las consecuencias será un reflejo del enorme espectro de la peligrosidad potencial (debido a factores como la tipología, magnitud, tiempo de ocurrencia y localización de los eventos de movimiento) que interactúa con una determinada distribución de personas, bienes, actividades y valores medioambientales y humanos que son espacialmente variables y muestran diferentes grados de susceptibilidad y vulnerabilidad al impacto de los procesos de movimiento de laderas. Esto podría llamarse "exposición potencial" que incluye tanto los objetos estáticos como la pérdida potencial durante accidentes sincronizados, o

“vulnerabilidad espacio-temporal” que relaciona los bienes presentes en un lugar y en un tiempo equivocados.

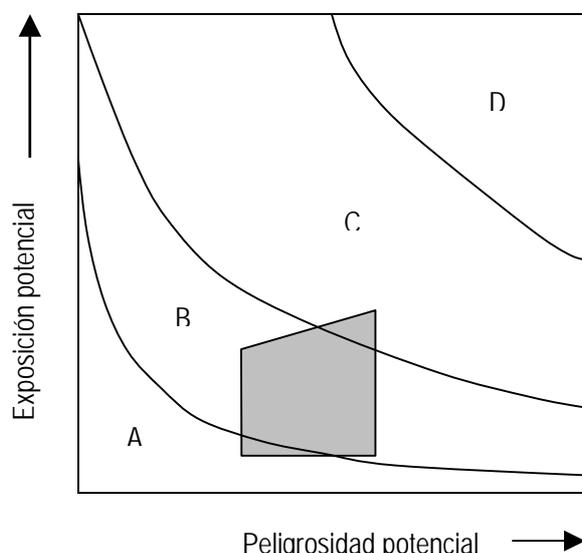


Figura 12

Categoría A: los deslizamientos que, debido a su pequeño tamaño o a su localización, dan como resultado impactos pequeños o inexistentes desde una perspectiva humana y presentan por tanto riesgo bajo o eventualmente riesgo nulo

Categoría B: los movimientos que pueden tener cualquier tamaño, cuyo resultado son pérdidas e impactos significativos.

Categoría C: los movimientos cuyos resultados son grandes impactos, algunos de ellos tratados como desastres por los medios de comunicación.

Categoría D: los movimientos cuyo resultado son impactos severos, a veces la destrucción total de las zonas afectadas, son los eventos que tienden a describirse como un gran desastre, mega-desastre, calamidad o catástrofe por los medios de comunicación, así como por algunos sectores de la literatura académica.

Aunque una *catástrofe potencial* tienda a asociarse con eventos de magnitud alta y frecuencia baja (eventos raros), esta podría ser el producto de movimientos pequeños que afecten a comunidades o lugares especialmente vulnerables, o que ocurran durante accidentes especialmente sincronizados.

La estimación de las consecuencias ha de ser diferente en cada caso. Sin embargo, el principio básico de la evaluación de consecuencias es el desarrollo de *modelos de consecuencias* o *escenarios* para intentar definir y cuantificar los posibles resultados adversos. En todo caso las cuestiones claves que se deberían considerar son:

- ¿**Que o quien** es susceptible de ser impactado?

- ¿**Cuándo** será impactado?
- ¿**Cuál es la probabilidad** de que un evento de movimiento de ladera llegue a producir *peligros inducidos* como accidentes o fuegos que generen pérdidas significativas?
- ¿Cuántas consecuencias adversas **pueden valorarse**?

Muchas evaluaciones de consecuencias incluyen una serie de escenarios que presentan un rango de magnitudes de movimientos (Peligrosidad potencial) e impactos posibles (Exposición potencial). El área sombreada en la figura 12 ilustra el rango de las situaciones posibles con respecto a una hipotética evaluación de riesgo de movimiento. Muestra que aunque la mayoría de los escenarios probables los encontremos con variaciones dentro de la categoría B, son posibles tanto un escenario mejor, que sería un resultado dentro de la categoría A, como el caso peor, asociado con la categoría C, que mostraría un nivel de daño mucho mayor.

5.2 Uso de datos históricos

El desarrollo de los modelos de consecuencias y los escenarios debe apoyarse solidamente en la recopilación de sucesos históricos de movimientos de ladera e impactos asociados con objeto de encontrar un rango de analogías adecuadas. Los ingredientes necesarios para el desarrollar evaluaciones de consecuencias realistas son: conocer **como ocurren** los movimientos en situaciones similares en otros lugares, saber **como impactan** en las sociedades a las que afectan, y averiguar **como se han calculado los costes**.

El uso de ejemplos locales es muy importante. Debido a que el carácter y el comportamiento de los movimientos varía a lo largo del planeta ya que el comportamiento tectónico, la estructura geológica y el régimen climático son diferentes y característicos en cada región. De manera que debería establecerse la aplicabilidad o no de los registros de eventos de movimientos pasados.

Los datos históricos proporcionan una orientación de qué podría pasar y de las características de magnitud-frecuencia de las pérdidas. Contienen descripciones y estudios sobre lo que ocurre *actualmente* en eventos concretos junto con estimaciones de pérdidas. Es necesario decir que muchas

veces y por muy diversas razones estos datos históricos son de calidad muy dudosa. Se reconoce que los datos globales sobre peligros geológicos son tanto incompletos como irreales, especialmente antes del siglo 20 donde muchos eventos grandes no se catalogaron por motivos políticos o de lejanía.

La situación actual ha mejorado, sobre todo a partir de la declaración de la Década Internacional para la Reducción de desastres Naturales (IDNDR) entre 1990 y 2000. Con el establecimiento de instituciones dedicadas a la recopilación de información de desastres actuales como el Centro para la investigación de epidemiología y desastres (CRED) de la Universidad de Lovaina en Bélgica y La Federación Internacional de la Cruz Roja y la Media Luna Roja (IFRCRCS), con sus informes anuales sobre desastres. También han contribuido las empresas de seguros como las mayores compañías del mundo en reaseguros, la Munchen Re y la Swiss Re.

Por otro lado, como los deslizamientos son un fenómeno que se desarrolla de forma más grave en terrenos montañosos afectados por actividad sísmica o eventos de lluvias intensas, estos aparecen como peligros menores o secundarios. Esto hace dudar que el significado actual de los deslizamientos como peligro sea subestimado en los registros, sobre todo en los últimos 50 años.

De hecho los deslizamientos generalizados son normalmente consecuencia de otros peligros geológicos más evidentes como huracanes y ciclones, erupciones volcánicas y terremotos. Entre estos, los movimientos desencadenados por actividad sísmica son los que más daños producen, por ejemplo: el terremoto de Assan de 1950 produjo un desplazamiento total de materiales de 50.000 Mm³ (Kingdon-Ward, 1952, 1955), mientras que el terremoto de la ciudad de Guatemala de 1976 (M=7,5) causó cerca de 10.000 deslizamientos de unos 15.000 m³ y 11 de 100.000 m³ (Harp et al., 1981).

Igualmente, la recopilación espacial (geográfica) de datos es extremadamente variable y generalmente de media a baja calidad. Existe más información y mejor conservada en los países desarrollados, pero no en todos y esta información suele referirse a los eventos más significativos debido a la dependencia de los medios de comunicación como fuente de datos. Los

medios tienden a informar de los eventos que causan daños sociales en ámbitos cercanos y relevantes. Normalmente las tendencias observadas están predispuestas hacia los eventos mayores y más importantes, mientras que las consecuencias de los llamados "eventos triviales" no son informadas ni recopiladas.

La importancia de los movimientos de ladera continua indudablemente infravalorada y continuará estándolo a pesar de publicaciones en revistas de ámbito local y regional (Brabb and Harrod, 1989). No obstante existen numerosos casos históricos bien documentados que demuestran como el impacto de los principales peligros geológicos, entre los que se encuentran los deslizamientos catastróficos, pueden dar lugar a una enorme variedad de daños o perjuicios. Se producen muertos y heridos, los edificios y la propiedad pueden dañarse o destruirse, los servicios se interrumpen, la "vida normal" se trastorna y los supervivientes pueden padecer hambre, desprotección y desesperación.

En la mayoría de los grandes eventos se producen una serie de secuencias de accidentes individuales que dan lugar a una cascada de perjuicios que pueden perdurar durante años, esto hace que las previsiones de futuro solo puedan hacerse en un intervalo de tiempo que generalmente es indeterminado. Así las valoraciones de consecuencias, por necesidad, son cada vez más pragmáticas y generalistas (de brocha gorda) con lo que se sobre-valora la extensión de los impactos imaginables. Solo es posible una aproximación al problema más certera y detallada cuando se trabaja a mayor escala, en lugares concretos y con eventos bien definidos.

Los datos históricos proporcionan una guía importante pero no un corsé, por tanto son necesarias evaluaciones que consideren nuevas posibilidades sobre todo relacionadas con los cambios sociales y tecnológicos en el futuro.

5.3 Un marco de trabajo para la estimación de las consecuencias adversas

Los movimientos de ladera pueden ocasionar consecuencias adversas complejas y variables en cuanto a su naturaleza y temporalidad. Para su predicción es necesario construir modelos o escenarios que describan las consecuencias esperables. No obstante, esta complejidad hace que posiblemente **la cuestión clave a considerar sea el reconocimiento y clasificación de los tipos de consecuencias adversas**. La primera división simple es distinguir entre **efectos directos** y **efectos indirectos**. Estos contienen tanto pérdidas como ganancias y pueden ser divididos posteriormente en **tangibles e intangibles**, dependiendo si pueden ser descritos o no en términos monetarios como valores de pérdidas/ganancias.

Por ejemplo:

- Impacto directo en personas, es decir muertos o heridos.
- Pérdidas económicas directas o indirectas.
- Pérdidas intangibles como valores culturales o afectivos.

Efectos directos son las consecuencias de primer orden que están inmediatamente asociadas al evento, o que se presentan como consecuencia directa de él (Ej.: Destrucción por alcance e impacto del material movilizado), mientras que los *efectos indirectos* se manifiestan más tarde, como enfermedades mentales, problemas económicos a largo plazo o costes de reubicación (Smith, 2001).

La distinción entre efectos directos e indirectos es en ocasiones difícil y subjetiva. La fuente principal de incertidumbre está relacionada con los impactos producidos por peligros secundarios (Ej.: incendios e inundaciones) y peligros derivados o subsecuentes (Ej.: saqueos), en cuanto a si los consideramos como pérdidas directas o indirectas.

Hay buenos motivos para incluir los impactos físicos de los peligros secundarios, que reúnen fuegos y accidentes directamente atribuibles al evento desencadenante, dentro de las pérdidas económicas directas porque estas se deben principalmente a la ocurrencia del movimiento de ladera. Esto a veces

es difícil de distinguir cuando un conjunto de fuerzas destructivas cesa al mismo tiempo que otro aparece. Por ejemplo, cuando tiene lugar un movimiento en la ladera del vaso de un embalse o lago, es ilógico que el coste debido a la rotura y posterior inundación cauce abajo, se excluya de las pérdidas atribuibles al deslizamiento (Ej.: El desastre de la presa de Vaiont en 1963). La misma lógica se aplica a los Tsunamis. De la misma manera, si un deslizamiento causa directamente un accidente de tráfico el coste del accidente debiera atribuirse al deslizamiento. Pero hay que tener mucho cuidado para no confundir *impactos secundarios* y *efectos indirectos* con pérdidas indirectas.

Una aproximación alternativa propuesta por Hewitt (1977) es subdividir las pérdidas en daños primarios, secundarios y terciarios. Los daños secundarios serían mayormente el producto de los peligros secundarios, mientras que los terciarios se presentan cuando las funciones generales se deterioran, Ej.: enfermedades, efectos del retroceso económico o emigración forzada. Este es un marco de trabajo muy útil cuando se hacen análisis retrospectivos de los efectos del impacto de un gran evento, donde el paso del tiempo permite la identificación a largo plazo de las consecuencias políticas, económicas sociales y medioambientales. Lamentablemente, este método tiene un valor limitado cuando se trata de determinar consecuencias adversas como parte de una valoración del riesgo, donde se requiere un acercamiento más simple y pragmático.

El tiempo de ocurrencia y la coordinación de sucesos, son factores crucial ya que las pérdidas ocasionadas en un evento en particular pueden depender de una combinación de circunstancias única. Por ejemplo, tras un deslizamiento ocurrido sobre la autopista Trabzon-Erzurum en Çatak, Turquía (Jones et al. 1989a, b) se estima que murieron unas 66 personas. Un deslizamiento de pequeñas dimensiones bloqueó la carretera durante la noche del 22/23 de Junio, en estas circunstancias los viajeros afectados por el corte se refugiaron congregándose en un café de carretera cercano al lugar. Mientras tanto, se desplazó una máquina para limpiar el material deslizado pero la dificultad para trabajar de noche bajo una intensa lluvia retrasó los trabajos. Ocho horas más tarde se produjo un deslizamiento mayor en la misma ladera que sepultó el café de carretera matando a todos los que se

encontraban dentro. Un deslizamiento de tamaño similar que ocurriera sobre esta carretera no produciría tantas muertes.

Los eventos son el resultado de un conjunto único y particular de condiciones físicas y sociales. En Çatak, un conjunto de condiciones diferentes había dado lugar a un escenario de daño diferente. La incertidumbre inherente en la mayoría de los factores que gobiernan cualquier desastre (Ej: crecimiento de la población en un determinado lugar, la noche, etc.) condiciona que **no podamos esperar los mismos niveles de consecuencias adversas para deslizamientos futuros aunque tengan incluso la misma magnitud.**

Aunque la información contenida en los registros históricos proporcione una guía importante sobre las consecuencias adversas potenciales por deslizamientos futuros, esta no puede indicar el verdadero rango de posibilidades debido a su inevitable incompletitud y sesgo. El pasado, en consecuencia, no es un guía completo del futuro ya que las circunstancias cambian con respecto a los ambientes físicos y humanos o socio-económicos. Se identifican nuevos peligros, se desarrollan nuevas vulnerabilidades, emergen nuevas secuencias de accidentes.

Por consiguiente es necesario desarrollar una aproximación estructurada para la evaluación de consecuencias adversas que esté soportada por datos históricos, pero basada en un conjunto de factores clave que determinen el daño potencial por deslizamientos.

Estos factores son:

- La naturaleza del movimiento del terreno (comportamiento del terreno)
- El grado en que es probable estar expuesto al peligro de los movimientos del terreno predichos.
- La vulnerabilidad de los valores o elementos en riesgo ante los movimientos del terreno previstos.
- La naturaleza y valor de los valores o elementos en riesgo.

5.3.1 Muertos y heridos

Una de las mayores prioridades de cualquier análisis de riesgo es la identificación de cualquier posibilidad de pérdidas de vidas o daños físicos. Esto no es simplemente una respuesta a una sociedad cada vez más litigante sino refleja una combinación de otros factores: la naturaleza del análisis del riesgo centrada en el hombre, de hecho el ser humano generalmente valora la vida sobre todas las otras cosas, y por que el número de víctimas a menudo implica un sentimiento de pérdida más efectivo el debido a cualquier otra forma de estadística de daño. La comunicabilidad de las estadísticas de víctimas junto con su disponibilidad en un tiempo relativamente corto tras el evento, ha hecho de ellas las favoritas para los medios de comunicación. Por consiguiente, el número de víctimas se ha convertido en "la divisa del desastre", determinando a menudo el umbral tras el cual los impactos serios deben llamarse "desastres". (Ej. 10,24,50 o 100 muertos) e incluso algunos lo emplean para indicar la importancia absoluta o relativa de los desastres. Esta focalización hace que normalmente el registro del número de víctimas sea el mejor guardado en las estadísticas sobre impactos de deslizamientos.

Los registros históricos revelan que los eventos múltiples causan en torno a unas 100.000 víctimas, y solo bajo circunstancias absolutamente excepcionales podrían alcanzarse posiblemente las 500.000 (Ej. terremoto de Shansi, 1556). No obstante las víctimas atribuibles directamente a los deslizamientos causados por dichos eventos son en su mayoría menos de 15.000, con registros relativamente frecuentes en el rango de 100-1000 víctimas. El máximo número de muertos debido a un único evento de deslizamiento fue alrededor de 20.000 víctimas en los casos de las roturas catastróficas de los volcanes Huascarán en 1970; (Plafker and Ericksen, 1978) y el Nevado del Ruiz en 1985, (Herd et al., 1986). Lo más frecuente es que el número de víctimas debidas a eventos individuales de movimientos de ladera o de inundaciones producidas tras la rotura de embalses temporales provocados por estos, sea menor de 1.000 y

que la frecuencia de movimientos aumente a medida que descienden las víctimas.



Avalancha de roca y de nieve, monte Huascarán, Perú 1970. Una avalancha de roca y de nieve inducida por un terremoto en el Mt. Huascarán, Perú enterró las ciudades de Yungay y de Ranrahirca. El coste de muertes por la avalancha de derrubios fue de 18.000 (las víctimas totales del terremoto y del flujo de derrubios fueron 66.000). La avalancha comenzó como un deslizamiento en masa de hielo glaciar y de roca de cerca de 3.000 pies de ancho y una milla de largo cayendo en la laguna de Llanganuco y ocasionando el desborde de la misma. La avalancha barrió cerca de 11 millas incluida la aldea de Yungay con la mayoría de sus aproximadamente 30 mil habitantes, a una velocidad media de más de 100 millas por hora. Cerca de tres mil pobladores sobrevivieron gracias a que sus viviendas se encontraban en las partes más altas o algunos reaccionaron para correr a los cerros vecinos y así salvar su vida. El rápido movimiento en masa asimiló los depósitos glaciales y en el momento en que alcanzó Yungay, se estima estaba consistido

por cerca de 80 millones de yardas cúbicas de agua, fango, y roca. Cortesía de la foto de Servicio Aerofotografico Nacional de Perú 13 de junio de 1970.



Lahar del Nevado del Ruiz (Colombia) destruyó cuatro poblaciones siendo la más afectada la de Armero. Tras la erupción del volcán Nevado del Ruiz se produjo la fusión de parte del casquete de hielo que lo cubría en su cumbre, el agua así liberada arrastró el material volcánico de flanco sur del volcán a lo largo de las quebradas. Bajó un flujo de derrubios de 20 kilómetros de largo que causó al menos 20.000 muertos (Voight, 1990).

Debido a la pobre calidad del registro histórico subyace incertidumbre respecto al número de víctimas anuales debidas a deslizamientos, Las últimas estadísticas de Cruz Roja hablan de 3.006 muertos en el periodo 1900-76 (Crozier, 1986), o lo que es lo mismo 40 muertos por año, sin contar las 60.000 víctimas al año debidas a desastres naturales. Actualmente se conoce que estos datos están ampliamente subestimados. Hewitt (1997) reclama que durante el periodo 1963-92 ocurrieron 54 desastres provocados por deslizamientos con unos 100 muertos, o lo que es lo mismo 1.8 desastres al año con un poco menos de 200 víctimas anuales. Estadísticas más recientes producidas por la Cruz Roja hablan de 14 deslizamientos severos al año para el periodo 1988-97, con una media de muertos anual de 790 (IFRCRCS, 1999). La información recopilada por la Office of US Foreign Disaster Assistance (OFDA) y analizada por Parfitt (1992) indica que los deslizamientos que dan lugar a más

de 10 muertos tienen lugar como media unas tres veces al año. Si incluimos los eventos catastróficos generados por deslizamientos alcanzamos una media de 1 evento al año que causa más de 100 muertes.

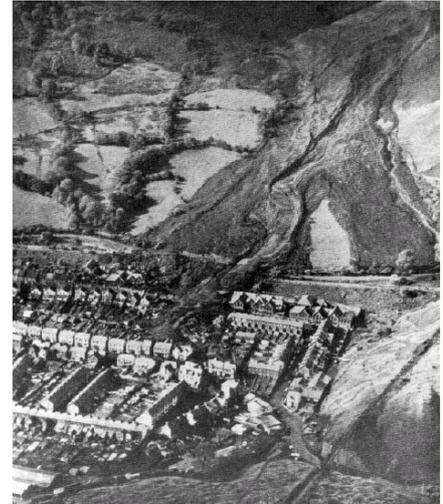
Los eventos catastróficos mejor conocidos son:

- El desastre de Vaiont 9 de Octubre de 1963 en Italia



El deslizamiento de 250 millones de m³ de roca y suelo que penetró en el embalse de Vaiont, provocó una ola de unos 100 m de alto que sobrepasó la presa (sin romperla) y se precipitó cuenca abajo. El frente de inundación destruyó cinco ciudades situadas aguas abajo y mató alrededor de 1900 personas. (Kiersch, 1964; Hendron and Patton, 1985; Voight y Faust, 1982, 1992).

- El desastre de Aberfan en Octubre de 1966 en el Sur de Gales (UK)



Parte de los depósitos que constituían una escombrera de vertidos mineros se deslizaron ladera abajo en forma de flujo de tierras que alcanzó la localidad de Aberfan situada en su camino. 20 casas y una escuela de primaria fueron arrasadas. 144 personas murieron, incluyendo 107 niños de los 250 alumnos de la escuela. (Bishop et al., 1969; Miller 1974).

- El desastre de Hong Kong en Junio de 1972 en China.



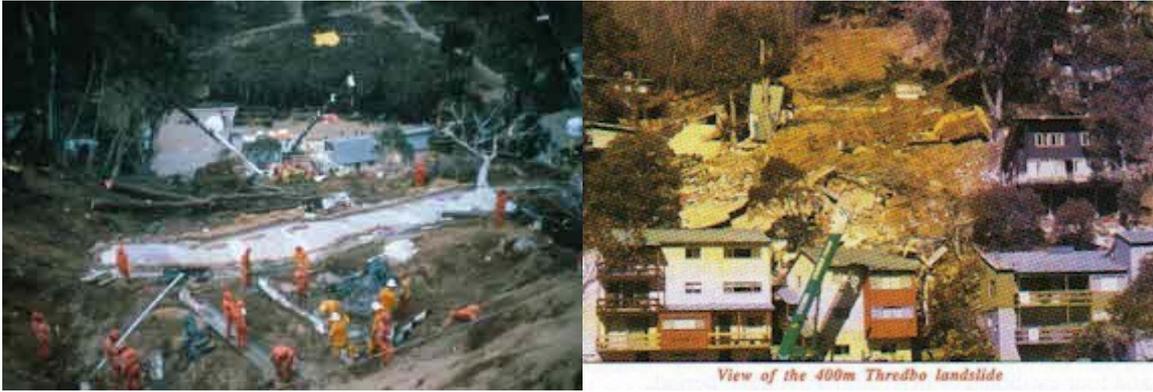
250 personas murieron a causa de grandes deslizamientos ocurridos durante un periodo de lluvias continuadas en Hong Kong durante el mes de Junio de 1972. La mayoría de las muertes ocurrieron en dos deslizamientos importantes: uno en el estado de Sa Mau Ping en Kowloon con la rotura de un terraplén de 40 metros de alto que produjo un flujo de tierras que mató a 70 personas y dejó 60 heridos, y otro en Sau Mau Ping (en la foto), flujo deslizante rápido que se llevó por delante un edificio de 12 plantas matando a 67 personas e hiriendo a otras 20.

- El desastre de Mameyes en Octubre de 1985 en Puerto Rico (USA)



El deslizamiento de Mamayes, Puerto Rico, 1985. Este derrumbamiento destruyó 120 casas y mató por lo menos a 129 personas (solo fueron recuperados 39 cuerpos), fue el derrumbamiento aislado que ha producido más muertes en Norte América. El deslizamiento catastrófico del bloque fue accionado por la tormenta tropical “Isabel” que produjo la precipitación extremadamente intensa (560 mm en 24 h.). Entre los factores que contribuyeron se podrían incluir las aguas residuales descargadas directamente en la tierra en el área densamente poblada, y una fuga en conducción de agua en la cabecera del derrumbamiento. Fotografía de R.W. Jibson (1992) del U.S. Geological Survey.

- El desastre de Thredbo en Australia



El deslizamiento de Tredbo en New Gales Australia, el 30 de Julio de 1997, Se produjo un deslizamiento de unas 1.000 toneladas de suelo roca y árboles de una ladera montañosa que arrastró una sección de la carretera Alpien Way, la más importante de la zona y dos albergues de montaña situados uno sobre la masa deslizada y otro que fue sepultado por el avance de unos 100 metros del terreno movilizado. De los diecinueve ocupantes de ambos albergues solo uno pudo ser rescatado con vida, tras permanecer tres días enterrado.(Hand, 2000)

Además de estos eventos de gran fatalidad, hay otros muchos incidentes que causan algunos muertos. Los siguientes ejemplos solo quieren ilustrar la diversidad de casos y de circunstancias desafortunadas:

- En 1999 cinco soldados y tres trabajadores murieron cuando el bote de dragado de oro en el que viajaban fue alcanzado por un deslizamiento en la margen del río Nechi, Colombia.
- En Julio de 1989 un gran desprendimiento de rocas (1.400 m³) colapsó sobre un cobertizo de rocas que protegía la carretera nacional 35 en Hechicen-cho, Japón. La cubierta del cobertizo fue desplazada machacando a un microbús que pasaba en ese momento, murieron los 15 pasajeros (Yoshimatsu, 1999).
- En Abril de 1988 un terraplén de ferrocarril de 17 metros de altura en Coleadle, un suburbio de Wollongong, Australia, se rompió tras unas lluvias intensas y prolongadas. El deslizamiento de barro englobó una casa situada a 20 metros de la base del terraplén, atrapando a cuatro ocupantes, dos de ellos fueron rescatados de la masa deslizada, pero la madre y un hijo de dos años murieron.

La mayoría de los eventos similares a estos solo son recopilados localmente y además solo serán contabilizados si se investiga a nivel local o nacional. Cuando

se hace esto el número de víctimas generadas por movimientos asciende dramáticamente. Por ejemplo, Ikeya (1976) expone que Japón en los cinco años comprendidos entre 1967-72 al menos 662 personas murieron como consecuencia de flujos de derrubios y más de 682 por deslizamientos, lo que da lugar a una media de 269 personas al año. De igual manera en Perú (Taype, 1979) identifica 34.975 muertos en 50 años debidos a 168 deslizamientos, 37 coladas de barro y 3.734 huaycos (torrentes de derrubios), lo que supone 700 muertos al año sin especificar la proporción que puede ser atribuida a las inundaciones.

Tomando juntos, todos estos datos indican que los eventos de movimientos de ladera que producen muertos es de unos pocos cientos al año con unas 2.000 víctimas de media. Estas cifras aumentan mucho si los eventos individuales desencadenan entre otros procesos deslizamientos, pero estos datos normalmente no se consiguen de forma desagregada. Con independencia de las cifras actuales, la conclusión más importante que sacamos es que las muertes debidas a movimientos de ladera tienen una probabilidad muy diversa y es necesario evaluarlas con mucho cuidado cuando se hacen valoraciones de riesgo integradas.

La incertidumbre desde el punto de vista del coste de víctimas se complica aún más en el caso de **los heridos**. Las estadísticas de Cruz Roja indican que entre 1973-97, 267 personas fueron heridas por deslizamientos al año (IFRCRCS, 1999). No obstante el número de heridos por deslizamientos actualmente supera varias veces este número. Por otro lado hay que precisar que el término herido engloba a un espectro importante de diferentes niveles de consecuencias adversas en términos de escala, costes de recuperación, y el grado en que esta recuperación total pueda alcanzarse. Una división simple de los heridos sería: Leve, moderado, grave y crítico, útil en un primera aproximación. Alternativamente podemos usar las categorías usadas para la toma de decisión del orden de las preferencias en estado de emergencia:

- muerto o insalvable

- lesiones que ponen en peligro la vida y requieren una atención médica inmediata y hospitalización.
- lesiones que requieren tratamiento hospitalario
- lesiones leves que no requieren hospitalización

A veces se utiliza un esquema basado en el grado de incapacidad:

- Lesiones que causan gran incapacidad
- Lesiones que causan incapacidad leve
- lesiones que no afectan a las funciones normales

Por eso es lamentable que, a pesar de los esfuerzos en la medida de la severidad de las lesiones, no exista una clasificación de heridos acordada internacionalmente para la uniformizar la recopilación de datos (Olser, 1993). También algunas clasificaciones no pueden abordar correctamente los tipos que diferencien las lesiones físicas, o el grado en que puede recuperarse la vida normal anterior al impacto debido a que los individuos son lisiados, cegados, ensordecidos o han experimentando otras formas de discapacidad física a largo plazo.

Como se desprende de lo escrito anteriormente la valoración de las muertes es extremadamente problemática. Aunque existen muchos trabajos al respecto en el campo de los impactos por terremotos, es relativamente pequeña la información en otros riesgos geológicos, como los movimientos de ladera. La valoración debe basarse, por lo tanto, en la definición de escenarios, usando, por ejemplo, las categorías siguientes del impacto en seres humanos (Alexander 2000):

- *No heridos*
- *Heridos leves.* El problema se resuelve con una atención médica menor y sin urgencia, sin que sea necesario el traslado a hospitales
- *Heridos graves que no requiere tratamiento inmediato prioritario.* El paciente debe ser trasladado a un hospital pero no requiere que sea tratado con urgencia. Lesiones suponen amenaza de muerte y no conducirán a un empeoramiento de la condición del paciente si él o ella debe esperar para recibir el tratamiento.

- *Heridos graves que requieren tratamiento prioritario* para producir cierta mejora significativa en el pronóstico a largo plazo del paciente, o evitar simplemente el deterioro de las condiciones médicas preexistentes o de las complicaciones que se presenten de lesiones inicialmente no fatales.
- *Muertes instantáneas*
- *Muertes subsecuentes* debidas a paros cardiacos inducidos por stress, deterioro acelerado de las condiciones médicas preexistentes o una complicación en el estado de las heridas que inicialmente no eran fatales.

Respecto al coste que se puede asignar a los heridos, Alexander (2000) ofrece cifras para Estados Unidos a mediados de los años 90 basados en ingresos preexistentes que indican que si a una muerte se le asigna un valor medio de 2.2 millones de dólares los valores equivalentes para heridos leves y moderados serían 5.000 y 200 dólares respectivamente.

Aunque está claro que los deslizamientos pueden causar impactos directos significativos en los humanos, la estimación de la probabilidad de que estos impactos se produzcan es muy problemática. Las estructuras físicas e infraestructuras están cimentadas o asentadas en un lugar fijo mientras que los seres humanos son sujetos móviles y su presencia y concentración varía tanto en el espacio como en el tiempo. Por ello es necesario estimar la probabilidad de que un número de gente distinto se encuentre en un lugar determinado en función de factores temporales como horas del día, condiciones climáticas o estaciones del año. Normalmente, para los grandes peligros como los terremotos, se utiliza la noción de *índices de ocupación* y se estima el número de personas que ocuparán los edificios en un lugar y en un tiempo dados, como un porcentaje del número máximo que podría esperarse. Estos índices de ocupación tienden a ser mayores en las casas por la noche, en cines por la tarde pero con variaciones durante la semana, en escuelas y oficinas durante el día pero solo durante los días laborales, en playas durante el mediodía en vacaciones o en épocas de calor, etc. El mismo principio es aplicable a los

medios de transporte, donde existen fluctuaciones similares en actividad y número de personas que los utilizan.

La yuxtaposición física de personas y movimientos de ladera no implica necesariamente que se produzcan daños personales. El comportamiento del deslizamiento es muy importante y está condicionado por su incertidumbre, premura, velocidad, características de la distorsión del terreno y violencia. En algunas circunstancias el deslizamiento puede ser la causa principal de las pérdidas humanas, pero a menudo estas son el resultado de eventos secundarios tales como colapso de edificios, accidentes de tráfico, fuegos o inundaciones locales. Determinar cuanta gente es probable que sea afectada es importante para determinar el número de muertos y heridos. ¿Hay gente que va a ser alcanzada por bloques, engullida por un torrente de derrubios, enterrada viva o atrapada cuando colapsan total o parcialmente las estructuras? ¿Serán aplastados, magullados, asfixiados, quemados, ahogados, o sufrirán hipotermia, o sufrirán los efectos del shock y de la depresión además de sus lesiones?. El recuento de víctimas debería incluir las muertes producidas tras el evento, especialmente cuando el número de muertes tiende a aumentar después de un desastre debido a suicidios y depresión entre los más ancianos. Existe la evidencia cierta que en los grandes desastres la proporción de muertes entre los diferentes grupos de edades tiende a incrementarse con la edad. Así la estimación de muertos y heridos es un problema muy complejo que requiere el desarrollo de escenarios basados en analogías adecuadas. Para eventos de gran escala, los modelos de simulación tienen un valor considerable y hay mucho que se puede aprovechar de las metodologías que se han desarrollado para el estudio de terremotos (Ej. Coburn and Spence, 1992; Coburn 1994; Noji, 1994).

Aunque la evaluación de muertos y heridos sea una parte fundamental del análisis del riesgo es un tema muy controvertido. En el caso de los heridos es posible evaluar el coste de las operaciones de rescate, de los tratamientos de emergencia y de la hospitalización para cada tipo de daño (leve, moderado, grave, etc.) Esto servirá para obtener un coste medio por tipo de herido. En

cambio lo más difícil de determinar es el coste a largo plazo debido a pérdidas de funcionalidad (Ej. Ceguera) o de sueldos. Se puede investigar para obtener cifras para estas pérdidas, pero es un ejercicio con demasiado coste de tiempo y dinero, por lo que en la mayoría de las evaluaciones de riesgos por movimientos de ladera estos daños se consideran como "*perdidas intangibles*". Esto es cierto igualmente para la valoración de la muerte, aunque ha habido esfuerzos para intentar poner un valor a la vida del ser humano en un sentido abstracto. Las bases de estos trabajos fueron descritas por Mooney (1977), Jones-Lee (1989) and Marín (1992) y se centraron en establecer el "value statistical of life" (VSOL), valor estadístico de la vida, una noción que gran parte de la población considera moralmente repugnante y éticamente inaceptable, sobre todo por la confusión entre VSOL y una persona real.

Pearce et al. (1995) describen esta aproximación como sigue:

"Atribuir un valor económico a la vida humana es controvertido y aviva un gran número de cuestiones de difícil solución teórica y ética. Es importante entender que lo que se evalúa es una transformación monetaria del riesgo de muerte, no la vida humana en sí misma. En otras palabras la cuestión es valorar como es afectado el bienestar de una persona por un riesgo creciente de mortalidad, no lo qué su vale vida. Si 100.000 personas están expuestas a un riesgo anual de mortalidad de 1:100.000 entonces habrá, estadísticamente, un muerto al año. Quitando el riesgo se podría salvar una "vida estadística". Es esta vida estadística la que tiene un valor económico. No tendría ningún sentido preguntar a un individuo cuánto están dispuestos a pagar él o ella para evitar una muerte. Ni es una decisión a tomar en el contexto social. Pero puede tener sentido preguntar qué individuos están dispuestos a pagar para reducir el riesgo de muerte o cuántos están dispuestos a aceptar y tolerar un aumento del riesgo mortal.

La realidad es que la seguridad no tiene precio. Pero si esto fuera así, la mayoría de las fortunas del mundo estarían pagando para salvar vidas reduciendo accidentes y previniendo enfermedades. El riesgo se asume cada día, por los individuos y por los gobiernos al elegir sus gastos sociales y

económicos, algunos de los cuales se dirigen específicamente a la protección y extensión de la vida humana. Por ejemplo, si un gobierno introduce un programa de inoculación para las enfermedades de la niñez que cuesta 10.000.000 de euros al año y este salva un promedio de 80 vidas al año, una vida estadística estaría valorada implícitamente como mínimo en 125.000 euros."

Se han aplicado muchas metodologías para calcular el VOSL, pero todas tienen problemas. La aproximación "*prescriptiva*" o "*normativa*" intenta fijar el VOSL en términos de lo que la vida debería valer y tiende a ser descartada por carecer de una base económica apropiada. Por el contrario, el acercamiento "*descriptivo*" implica esencialmente establecer realmente cuánto dinero está dispuesta a pagar la gente para evitar el riesgo de muerte. Principalmente se han utilizado dos metodologías:

La aproximación del capital humano. Esta trata al individuo como un agente económico capaz de producir un resultado que puede ser evaluado en términos monetarios. El valor de este resultado, menos todos los recursos que el individuo necesita para hacerlo, es el que se asigna cuando el individuo muere por el alcance de un movimiento de ladera. Este método tiende a asignar valores extremadamente bajos para los que tienen pocos ingresos, por lo que se produce una clara discriminación de los más pobres.

El método *disposición a pagar versus disposición a aceptar.* Implica una valoración estadística de la vida sobre la base de lo que los individuos están dispuestos a pagar o aceptar por cambios en el grado de riesgo. Ambos valores pueden obtenerse de una evaluación *contingente* en la que los individuos son encuestados directamente para saber cuánto están dispuestos a pagar para reducir el riesgo. Otras mediciones serían averiguar cuánta gente está invirtiendo en seguridad o en medidas de prevención de enfermedad, o cuánto

difieren los salarios de trabajos peligrosos o seguros (la aproximación hedonista). Por ejemplo supongamos que a 100.000 trabajadores se les paga 15 euros a cada uno por asumir un riesgo de mortalidad de 1/100.000. El incremento del riesgo dará como resultado una valoración estadística de la vida de 15 por 100.000 = 1.500.000 euros.

El método de disposición a pagar (WTP) es el más favorable ya que se pregunta a la gente sobre su visión del riesgo (expresando preferencia) y sobre las respuestas al riesgo estudiadas (revelando preferencias). El resultado de los cálculos ha revelado diferencias considerables en los valores de VOSL entre países desarrollados, con una cierta visión de criterios el VOSL en el Reino Unido se podría fijar en 2-3 millones de libras en precios de 1990 (Marín 1992). Otro trabajo presentó un VOSL para países desarrollados en el rango de 1.8 a 9 millones de euros con una media estimada en 3.3 millones de euros. Por otro lado las estimaciones para otros países son significativamente menores: 300.000 euros para Rusia y solo 150.000 para China, India, África, lo que provoca un ultraje en ciertos lugares. Pearce et al. (1995) propusieron una media global de 1 millón de euros en 1995.

5.3.2 Pérdidas económicas directas e indirectas

Las pérdidas económicas directas e indirectas son aquellas a las que es posible asignar un valor monetario por la existencia de mercados, todas las otras pérdidas se les considera intangibles. Las pérdidas económicas directas surgen principalmente del impacto físico directo de los movimientos de ladera en la propiedad, edificios, estructuras, servicios e infraestructuras.

La estimación y predicción de las pérdidas económicas son complejas y problemáticas. Lo más inmediato es tender a restringir las pérdidas directas para hacerlas más fáciles de calcular. Esto se puede lograr restringiendo las

pérdidas directas a daños físicos y destrucción, excluyendo por tanto los costes de interrupción del tráfico, polución, etc. Como alternativa, podemos fijar los límites temporales de los costes directos como los causados solo dentro del periodo de tiempo en el que consideramos el movimiento de terreno, por lo que estrictamente se dan de lado los problemas causados por incendios, inundaciones y tsunamis. Además podemos poner límites espaciales a los costes directos como aquellos causados dentro de los límites de definición del movimiento, tal y como ejemplifican Shuster and Flemin (1986) en su definición de pérdidas directas: "costes de reposición, reparación o mantenimiento consecuencia de los daños producidos en instalaciones o propiedades dentro de los límites de responsabilidad del movimiento de terreno". Según esta definición, **daños directos son** solo los daños que han sido causados por la rotura del terreno que ocurre durante el proceso de movimiento gravitacional y por el contacto físico de los materiales desplazados con las propiedades y sus contenidos. La definición se puede extender a los contenidos de los edificios, equipos, maquinaria, enseres personales, obras de arte, plantas ornamentales, mascotas y animales domésticos.

El potencial de los movimientos de ladera para causar daños directos es enorme ya que las construcciones y acerbos humanos están concentradas sobre o muy cerca de la superficie terrestre. Así, los movimientos del terreno en sí mismos o del material depositado sobre la superficie del suelo, tienen el potencial de infligir importantes daños en elementos fijos que están ligeramente enterrados, situados sobre la superficie o elevados pero cimentados en el suelo. Los impactos pueden clasificarse en rangos de escala desde ligeros, como grietas en muros, edificios y carreteras debidos a desplazamientos limitados, pasando por la destrucción de edificios individuales u otros grupos de edificios, hasta escenas de destrucción total como en el caso del la rotura catastrófica de Huascarán en 1970, en la que resultó totalmente destruida la ciudad de Yungay con cerca de 30.000 habitantes (Plafker and Ericksen, 1978).

Los datos de los efectos globales producidos por deslizamientos en términos de daños directos tienen en general muy poca calidad. Por otro lado, la ocurrencia

generalizada de deslizamientos sugiere que los daños directos puedan ser significativos como exponen Alfors et al (1973) en California concluyendo que los deslizamientos son el riesgo geológico que más daños ocasiona después de los terremotos en ese estado con un 25,7% de los daños ocasionados por riesgos geológicos durante el periodo 1970-2000.

Alguno de los impactos más dramáticos debidos a daños directos han sido:

- Flujos de barro y derrubios debidos a la erupción catastrófica del volcán Mount St Helens, en el estado de Washington EE.UU. que dañaron o destruyeron cerca de 200 edificios y 44 puentes, enterrando 27 Km de vía de tren y más de 200 Km de carreteras, quedando seriamente dañados los sistemas de abastecimiento y gestión de aguas residuales (Schuster, 1983). Los daños asociados a movimientos se estimaron en 500 millones de dólares.
- El deslizamiento de Ancona en la región italiana de Marche, ocurrió el 13 de Diciembre de 1982. Se movilizaron 342 hectáreas de suelo urbano y suburbano, provocando daños en dos hospitales y en la facultad de medicina de la universidad de Ancona, destruyó completamente 280 edificios con un total de 865 apartamentos, desplazando la vía y la carretera de la costa en más de 2,5 Km. Ocasionó un muerto indirecto y la evacuación de 3.661 personas (Crescenti, 1986; Catenacci, 1992). Las pérdidas económicas estimadas fueron de 700 millones de \$ (Allexander, 1989).
- Las lluvias intensas asociadas al fenómeno de El niño en el invierno y primavera de 1998 causaron cerca e 158 millones de pérdidas por deslizamientos en la región de la bahía de San Francisco, E.E.U.U. eso condujo a la declaración del estado de emergencia en diez condados por la Agencia Federal de Gestión de Emergencias. Otros tres eventos parecidos ocurrieron en esta área desde 1969 con 204,9 millones, en 1973 con 51,2 millones y en 1982 con 132 millones de pérdidas respectivamente.

- La región de Basilicata en el sur de Italia fue afectada en 1989 por deslizamientos generalizados de tal manera que se estima que el 18,5% de su superficie se movilizó con unos 1800 deslizamientos profundos (Regione Basilicata, 1987). Por todas partes había edificios dañados, puentes inservibles y carreteras muy afectadas. La mayoría de los pueblos de la región están asentados sobre colinas, por lo que más de 115 de ellos fueron suficientemente dañados como para necesitar la implementación de medidas de ingeniería estructural, reubicación de algunos hacia una nueva ubicación más segura o una mezcla de ambas soluciones (Fulton et al. 1987; Jones, 1982). El abandono de la villa de Craco es un ejemplo bien documentado (Del Prete and Petley, 1982; Jones, 1992), pero no inusual ya que muchos lugares fueron abandonados por los efectos destructivos de la sacudida sísmica y las roturas de laderas. En la vecina región de Calabria el coste de los daños en carreteras, ferrocarril, acueductos y casas alcanzó los 200 millones de dólares entre 1.972-73 (Carrara and Melenda, 1976) y en las décadas siguientes fueron abandonados cerca de 100 pueblos por causa de los movimientos del terreno lo que produjo un desplazamiento de unas 200.000 personas.
- La ciudad de Ventnor, Inglaterra, se construyó sobre un antiguo deslizamiento complejo (Lee and Moore, 1991). Actualmente se han producido ligeros movimientos, que debido a que se han producido en un área urbanizada con una población de unos 6.000 habitantes, el daño acumulado en casas carreteras y servicios ha sido sustancial. En los últimos 100 años cerca de 50 casas y hoteles han tenido que ser demolidos. La pérdida anual en el área de Ventnor ha sido estimada por las autoridades locales en 2 millones de libras.

Estos ejemplos son únicamente eventos extremos que podrían ser un problema común en áreas urbanas de zonas montañosas o llenas de colinas. Los problemas típicos incluyen los costes de retirada del material movilizado de las carreteras y pavimentos, reconstrucción y reparación de las propiedades dañadas, reparación o reconstrucción de tramos de carreteras y vías,

conducciones de agua potable y saneamiento, conducciones de gas y eléctricas, etc. Por ejemplo, Murray (2000) indica que en Nueva Zelanda cerca de 800 compañías de seguros pagaron durante los años 1997-98 un total de 4,7 millones de dólares por daños producidos por deslizamientos.

A veces daños directos significativos se deben a procesos de recesión de acantilados o escarpes, sobretodo en la costa. Un ejemplo conocido es el de Holderness en Inglaterra donde se ha producido un retroceso de la línea de costa de 2 Km en los últimos 1000 años. Este proceso ha destruido al menos 26 poblaciones listadas en el registro de Domesday de 1086. Se han erosionado 75 millones de metros cúbicos en los últimos 100 años (Valentin, 1954; Pethick, 1996). Quizá el ejemplo más famoso de los efectos de la recesión rápida de la costa en Inglaterra sea el de Dunwich, Suffolk, donde la mayoría de la ciudad se perdió durante el último milenio (Bacon and Bacon 1988). Gardner (1754) narra que en 1328 el puerto fue inutilizado y que 400 casas junto con molinos de viento iglesias, comercios, y muchos otros edificios se perdieron una la noche de 1347.

Los **costes indirectos** son los que se originan como consecuencia de la destrucción y daño causados por un peligro primario (un deslizamiento por ejemplo), un peligro secundario o por peligros derivados sucesivos. Incluyen los costes de cortes de tráfico prolongados, pérdidas en las cosechas, productos manufacturados y minerales, pérdidas en los negocios y pequeñas rentas, limpieza, resultantes de la contaminación del agua o del suelo y de varios costes derivados del proceso de recuperación como desempleo y de costes extra resultantes del incremento de enfermedades, etc.

Ejemplos de estos costes son:

- En 1987 un terremoto activó varios deslizamientos en los Andes al Nor-este de Ecuador. Estos movimientos destruyeron o cortaron cerca de 70 Km. del oleoducto trans-ecuadoriano y la única carretera que unía Quito con la selva del este y con los campos de petróleo (Nieto and Schuster, 1999). Las pérdidas económicas estimadas fueron de 1 millón de

dólares. Las exportaciones de petróleo se interrumpieron durante seis meses reduciendo los ingresos del gobierno en un 35% (Stalin Benitez, 1989).

- Los deslizamientos cerca del lago Tahoe USA obligaron a cerrar la autopista US-50. El coste directo asociado a la reparación fue de 3,6 millones de \$ (Walkinshaw, 1992). La carretera permaneció cerrada dos meses y medio causando pérdidas en el sector turístico de unos 70 millones de \$ (San Francisco Chronicle, 1983).



- Deslizamiento de Thistle en 1983 (Thistle, Utah). Este deslizamiento se movilizó en la primavera de 1983 en respuesta a la acumulación de agua subterránea tras las fuertes lluvias caídas el septiembre anterior y la fusión del paquete de nieve profunda acumulada en el invierno de 1982-83. Después de algunas semanas el derrumbamiento represó el río España en una bifurcación destruyendo la carretera US-6 y la vía principal del ferrocarril occidental de Denver y de Río Grande. La ciudad de Thistle se inundó después de que las aguas retenidas por el derrumbamiento sobrepasaran el represamiento. Los costes totales (directos e indirectos) ocasionados en por este derrumbamiento

superaron los \$400 millones. Los costes indirectos del corte del ferrocarril se estimaron en 81 millones de \$. Fue evento de deslizamiento único más costoso de la historia de Estados Unidos. Fotografía de R.L.Schuster, del U.S. Geological Survey.

- En 1914, durante la construcción del ferrocarril en Canadá se produjo una avalancha de rocas que afectó a las piscifactorías de salmón del río Fraser. La caída impidió la migración del salmón hacia sus lugares de desove. Entre 1914 y 1978 las pérdidas en las piscifactorías de salmón alcanzaron los 2600 millones de dólares (International Pacific Salmon Fisheries Comisión, 1980).

El coste indirecto debe incluir también el **coste realizado para mitigar la amenaza** del peligro. Este incluye los costes de planificación y desarrollo de los sistemas de emergencia y evacuación, que incluyen la provisión de refugios temporales, comida, servicios médicos que tuvieron que ser movilizados, costes de reubicación como consecuencia de la necesidad de realojo de la gente en áreas seguras, los costes extras para incrementar la investigación geotécnica, las medidas de monitorización y mitigación necesarias como consecuencia de la detección del incremento del riesgo subsiguiente a un impacto peligroso; costes adicionales en la ejecución de nuevas construcciones como consecuencia de la aplicación de nuevas normas de construcción más exigentes, el aumento de las primas de seguro debidos al reconocimiento de problemas de movimientos de laderas en un área determinada; cualquier caída de los precios de la propiedad como consecuencia de la ocurrencia de un evento o la implementación de una nueva normativa de usos del suelo, etc.

La evaluación completa de las pérdidas indirectas es muy difícil de conseguir ya que muchos elementos permanecerán afectados durante un tiempo considerable después de la ocurrencia del evento y además no estarán localizados en el área específicamente impactada por el movimiento. Por tanto

son extremadamente difíciles de predecir y no son abordables en valoraciones de riesgo a futuro.

5.3.3 Pérdidas intangibles

Las pérdidas intangibles son las consecuencias vagas o difusas que suceden tras un evento y que no pueden valorarse en términos económicos. Incluyen los efectos medioambientales, la conservación de la naturaleza, calidad de vida – confort, cultura local, aspectos de economía local, patrimonio, diversión y vitalidad, así como todas aquellas actitudes, comportamientos y sensaciones de bienestar. Ejemplos pueden ser la desfiguración de una vista famosa por la presencia de escarpes de deslizamientos, o la destrucción de un monumento histórico importante, ambos efectos producirán “costes” en términos de angustia o aflicción, así como en la economía local por descenso del turismo. El efecto del stress postraumático en la población afectada es a veces importante.

Los deslizamientos causan importantes daños ecológicos. Los cambios en el terreno, desplazamientos verticales del suelo, alteraciones en el aspecto de las laderas, variaciones en los drenajes, soterramiento del terreno preexistente, cambios en los cursos fluviales, inundaciones por represamiento de cauces, flujos catastróficos o aumento de la carga sólida en ríos, son algunas de las modificaciones súbitas del medio ambiente.

Los tres ejemplos siguientes ilustran la naturaleza problemática de las pérdidas intangibles e indican la extrema dificultad para incorporarlas en una evaluación de riesgo:

- En 1984 ocurrió un gran deslizamiento durante la construcción de la presa de una balsa de residuos mineros de la mina de cobre OK Tedi, Papua Nueva Guinea. La rotura de la presa produjo el vertido de 80.000 toneladas de residuos mineros con plomo, cadmio, zinc y cobre,

directamente en el río. Según el Australian Conservation Foundation, cerca de 70 Km del río OK Tedi resultaron biológicamente muertos y 130 Km muy degradados, la fauna de peces descendió en un 90%. Broken Hill Properties pagó 430 millones de \$ y entregó sus explotaciones al Gobierno de Nueva Guinea.

- Entre las secuelas del desastre de Aberfan ocurrido en Octubre de 1966, que mató a 107 niños de los 250 alumnos que se encontraban en escuela local, Gaylor Lacey, un psiquiatra de Mártir Tydfil Child Guidance Centre, observó que 56 niños sufrían problemas de comportamiento desde que ocurrió el deslizamiento (Lacey 1972). Los problemas más comunes fueron la dificultad en el sueño, nerviosismo, inseguridad, micción involuntaria, renuencia a ir a la escuela. Muchos niños perdieron a todos sus hermanos y este fue un punto de estancamiento del que salieron muy lentamente. El retraso en el desarrollo educativo de muchos niños permaneció hasta ellos comenzaron a superar el trauma.
- En los últimos años se ha informado que la fortaleza inca de Machu Pichu en Perú está siendo afectada por procesos activos de desprendimientos (Carreño and Bonnard, 1999; Hadfield, 2001). La ciudadela fue declarada patrimonio de la Humanidad por la UNESCO y se le considera un monumento de valor incalculable.

Las pérdidas intangibles pueden deberse tanto a consecuencias directas como indirectas de los movimientos de ladera. Por ello es muy difícil evaluarlas económicamente, su existencia conduce a la elaboración de estudios de impacto y evaluaciones de riesgo que consisten en una mezcla desafortunada de estadísticas (Ej. cuantos muertos y heridos) costes monetarios y juicios de valor (Ej. el valor de la reducción de la actividad lúdica) que hacen comparaciones de riesgo en procesos extremadamente difíciles y subjetivos. Como resultado, se ha invertido mucho esfuerzo en el desarrollo de métodos y técnicas destinadas a asignar valor monetario a los distintos tipos de pérdidas,

como es el caso del valor de la vida humana. Muchas de ellas se describen en Bateman et al. (2002) y DTLR (2002).

Por ejemplo podemos considerar que los ecosistemas tienen un valor derivado de la utilidad de su uso o debido a su existencia. Proporciona beneficios y servicios y en consecuencia cualquier reducción del mismo debida a un impacto (Ej. deslizamiento) se puede medir en términos de cambio en la productividad y se puede expresar en valores monetarios. El método del coste de la restauración del recurso se puede usar para calcular o predecir el gasto necesario para restaurar la productividad hasta el nivel anterior al impacto. Generalmente el método más aplicable para evaluar la *pérdida de nivel de vida* (Amenity) es la *evaluación contingente* (ver Bateman et al 2002), que incluye entrevistas para conocer cuánto estaría dispuesta la gente a pagar para mejorar el medio ambiente o a demandar compensaciones por su deterioro. Los aspectos más difíciles de valorar en las pérdidas en ecosistemas es asociarlos con los beneficios generales que tienen o pueden tener. Este valor indirecto de los ecosistemas se divide en dos grupos: valores de opción, que mide la propensión del individuo a pagar para retener la opción de tener acceso a las especies y recursos en el futuro (un elemento importante en el concepto de sostenibilidad) y valores de existencia que es el valor que la gente da simplemente al conocimiento de las especies o hábitat, aunque nunca puedan conocerlo de primera mano. La evaluación contingente es la técnica principal para estimar valores.

5.4 Modelos de consecuencias

Como ya se ha discutido, el impacto de un deslizamiento está controlado por el comportamiento del terreno (Ej. la intensidad del movimiento), la exposición de los elemento en riesgo y su vulnerabilidad a sufrir daño. La combinación de estos tres factores permitirá la elaboración de modelos de consecuencias que describan fielmente los daños producidos en un escenario de movimiento de ladera particular. Para cada uno de los ejemplos descritos en la tabla 5.12 se han utilizado los factores de exposición y vulnerabilidad para establecer los daños previstos y compararlos con las pérdidas totales de un evento en el que

Así, para un deslizamiento con una intensidad determinada:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad (Evento)} \times \text{Consecuencias adversas}$$

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad (Evento)} \times (\text{Pérdida total} \times \text{Exposición} \times \text{Vulnerabilidad})$$

En la mayoría de los casos es necesario hacer este ejercicio para cada uno de los elementos expuestos al riesgo, o incluso para cada propiedad individual

$$\text{Riesgo (elemento 1)} = \text{Prob. (evento)} \times \text{Consecuencias adversas (elemento 1)}$$

$$\text{Riesgo (elemento 2)} = \text{Prob. (evento)} \times \text{Consecuencias adversas (elemento 2)}$$

$$\text{Riesgo} = \text{Prob. (evento)} \times \text{Suma de Consecuencias adversas (elemento 1 a n)}$$

Escenario de movimiento	Factor de consecuencias	Modelo de consecuencias	Comentario
Recesión de acantilado. Erosión progresiva del acantilado que causa la pérdida continuada de propiedades de la cabecera del acantilado	Comportamiento del terreno	Pérdida de tierra en la cabecera del acantilado	El daño en la propiedad es total en la zona de pérdida de tierra
	Elementos en riesgo	Conjunto de propiedades que se encuentran tras la cresta del acantilado en función de la distancia	
	Exposición	Para elementos fijos, exposición permanente. No hay pérdidas de vidas ya que la población es evacuada antes de la pérdida de tierra	
	Vulnerabilidad	Pérdida total de los bienes que fueron declarados inseguros antes de que caigan del borde del acantilado	
Movimiento nuevo, una tubería enterrada cruza una ladera potencialmente deslizable	Comportamiento del terreno	Desplazamientos y deformaciones verticales y horizontales	Consecuencias inciertas, el daño depende de la vulnerabilidad de la tubería a eventos de diferente intensidad Daño = Pérdida total × Factor de vulnerabilidad
	Elementos en riesgo	La tubería enterrada a través del área de deslizamiento potencial	
	Exposición	Elemento fijo, exposición permanente	
	Vulnerabilidad	El potencial de rotura de la tubería depende de la intensidad del movimiento	
Movimiento reactivado movimiento pequeño y periódico que amenaza las construcciones situadas sobre la	Comportamiento del terreno	Desplazamientos y deformaciones verticales y horizontales	Consecuencias inciertas, el daño depende de la localización de la propiedad y de su vulnerabilidad respecto a eventos de diferente intensidad Daño = Pérdida total ×
	Elementos en riesgo	Propiedades situadas en los bloques deslizados en función de la distancia a los bordes de los bloques. No se esperan muertes debido a que el movimiento es de muy baja velocidad.	

Escenario de movimiento	Factor de consecuencias	Modelo de consecuencias	Comentario
ladera inestable	Exposición	Para elementos fijos, exposición variable dependiendo de su posición relativa respecto a los bordes de los bloques que deslizan	Exposición × Factor de vulnerabilidad para cada evento.
	Vulnerabilidad	El potencial de daño en la propiedad depende de la intensidad del movimiento	
Deslizamiento de derrubios o desprendimiento, rotura de un acantilado que amenaza a usuarios de carreteras situadas en su pie	Comportamiento del terreno	Despegue y caída de bloques con impacto instantáneo Avance del deslizamiento de derrubios e impacto instantáneo	Consecuencias inciertas, el daño depende de la exposición de la población y su vulnerabilidad respecto a eventos de diferente intensidad Daño = Pérdida total × Exposición × Factor de vulnerabilidad para cada evento.
	Elementos en riesgo	Vehículos que utilizan carreteras de montaña	
	Exposición	Exposición temporal, depende del número de usuarios por hora y de la velocidad del vehículo	
	Vulnerabilidad	La pérdida potencial de vidas depende del tamaño del Bloque y/o deslizamiento y/o intensidad	
Desprendimiento, caída de bloques sobre carreteras que producen su corte y el desvío del tráfico.	Comportamiento del terreno	Despegue y caída de bloques con impacto instantáneo	El daño (junto con los costes de transporte y costes ocasionales) depende del tiempo de corte de la carretera
	Elementos en riesgo	Vehículos que circulan en la carretera	
	Exposición	Exposición temporal, depende del número de vehículos y ocupantes por hora y de la velocidad del vehículo	
	Vulnerabilidad	Los vehículos y sus ocupantes sufrirán retrasos en su viaje	
Deslizamiento de derrubios o desprendimiento, rotura sobre una carretera que amenaza a los usuarios y a las propiedades cercanas a la misma	Comportamiento del terreno	Despegue y caída de bloques con impacto instantáneo Avance del deslizamiento de derrubios e impacto instantáneo	Resultados inciertos. Las muertes dependerán de la exposición de la población y de su vulnerabilidad a las diferentes intensidades del evento. Daño = \sum Pérdida total × Exposición × Factor de vulnerabilidad para cada tamaño de evento El daño en la propiedad dependerá de la ubicación y de su vulnerabilidad a las distintas intensidades del evento.
	Elementos en riesgo	Vehículos que circulan en la carretera, propiedades en función de la distancia desde la base del escarpe	
	Exposición	Usuarios: exposición temporal, depende del número de vehículos por hora y de su velocidad Propiedad: son elementos fijos pero su exposición varía con su ubicación y con la intensidad del evento	

Escenario de movimiento	Factor de consecuencias	Modelo de consecuencias	Comentario
	Vulnerabilidad	<p>Pérdidas potenciales de vidas dependientes del tamaño de bloque y/o deslizamiento y/o intensidad</p> <p>Pérdidas potenciales de propiedad dependen de la intensidad del movimiento</p>	<p>Daño = \sum Pérdida total \times Factor de vulnerabilidad para cada tamaño de evento \times Exposición para cada tamaño de evento para cada propiedad. Nota: la exposición cambia con la ubicación debido a las variaciones en las huellas de los movimientos con las distintas intensidades del evento.</p>

Tabla 5.12 ejemplos de modelos de consecuencias de movimientos de ladera simples.

Una metodología ligeramente diferente ha sido desarrollada por *Wong et al. (1997)* en ella los escenarios de consecuencias se relacionan con las consecuencias adversas estimadas por medio de puntos de referencia o *movimientos de referencia* con dimensiones e impactos bien conocidos. Esta metodología se utilizó para la estimación de muertes en Hong Kongh, donde como movimiento de referencia se tomó un deslizamiento de ladera superficial de 10 metros de ancho y 50 m³ de volumen. El número de víctimas mortales esperables cuando este movimiento de referencia afecta a diferentes categorías de usos del suelo en diferentes ubicaciones de presenta en la tabla 5.13.

Grupo	Bienes en riesgo	Nº de muertes esperado
1	A. Edificios con alta densidad de ocupación o edificios residenciales en uso, oficinas, tiendas y almacenes, hoteles, escuelas, estaciones de energía, mercados, parques de ambulancias, hospitales / clínicas / ambulatorios, centros sociales	3
	B Otros: Estaciones de autobús y tren y otras áreas públicas de espera. Chabolas en áreas incontroladas o con licencia	3

Grupo	Bienes en riesgo	Nº de muertes esperado
2	A. Edificios con baja densidad de ocupación o áreas urbanizadas con uso reducido (interior de parking, mataderos, barracones, incineradoras, interior de instalaciones deportivas, plantas de tratamiento de aguas residuales, iglesias, monasterios, centros cívicos, subestaciones manuales)	2
	B Carreteras con gran densidad de tráfico (vehículos y pedestre) Infraestructuras y e instalaciones importantes (ej. tren, tranvía, pasos elevados, metro, depósitos, túneles)	1
3	Carreteras en espacios abiertos Áreas de espera públicas sitas en espacios abiertos densamente utilizadas (Ej. estacionamientos, jardines, campos de deportes, asientos exteriores, terrazas) canteras carreteras con densidad de tráfico moderada (vehículos y pedestre)	0.25
4	Carreteras y espacios abiertos áreas de recreo poco usadas (cementerio, palomar, campos de deportes de baja ocupación, espacios abiertos de barrio) almacenes de bienes no peligrosos carreteras con densidad de tráfico baja (vehículos y pedestre)	0.03
5	Carreteras y espacios abiertos áreas lejanas (parques naturales, zonas verdes no urbanas, canteras abandonadas) carreteras con densidad de tráfico muy bajo (vehículos y pedestre)	0.001

Notas: 1) Para tener en cuenta la tipología estructural de los edificios con diferentes ventanas y otros huecos se recomienda el uso de un factor de mortalidad múltiple de 1-5 para el grupo 1A, para tener en cuenta que puedan suceder algunos incidentes con un número de muertes desproporcionado respecto los que se esperaban. 2) Para sucesos que incluyen el colapso de edificios se asume que el número de víctimas esperables sea 100.

Tabla. Muertes asociadas a un deslizamiento de referencia de 10 m de ancho y 50 m³ de volumen en Hong Kong (Wong et al., 1994)

Las muertes asociadas con un deslizamiento potencial se escalan por encima o por debajo de este movimiento de referencia. El factor de escala utilizado se basó en la anchura del deslizamiento respecto a la del movimiento de referencia:

$$\text{Factor de escala} = \text{Anchura del deslizamiento potencial} / \text{anchura del deslizamiento de referencia.}$$

Se utilizó un factor de vulnerabilidad para relacionar las muertes asociadas al deslizamiento de referencia con las esperadas por un deslizamiento potencial. La vulnerabilidad depende de varios factores entre los que se encuentran la naturaleza, la proximidad y la distribución espacial de los bienes y de la movilidad de la masa deslizada (velocidad y alcance). Ver ejemplo 5.6 más adelante.

Utilizando esta metodología el riesgo se calcula:

$$\text{Riesgo} = \text{Prob. (evento)} \times \text{Consecuencias adversas}$$

$$\text{Riesgo} = \text{Prob. (evento)} \times (\text{Muertes esperadas tras el movimiento de referencia} \times \text{Factor de escala} \times \text{Vulnerabilidad})$$

Observar que la variación de la exposición no está incluida específicamente en esta metodología. Sin embargo, la probabilidad de que una persona sea cogida en la trayectoria del derrubio (estar en el lugar y tiempo equivocados) puede ser incorporada en el modelo como sigue:

$$\text{Riesgo} = \text{Prob. (evento)} \times (\text{Muertes esperadas tras el movimiento de referencia} \times \text{Factor de escala} \times \text{Exposición} \times \text{Vulnerabilidad})$$

Esto incluiría el desarrollo de un *modelo de población* para estimar el número de personas que se espera estén en peligro en una zona peligrosa durante un periodo dado de tiempo, como se describe en la sección "exposición" de este capítulo.

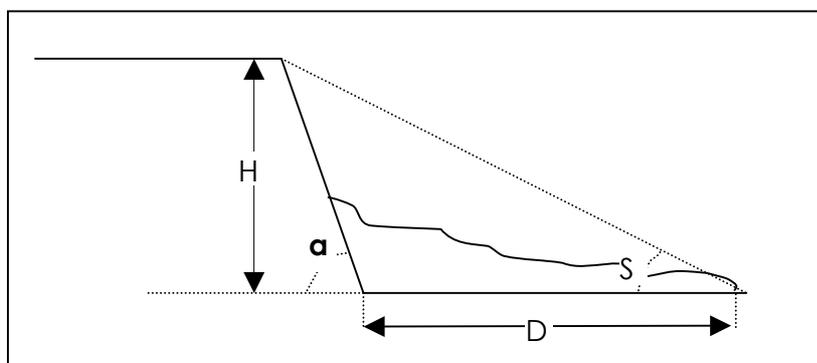
Volumen de la rotura m ³	Alcance del derrubio: grados								
	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	>60
<20			0.0015	0.0065	0.019	0.042	0.072	0.095	0.1
20-50			0.03	0.1	0.23	0.37	0.47	0.5	0.5
50-500		0.0015	0.078	0.26	0.48	0.63	0.69	0.7	0.7
500-2000		0.01	0.15	0.48	0.83	0.95	0.95	0.95	0.95
>2000	0.01	0.15	0.48	0.83	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95

Tabla 5.14 Factores de vulnerabilidad para carreteras situadas al pie de escarpes potencialmente inestables (ERM-Hong Kong, 1999).

La ERM-Hong Kong (1999) ha utilizado la metodología del movimiento de referencia para evaluar las víctimas esperables a lo largo de algunas carreteras de Hong Kong entre las que se encuentra la Castle Peak Road (una autovía de dos carriles; ver ejemplo 6.14). La autovía está dentro de la categoría 2B "carretera con alta densidad de tráfico" de la tabla 5.13, y para el movimiento de referencia le corresponde una víctima por suceso. La tabla 5.14 presenta los factores de vulnerabilidad para carreteras situadas al pie de taludes excavados (ángulo = 60°) Estos factores están en función de el ángulo de alcance (ángulo de sombra) de la masa deslizada para un rango de volúmenes de deslizamientos y alturas de talud.

El ángulo de sombra se calcula de la siguiente manera:

Ángulo de sombra $S = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Altura del talud } H}{\text{distancia desde el pie del talud } D + \text{altura del talud } H / \tan(\text{ángulo del talud } a)} \right)$



Altura de talud m	Tramo 1 D = 1,5 m	Tramo 2 D = 4,5 m	Tramo 3 D = 8 m	Tramo 4 D = 12,5 m
< 10	52,1°	40,3°	31,3°	24,0°
10 - 20	55,9°	48,7°	42,0°	35,5°
> 20	57,9°	54,0°	49,8°	45,2°

Tabla 5.15 Ángulos de sombra S de los deslizamientos que podrían cubrir distintos trazados de carretera, para diferentes alturas de talud (ERM-Hong Kong, 1999)

Para un ángulo de sombra o alcance dado, se han estimado los factores de vulnerabilidad considerando los diferentes tramos de carreteras por separado y después hallando la media. Por ejemplo considerando una rotura de 20 m³ de volumen y una altura de talud < 10 m:

- Tramo 1 (cercano al escarpe), el trazado discurre entre 1,5 y 4,5 metros de la base del escarpe por lo que será cubierto por la masa deslizada con un ángulo S igual a unos 50° (tabla 5.15), el factor de vulnerabilidad será 0.072.
- Tramo 2 (alejado del escarpe), el trazado discurre entre 4,5 y 8 metros de la base del escarpe y será cubierto por la masa deslizada con un ángulo S que ronda los 40°, esto indica un factor de vulnerabilidad de 0,019.

El factor de vulnerabilidad medio es 0,0455. La tabla 5.16 presenta los factores de escala que relacionan las víctimas esperadas para deslizamientos reales respecto al deslizamiento de referencia. Para un movimiento menor de 20 m³ el factor de escala de material a utilizar sería 0,4. Así pues, para este ejemplo las consecuencias adversas expresadas en probabilidad de muerte son:

Volumen de la rotura m ³	Anchura media m	Factor de escala
<20	4	0,4

Volumen de la rotura m ³	Anchura media m	Factor de escala
20-50	7	0,7
50-500	15	1,5
500-2000	20	2
>2000	25	2,5

Tabla 5.16 factores de escala que relacionan las víctimas esperadas para deslizamientos reales respecto al deslizamiento de referencia (ERM-Hong Kong, 1999)

Consecuencias adversas = Muertes esperadas tras el movimiento de referencia
 × Factor de escala × Factor de Vulnerabilidad = $1 \times 0,4 \times 0,0455 = 0,0182$

5.4.1 Ejemplos de cálculo de consecuencias adversas por movimientos de laderas

Modelos de daños simples

- 1.1 Retroceso de acantilados
- 1.2 Afección a tuberías enterradas
- 1.3 Movimiento lento en grandes deslizamientos
- 1.4 Caídas de rocas sobre carreteras
- 1.5 Consecuencias del corte de tráfico
- 1.6 Flujos de derrubios en Hong-Kong

Modelos de daños con múltiples resultados posibles

- 1.7 Deslizamientos que afectan a viviendas ilegales (Hong Kong)
- 1.8 Desprendimientos en una cantera ocupada por polígono industrial
- 1.9 Muerte de un niño causada por una explosión de gas tras la rotura de una conducción provocada por un deslizamiento.

Modelos de daños simples

A) Retroceso de acantilados

Una comunidad pequeña está situada cerca de un acantilado en recesión con una tasa de erosión media anual de 1,25 m/año. Si continua la recesión durante los próximos 25 años se perderán un gran número de casas e infraestructuras importantes, incluidos conducciones de gas y saneamiento (exposición = 1). Estas pérdidas serán irreversibles, cuando la tierra sea erosionada o las propiedades estén demasiado próximas al borde del acantilado para ser consideradas seguras, tanto la tierra como las propiedades no podrán ser recuperadas (vulnerabilidad = 1). La pérdida potencial de vidas humanas se considera insignificante ya que las autoridades locales prohíben que se habiten o utilicen aquellas propiedades que se consideran demasiado próximas al escarpe. La tasa de erosión se utiliza para proyectar a futuro los contornos del acantilado y determinar el año en que se perderán determinadas propiedades. (Fig 5.4). Además una estrecha franja de tierra de labor se perderá cada año. Los precios de la propiedad y del suelo agrícola se obtuvieron de agencias locales reales, mientras que el valor de los servicios e infraestructuras pueden suministrarlos los operadores.

Las consecuencias del retroceso continuo de la costa serán calculadas cada año de la siguiente manera:

$$\text{Consecuencias (año X)} = \text{Pérdida total} \times \text{exposición} \times \text{vulnerabilidad} = \text{Valor de mercado (Propiedades y Suelo)} \times 1 \times 1$$

Las pérdidas totales teniendo en cuenta la destrucción que ocurrirá en los siguientes 25 años será la suma de las consecuencias de cada año y tendrá un valor de 6.242,25 millones de libras.

B) Afección a tuberías enterradas

Un oleoducto fue construido atravesando una de las colinas deslizadas de Hong Kong. El recubrimiento de las laderas eran suelos residuales y coluviones. Estas laderas eran susceptibles a deslizamientos de derrubios superficiales (< 3m de profundidad) o a avalanchas de derrubios. La preocupación frente al riesgo apareció en un tramo de 5 Km de la conducción cuando atravesaba un conjunto de cuencas profundamente cortadas que podrían relacionarse con movimientos históricos generalizados en la ladera. La traza del oleoducto se dividió en sectores en función de la geología del sustrato y de la pendiente.

El Hong Kong Natural Terrain Landslide Inventory (NTLI; Evans and King, 1988, Evans et al. 1997, 1999) se utilizó para obtener la densidad de deslizamientos en cada sección.

Clasificación de pendiente (grados)	Area Km ²	Deslizam. recientes	Densidad de deslizam. recientes por Km ²	Deslizam. antiguos	Densidad de deslizam. antiguos por Km ²	Número total de deslizam.	Densidad total por Km ²
0-5	0,471	1	2,12			1	2,12
5-10	0,566						
10-15	0,818	1	1,22	4		5	6,11
15-20	1,356	2	1,47	8		10	7,37
20-25	2,130	3	1,41	10		13	6,10
25-30	2,870	12	4,18	32		44	15,33
30-35	2,238	11	4,91	48		59	26,36
35-40	0,996	10	10,04	18		28	28,11
40-45	0,291	3	10,30	7		10	34,33
45-50	0,076	3	39,47	2		5	65,78
50-55	0,028	2	70,43			2	70,43
55-60	0,011						
>60	0,008						
Total	11,86	48	4,05	129	10,88	177	14,93

Tabla 2.9. Ejemplo 2.1.: Estudio estadístico de deslizamientos de terreno naturales para granitos de grano grueso y pegmatitas (Evans and King, 1998)

Los datos usados fueron los de deslizamientos recientes, movilizados en los últimos 50 años, ya que la distribución de estos deslizamientos es un buen indicador de la densidad de movimientos en los últimos 50 años. La frecuencia por año se calculó dividiendo las densidades de deslizamientos por 50.

Las densidades obtenidas del NTLI se expresaron en deslizamientos / km² no por longitud de tubería. El ancho de expropiación de la tubería era de quince metros a cada lado de la traza y esta podría ser afectada por movimientos próximos que sucedan tanto ladera arriba como ladera abajo. Se asumió además que el trazado y la parte de la ladera adyacente que podría generar impacto en la tubería podría considerarse un corredor de 250 metros de

ancho. Por ello las densidades de deslizamientos se ajustaron por un factor de 0,25 para obtener frecuencias de deslizamientos por Km² a lo largo del corredor de la traza, que ya podrían utilizarse como probabilidades anuales de rotura. Tabla 5.18

Sec	Long Km	Pend°	Geol	desl. / km ²	Densidad norm.	deslizam. / año	Vulnerab	Frecuencia rotura/año	Pérd potenc	Riesgo mill. \$
1	1,5	35-40	GC	10,04	3,77	0,0753	0,0375	0,0028	15	0,042
2	0,4	30-35	GF	22,8	2,28	0,0456	0,0375	0,0017	15	0,026
3	0,7	30-35	FT	11,63	2,04	0,0407	0,0375	0,0015	15	0,023
4	0,1	35-40	GF	22,7	0,57	0,0114	0,0375	0,0004	15	0,006
5	1,3	25-30	CBS	17,46	5,67	0,1135	0,0375	0,0043	15	0,064
6	0,5	25-30	CS	19,81	2,48	0,0495	0,0375	0,0019	15	0,028
7	0,5	20-25	CS	14,04	1,76	0,0351	0,0375	0,0013	15	0,020
Tot	5					0,37		0,014		0,209

Tabla 5.18. Ejemplo 5.2: Modelo de consecuencias para conducciones enterradas

La tubería será vulnerable solo a determinado un porcentaje de todos los deslizamientos que afectan al corredor. Se asume que solo aquellos con más de 20 metros de ancho pueden alcanzar a la tubería. El NTLI muestra que solo el 15% de todos los deslizamientos cumplen esta condición (Evans et al., 1997). Estos deslizamientos mayores de 20 metros no todos tienen la misma intensidad y por tanto causarían el mismo impacto en la tubería. Se asume que solo el 25% podrán romper la tubería. Por tanto el factor de vulnerabilidad utilizado en este estudio será $0,0375 = 0,15 \times 0,25$.

El factor de exposición no se utiliza ya que la tubería es un bien inmóvil (exposición = 1).

Las consecuencias de la rotura de la tubería incluyen daño ambiental y costes de limpieza asociados al vertido de petróleo. Se han estimado en una media de 5 millones de dólares por evento. Además las interrupciones en el suministro pueden durar de días a semanas dependiendo de la escala y localización de la rotura durante el evento de deslizamiento. La duración media de las interrupciones de suministro es de 10 días. Como la tubería transporta 40 000

barriles de petróleo al día (coste estimado de 1 millón \$) una interrupción de 10 días costará unos 10 millones de \$ en operaciones comerciales.

Para cada rotura particular el riesgo se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Riesgo (sección 1)} = \text{Prob. de evento} \times \text{Consecuencias adversas} = \text{Peligrosidad} \\ \times \text{coste total} \times \text{factor de vulnerabilidad} = \text{Peligrosidad} \times 15 \text{ mill. } \$ \times 0,0375.$$

El riesgo medio a lo largo de un trazado de 5 Km. en una zona susceptible a deslizamientos será la suma de los riesgos individuales para cada tramo.

En el ejemplo del cuadro el riesgo medio será de 0,209 millones al año, con un 50% del riesgo total causado en los tramos 1 y 5. Estas secciones constituyen el 56% del trazado, lo que implica que otras secciones tienen un mayor nivel de riesgo. Dividiendo el riesgo de cada sección por su longitud obtendremos un nivel de riesgo relativo, observando que este es mayor en dos tramos relativamente cortos el 2 y el 4. Esto ayudará a priorizar las decisiones de utilizar medidas estabilizadoras.

C) Movimiento lento en grandes deslizamientos

La pequeña población de Runswick Bay, en la costa norte de Yorkshire, UK, está situada sobre un deslizamiento complejo activo desarrollado en un till glaciar. además de un continuo movimiento de creep o reptación de alta o muy alta intensidad, algunos movimientos lentos que ocurren durante periodos de intensas lluvias. La mayoría de los edificios del lugar fueron construidos en época victoriana. La mayoría han sufrido daños por los efectos acumulados (Rozier and Reeves, 1979). La estimación del daño se realizó mediante un reconocimiento sistemático de los daños actuales en carreteras y estructuras. Este reconocimiento incluyó la valoración del tipo y magnitud del daño, usando una clasificación basada en las directrices fijadas por el Building Research Establishment (1981) y por Alexander (2002; Tabla 5.4).

Para obtener una indicación del riesgo, un panel de expertos estimó los daños potenciales para un rango de escenarios de reactivación de movimientos de ladera:

Escenario 1: Un episodio de movimiento de terreno importante producido por lluvias intensas que exceden el umbral de precipitación invernal (probabilidad anual de 0,04).

Escenario 2: Un episodio de movimiento de terreno grande producido por lluvias intensas que exceden un umbral de precipitación invernal extremo (probabilidad anual de 0,01).

Los efectos de los movimientos en términos de daño a las propiedades (Ej. separar edificios) que se encuentran dentro del deslizamiento se estimó para cada bloque en el que se dividió el deslizamiento. En cada bloque se asumió que el nivel de daño variaría a lo largo de cada unidad dependiendo de su localización precisa. La metodología utilizada para estimar la incertidumbre del nivel de daño según la ubicación fue:

- a. calcular el número de propiedades existentes en cada bloque y el valor medio de estas propiedades (valor total / n° de propiedades).
- b. establecer, para ambos escenarios, el porcentaje de la superficie del bloque que podría ser afectado por movimientos del terreno de diferente magnitud (Ej. el factor de peligro). Pudo observarse que el daño estaba generalmente localizado en zonas de borde de bloques deslizados, donde se podían observar bandas estrechas de peligro severo. Así pues, el grado de peligrosidad puede variar dramáticamente en menos de un metro de la expresión superficial de la superficie de deslizamiento de cada bloque deslizado. Aunque una propiedad sea dañada por movimiento diferencial, puede haber otra propiedad cercana que no sufra daño alguno.
- c. relacionar el comportamiento de la peligrosidad con la distribución de la propiedades para obtener el porcentaje de propiedades que probablemente serán afectadas por los distintos niveles de movimiento (Ej. factor de exposición). Estas proporciones se establecieron mediante acuerdo del panel de expertos en base a evidencias históricas.
- d. el porcentaje de cada bloque afectado por las distintas magnitudes de movimiento en cada escenario se convirtió en seis niveles de daño (Ej. "no afectado" hasta "destruido"), cada uno de los cuales tiene un

correspondiente porcentaje específico de valor medio de la propiedad. Este factor de vulnerabilidad se obtuvo del panel de expertos.

El método se ilustra mediante la predicción del daño debido a movimiento del terreno en un bloque del deslizamiento llamado Bloque 1. En este bloque hay 25 propiedades con un valor medio de 100.000 libras (valor obtenido de las agencias estatales locales). Para estimar el impacto probable de los movimientos del terreno asociados a cada escenario en las propiedades se definió un rango de factores de exposición. Los resultados son:

Escenario	Prob. anual		No afectado	daño ligero	daño moderado	daño serio	daño severo	daño total	valor total	riesgo
Episodio de movimiento significativo	0,04	% propiedades afectadas	0,5	0,25	0,15	0,05	0,05	0,00	137,5	5,5
		Vulnerab.	0	0,01	0,1	0,25	0,5	1		
		n° propied.	12,5	6,3	3,8	1,3	1,3	0,0		
		valor total	1250	625	375	125	125	0		
		daño (miles de libras)	0	6,25	37,5	31,25	62,5	0		
Episodio de movimiento generalizado	0,01	% propiedades afectadas	0,00	0,10	0,10	0,25	0,30	0,25	1183,75	11,8
		Vulnerab.	0	0,01	0,01	0,25	0,5	1		
		n° propied.	0	2,5	2,5	6,3	7,5	6,3		
		valor total	0	250	250	625	750	625		
		daño (miles de libras)	0	2,5	25	156,25	375	625		

Notas: Daño = Número de propiedades (25) × Porcentaje afectados × Valor medio (100.000 libras) × Factor de vulnerabilidad. Daño Total = Σ Daño de cada clase Riesgo = Probabilidad de cada escenario × daño total.

Tabla 5.19 Modelo de consecuencias para el Bloque 1 (25 propiedades con un valor medio de 100.000 libras)

Las implicaciones económicas de la variación del impacto entre varios escenarios de deslizamiento se refleja en los diferentes niveles de pérdidas, o lo que es lo mismo, la vulnerabilidad de los bienes varía con la escala e intensidad de los movimientos asociados a cada escenario. La vulnerabilidad

se define como un nivel de año potencial, o grado de pérdidas, para un bien particular (expresado en un escala de 0 a 1) sujeto a un deslizamiento de una determinada severidad. Las estimaciones de la vulnerabilidad estarán basadas en la relación inferida entre la severidad del movimiento de terreno y el porcentaje del valor de la propiedad que debería gastarse para su reparación. Por ejemplo, se espera que para un daño moderado resulten unas pérdidas del 10% del valor total de la propiedad y para la destrucción total estas pérdidas sean del 100% del mismo valor total (Tabla 5.19).

D) Caída de rocas sobre una carretera

Una carretera de montaña de British Columbia está construída junto a un escarpe regularmente afectado por desprendimientos de roca. Historicamente, los desprendimientos tenían lugar con un frecuencia de cinco por año, bloqueando la carreteras y siendo una seria amenaza para las personas que transitaban por la misma. La probabilidad de que se produjera un accidente fatal para un ocupante de un vehículo era:

$$\text{Risk} = \text{Prob (Desprendimiento)} \times \text{Exposición} \times \text{Vulnerabilidad}$$

La Exposición es la probabilidad de que un vehículo ocupe el mismo lugar que en el que se está produciendo el desprendimiento.

Asumiendo que hay un tráfico medio de 100 vehículos por hora circulando a una velocidad media de 50 Km/h, entonces la porción de carretera ocupada instantáneamente por un vehículo será:

$$\text{Exposición} = (\text{Número de vehículos por hora} \times \text{Longitud media de los vehículos } m) \div \text{Velocidad (m/hr)} = (100 \times 5) \div 50.000 = 0.01$$

La probabilidad de que un desprendimiento alcance a un vehículo se obtuvo mediante una distribución binomial utilizando el número de caídas por año (cada una es un ensayo separado en el modelo binomial, ver sección "eventos múltiples" en el capítulo 4) y la probabilidad de un resultado diferente (alcanzado o no alcanzado, dependiendo de la exposición):

$$\text{Prob. (Impacto en vehículo)} = 1 - (1 - \text{Exposición})^{\text{número de caídas al año}} = 1 - (1 - 0.01)^5 = 4,9 \times 10^{-2}$$

Si asumimos que el tráfico está uniformemente distribuido a lo largo del tiempo y del espacio durante todo el día (Ej no hay variación temporal en la exposición) entonces la probabilidad de que un vehículo ocupe el mismo espacio que el desprendimiento es 1.0.

La probabilidad anual de que un desprendimiento alcance a un coche en movimiento es:

$$\text{Prob. de accidente} = \text{Prob. (Impacto en vehículo)} \times \text{Prob. (Vehículo ocupe el lugar del desprendimiento)} = 4,9 \times 10^{-2} \times 1$$

Si el desprendimiento alcanza el vehículo, se usará un factor de vulnerabilidad para estimar la probabilidad de pérdidas de vidas en el accidente. Este factor se basa en el hecho de que solo el 25% de la longitud de un vehículo está ocupada por pasajeros y que solo uno de cada tres desprendimientos es tan severo como para causar la muerte. Entonces, el factor de vulnerabilidad es $0,25 \times 0,33 = 0.0825$

La probabilidad anual de que un desprendimiento alcance a un vehículo que circula por la carretera causando pérdidas de vidas es de:

$$\text{Prob. (accidente fatal)} = \text{Prob. (impacto en vehículo)} \times \text{Prob. (vehículo ocupando el lugar del desprendimiento)} \times \text{factor de vulnerabilidad} = 4,9 \times 10^{-2} \times 1 \times 0.0825 = 4,04 \times 10^{-3}$$

E) Daños producidos por cortes de tráfico: desprendimientos y corte de carretera.

Una carretera de montaña que une a dos pueblos pequeños en Escocia se bloquea regularmente por desprendimientos lo que da lugar a que el tráfico deba desviarse por caminos que circundan el área afectada. Las consecuencias de estos cortes temporales pueden medirse en términos de costes de transporte adicionales que resultan del desvío de tráfico (Ej carburante y lubricante adicionales, costes de depreciación por viajar más lejos a una velocidad diferente) y los costes ocasionales causados por el retraso (Ej. tiempo perdido u horas extras en jornada laboral). Hay que

remarcar que el cierre de una carretera provoca trastornos no solo en la carretera cortada sino en los tramos alternativos del desvío provisional.

En el modelo de consecuencias aplicado a este ejemplo, el factor de exposición se representa como el valor medio de vehículos y ocupantes que son usuarios de la carretera. La vulnerabilidad al corte de tráfico es asumida como 1,0 ya que si un usuario desea viajar entre los dos pueblos en un día de desprendimientos, tendrá inevitablemente que gastar más tiempo y dinero. Así pues los factores que influyen en la escala de costes por interrupción del tráfico son:

- Flujo de tráfico
- flujo de tráfico como porcentaje de la capacidad total de la carretera
- frecuencia de desprendimientos
- tiempo de corte de la carretera afectada
- longitud del desvío
- tipo de vías que componen el desvío

Los escenarios de desprendimiento se identificaron por medio de expertos (ver sección estimación de la probabilidad mediante juicio de expertos en el capítulo 4):

- Escenario 1: Un desprendimiento pequeño ($< 100 \text{ m}^3$) cuya consecuencia es el corte de la carretera durante un día, durante el cual los equipos de mantenimiento retiran el material caído (prob. anual estimada 0,3)
- Escenario 2: Un desprendimiento relativamente pequeño ($< 1.000 \text{ m}^3$) cuyo resultado es el corte de la carretera durante cinco días, durante los cuales se retirará el material y se repararán los daños en la carretera (prob. anual estimada 0,05)
- Escenario 3: Desprendimiento importante ($> 10.000 \text{ m}^3$) cuyo resultado es el corte de la carretera durante cincuenta días, durante los cuales se

retirá el material, se realizarán trabajos de estabilización del escarpe y se repararán los daños en la carretera (prob. anual estimada 0,05)

Los efectos del corte de la carretera para cada uno de los tres escenarios han sido calculados mediante el método de Parker et al. (1987), en forma de costes adicionales de transporte y costes ocasionales. Las pérdidas incluirán:

a) Los costes de transporte adicionales, que son función del tipo de vehículo y de su velocidad:

$$\text{Costes de transporte adicionales} = a + b / v + cv^2 \text{ (peniques/Km UPC)}$$

donde a, b y c son coeficientes obtenidos de la tabla 5.20, y v es la velocidad en Km/h.

Tipo de vehículo	Parámetros combinados para vehículos de gasolina y diesel		
	a	b	c
Coche	3,87	32,47	0,000 043 0
Vehículo de mercancías ligero	4,76	62,83	0,000 057 7

Tabla 5.20. Ejemplo 5.5: Parámetros de cálculo de costes de funcionamiento de vehículos (fom Highways Agency, 1997)

b) Costes ocasionales causados por el retraso: estos costes se pueden estimar a partir de los valores de la tabla 5.21.

Tipo de vehículo	Ocupación total	Valor del tiempo: (peniques / hora)
Coche	1,65	673,6
Vehículo de mercancías ligero	1,47	1166,7
Media para todos los vehículos en carretera	1,71	784,4

Tabla 5.21. Ejemplo 5.5: Ocupación de vehículos y valoración del tiempo (fom Highways Agency, 1997)

El cálculo del corte de carretera se calculó mediante los pasos siguientes tanto para el caso sin desprendimiento como con desprendimiento:

1. Diseño de un diagrama que incluya la carretera y las vías alternativas en el caso de corte de tráfico. En la figura 12 se esquematiza como en situaciones de desprendimiento y corte en los tramos A o B, el tráfico que normalmente circula por los tramos A, B y C es desviado por una ruta secundaria compuesta por los tramos D-E-F. Cada tramo tiene asignada una clase de vía.

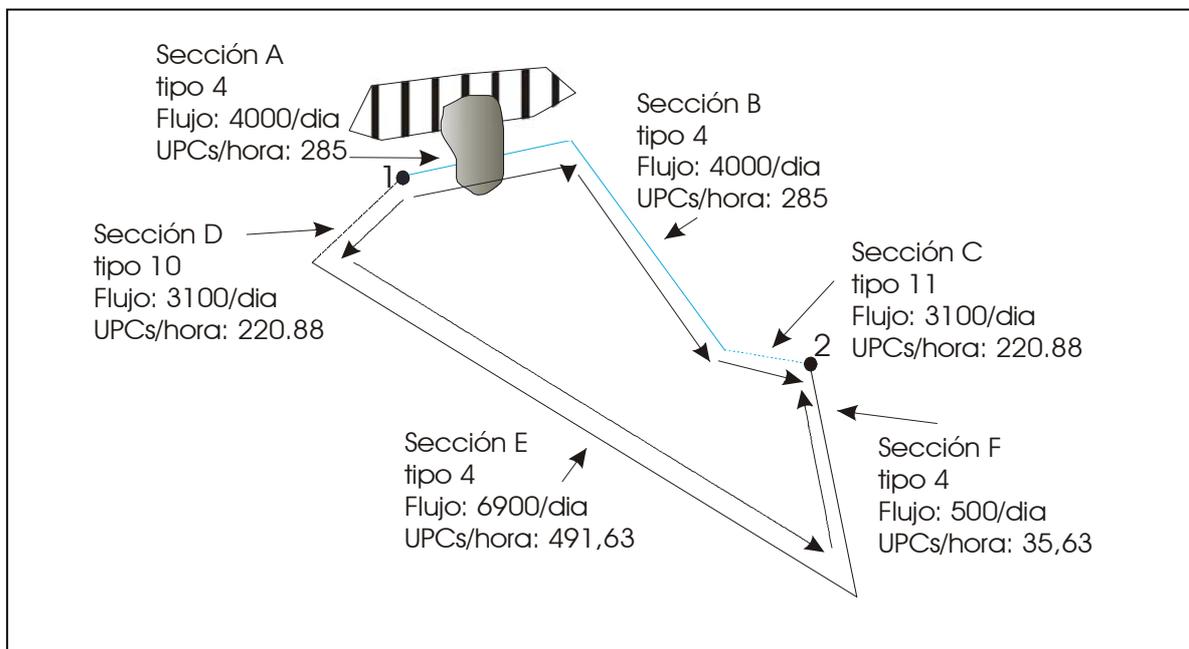


Figura 12. Esquema para la gestión de desprendimientos que afectan a vías de comunicación

2. Establecer el flujo medio de vehículos en cada tramo a partir de estadísticas oficiales obtenidas del conteo de vehículos.
3. El flujo a lo largo de cada tramo es convertido en Unidades de pasajeros por coche (UPC) para indicar el número de usuarios en cada tramo (conductores y pasajeros) teniendo en cuenta un flujo mixto de vehículos (coches, vehículos ligeros, autobuses, camiones, etc.) En este ejemplo el flujo de tráfico se ha multiplicado por 1,71 que es la ocupación (número de personas en el vehículo) media de

los vehículos en esta carretera. $UPC/h = (\text{Flujo/día} \times 1,71) / 24 \text{ h}$
(Tabla 5.21)

4. La velocidad media a lo largo de cada sección se calculó con la tabla 5.22 que relaciona las velocidades de flujo en cada tramo.

Tipo de carretera	Clase	Velocidad en el límite del flujo libre	Capacidad en el límite del flujo libre: UPCs/hora/vía	Capacidad máxima: UPCs/hora/vía	Velocidad para flujo libre a límite de capacidad: Km/h
4	Carretera de doble sentido	63	400	1400	55
10	Carretera de doble sentido urbana	35	350	600	25
11		25			

Tabla 5.22 Ejemplo 5.5: Relaciones de velocidades de flujo en carreteras (Fuente: Parker et al., 1987)

Para la clase 4 (carretera de doble sentido) la velocidad del tráfico es de 63 Km/h con un flujo máximo de 400 UPCs. En el límite de capacidad (LC) la velocidad de flujo será 55 Km/h. Entre el límite de flujo libre (LFL) y la capacidad límite de 1400 UPCs, la velocidad disminuye a medida que el flujo aumenta. A 600 UPCs por hora:

$$\text{Velocidad} = \text{Velocidad (LFL)} - ((\text{Velocidad FL-LC}) \times ((\text{UPCs-UPCsLFL}) \div 1000)) = 63 - ((63-55) \times ((600-400) \div 1000) = 61,4 \text{ Km/h}$$

Cálculo de costes:

1. El coste de recursos por hora se calculó multiplicando el coste medio de transporte adicional por el número de vehículos y la longitud de cada sección:

Coste de recursos: Coste transporte adicional × Número de vehículos × longitud de sección.

(los valores de a, b y c se obtiene de la tabla 5.20, para simplificar se han utilizado únicamente los correspondientes a los coches.)

2. El coste de retraso se calcula a partir de los valores del tiempo de la tabla 5.21, ajustados a las condiciones de la carretera:

Coste de retraso: Valor del tiempo × UPCs/hora × Longitud de sección/velocidad

Se utilizó un valor medio del tiempo de 784,4 peniques/hora

3. El coste del corte de carretera (expresado en coste por hora) es la diferencia entre el coste de recursos y de retrasos en el caso de carreteras libres (sin desprendimientos) y carretera cortada (con desprendimiento)

Coste del corte de carretera = Coste con deslizamiento – Coste sin deslizamiento.

Los resultados de este análisis se presentan en el siguiente cuadro:

	Longitud	tipo	flujo/día	UPCs/hr	Velocidad Km/h	Coste de recursos	Coste de retraso	Coste total Peniques /hora
Sin corte								
A	3,2	4	4000	285	63	4.156,04	11.355,12	15.511,17
B	5,5	4	4000	285	63	7.143,20	19.516,62	26.659,82
C	1,8	11	3100	220	25	2.066,07	12.474,31	14.540,38
Total	10,5						43.346,05	56.711,37
D	2,5	10	3100	220	35	2.678,88	12.375,31	15.054,19
E	13,1	4	6900	491	63	29.348,80	80.186,69	109.535,49
F	4,4	4	500	35,63	63	714,32	1.951,66	2.665,98
Total	20					32.742,00	94.513,66	127.255,66

Total conjunto	30,5					32.742,00	137.859,71	183.967,03
Con corte								
D	2,5	10	6200	441,75	35	5.357,75	24.750,62	30.108,37
E	13,1	4	10900	776,63	59,99	46.463,86	133.034,14	179.498,00
F	4,4	4	4500	320,63	63	6.428,88	17.564,96	23.993,84
Total	20					58.250,49	175.349,72	233.600,21

Tabla 5.5 Cálculos de costes para cortes de carretera

Ejem A sin corte,

$Costes\ de\ recursos = (3,87 + 32,47 / 63 + 63^2 \times 0,000043 = 4,55606\ peniques / Km.$
 $UPC) \times 3,2\ Km. \times 285\ UPCs/h = 4.156,04\ peniques/h$

$Costes\ de\ retraso = 784,4\ peniques/h\ UPC \times 285\ UPCs/h \times (3,2\ Km / 63\ Km/h) =$
 $11.355,12\ peniques/h.$

Los costes del corte de carretera son 49.633,18 peniques/h = 11.911,96 £/día

Los costes de corte de carretera estimados para cada uno de los tres escenarios se calculan de la siguiente manera:

$Costes\ de\ corte\ de\ carretera\ totales = Costes\ de\ corte\ de\ carretera\ diarios \times$
 $Duración\ del\ corte.$

Escenario 1 = $11,9 \times 1 = 11.900\ £$, escenario 2 = $11,9 \times 5 = 59.500\ £$, escenario 3 =
 $11,9 \times 50 = 595.000\ £.$

F) Coladas de derrubios (debris flow) en Hong Kong

Una carretera y varios edificios situados en la base de un desmonte en Hong Kong se encuentran amenazados por su rotura potencial (500-2.000 m³ de volumen) y ser alcanzados por la masa desprendida (Wong et al., 1997). El riesgo es en parte función de la distancia que recorra la masa de terreno. Sin embargo, para un tipo de talud determinado, los deslizamientos o mecanismos

similares pueden dar lugar a rangos de distancias de alcance en función de las variaciones de pendiente (Wong and HO, 1996). Para evaluar el riesgo será necesario obtener la distribución de frecuencias para cada una de las distancias de alcance.

En este ejemplo, la distancia de alcance (run-out distance) se modelizó en función del ángulo de viaje (a), que se define como la inclinación de la línea que une el punto de máximo alcance de la masa deslizada con la cresta del deslizamiento. (Figura 13).

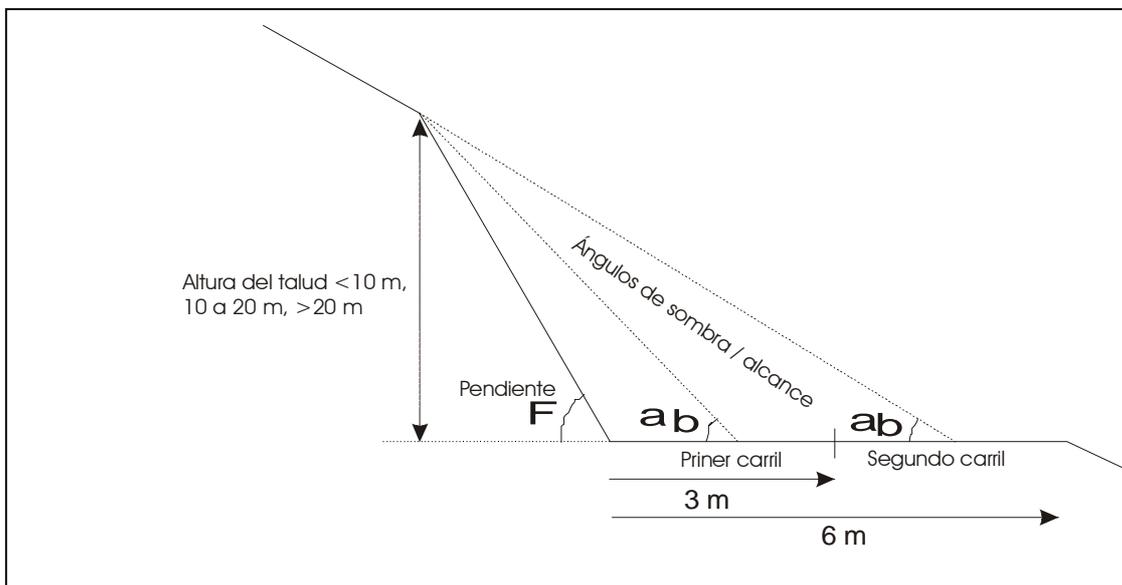


Figura 13. Esquema de alcance por coladas de derrubios.

Basándose en datos históricos se determinó que el ángulo de viaje varía entre 25° y 40° , con la distribución de probabilidades siguiente:

- Escenario 1: $a = 27,5^\circ \pm 2,5$; Probabilidad = 0,05
- Escenario 2: $a = 32,5^\circ \pm 2,5$; Probabilidad = 0,60
- Escenario 3: $a = 37,5^\circ \pm 2,5$; Probabilidad = 0,35

La ubicación de los elementos en riesgo se representa mediante el ángulo de sombra (b), definido como el ángulo de una línea que une el elemento y la cresta del deslizamiento.

Wong et al. (1997) utilizan el juicio de expertos para desarrollar una matriz de vulnerabilidad que define la probabilidad de pérdidas de vida para escenarios

que implican roturas con diferentes alcances y distintas instalaciones o valores situados a diferentes distancias del talud (Ej.: ángulos de sombra, tabla 5.24)

Frecuencia de ocurrencia de deslizamientos con diferentes alcances	Probabilidad de muerte esperable para cada rango de ángulos de sombra							
	> 60°	55-60°	50-55°	45-50°	40-45°	35-40°	30-35°	25-30°
Escenario 1 <i>a = 27,5° ± 2,5;</i> Probabilidad = 0,05	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,60	0,20	0,05
	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,60	0,20
Escenario 2: a = 32,5° ± 2,5; Probabilidad = 0,60	0,95	0,95	0,95	0,95	0,60	0,20	0,05	
	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,60	0,20	
Escenario 3: a = 37,5° ± 2,5; Probabilidad = 0,35	0,95	0,95	0,95	0,60	0,20	0,05		
	0,95	0,95	0,95	0,95	0,60	0,20		
Factor de vulnerabilidad media calculado	0,95	0,95	0,95	0,93	0,48	0,17	0,04	0,0025
	0,95	0,95	0,95	0,95	0,83	0,48	0,15	0,01

Notas: El número de arriba en cada escenario es la vulnerabilidad para una persona que se encuentre en el interior de una casa en cursiva aparece la de una persona que se encuentre circulando en el interior de un vehículo,

Tabla . Matriz de vulnerabilidad a movimientos de ladera en Hong Kong. Wong et al. (1997)

El riesgo expresado como probabilidad de pérdida de vida se calcula para cada escenario como sigue:

$$\text{Riesgo (Escenario 1)} = \text{Prob. (evento)} \times \text{Factor de vulnerabilidad}$$

$$\text{Riesgo Medio} = \sum \text{Prob. (evento)} \times \text{Factor de vulnerabilidad (escenarios 1 a 3)}$$

Para una persona que viajara en un carril determinado con un ángulo de sombra de 35-40° la probabilidad de muerte sería:

$$\text{Riesgo (escenario 1)} = \text{Prob. (evento)} \times \text{Factor de vulnerabilidad} = 0,05 \times 0,95 = 0,0475$$

$$\text{Riesgo (escenario 2)} = \text{Prob. (evento)} \times \text{Factor de vulnerabilidad} = 0,6 \times 0,6 = 0,36$$

$$\text{Riesgo (escenario 3)} = \text{Prob. (evento)} \times \text{Factor de vulnerabilidad} = 0,35 \times 0,2 = 0,07$$

Si ocurriera un deslizamiento la probabilidad media de muerte de una persona que se encuentra en este lugar sería de 0,48. Para una persona que se encuentre en un edificio situado en una zona con ángulo de sombra entre 35-40° el riesgo de muerte podría ser:

$$\text{Riesgo Medio} = (0,05 \times 0,6) + (0,6 \times 0,2) + (0,35 \times 0,05) = 0,17$$

La diferencia en el nivel de riesgo refleja los distintos grados de protección de la gente en las áreas de alcance potencial. En este ejemplo, la vulnerabilidad de una persona que se encuentra dentro de un edificio es un 50% menor que la de una persona que se encuentra circulando en un vehículo en el mismo área. La variación en la exposición no se ha tenido en cuenta en este ejemplo. Además, la probabilidad de que un usuario de la carretera esté situado en la trayectoria del deslizamiento (estar en el tiempo y lugar equivocados) puede estimarse según se vio en el ejemplo 5.4.

Modelos de daños con múltiples resultados posibles

Los ejemplos anteriores se han basado observaciones simples y deterministas de las consecuencias adversas que pueden ocasionar los movimientos de ladera. Si un deslizamiento de una magnitud particular o un determinado alcance sucede, dará como resultado un conjunto de consecuencias adversas específico. En realidad, las consecuencias reales a menudo reflejan eventos casi únicos fruto de una combinación de circunstancias generalmente inesperadas que se presentan en el momento en que ocurre el acontecimiento y mientras perduran sus secuelas.

Observemos por ejemplo, un pequeño desprendimiento de roca en un talud excavado para la vía de un ferrocarril.

- El evento sucede de noche por ejemplo a las 5:00 a.m. cuando la línea no está operativa. Es localizado por el equipo del mantenimiento de la pista que alerta a los operadores del tren y ordena al equipo de la limpieza que quite el material caído. El impacto del evento se limita al coste de las operaciones de limpieza, algunas reparaciones y un retraso en la reanudación del servicio.
- El evento sucede a las 8:00 a.m. inmediatamente antes de que un tren de pasajeros llegue a la zona de corte. El tren golpea el material caído y descarrila, en la trayectoria de un tren próximo de las mercancías que arrastra bagones que contienen los productos químicos peligrosos. El tren de mercancías también descarrila y descendiendo por un terraplén derrama productos químicos en un río que es importante para producir salmones. Los impactos del evento incluyen la pérdida de vidas en el tren de viajeros, del conductor del tren de mercancías, el trauma que afecta a muchos de los sobrevivientes y los equipos de rescate, la destrucción y el daño a la infraestructura ferroviaria, retrasos importantes del servicio, la contaminación a largo plazo del río, pérdida de reservas de salmón que conduce a una reducción en la renta turística y en la economía local, seguida por la bancarrota de algunos hoteles y de negocios locales.

La suerte, por lo tanto, es el determinante más importante de las consecuencias adversas, como queda claramente ilustrado en el siguiente informe de un accidente de ferrocarril real ocurrido en 1883:

Este singular accidente que cortó el ferrocarril de Cambrian, tuvo lugar en Vroig en la mañana del día de año nuevo. La escena se sitúa en un punto entre Llyngwritl y Barmount, donde las vías bordean la costa de la bahía de Cardigan. A unos ocho pies de la línea de ferrocarril del lado del acantilado está la autopista de peaje, protegida por un muro de contención. Este muro junto con una parte de la carretera se desprendió y cayó sobre el ferrocarril. El tren de las 5:30 de Machynlleth a Pwllheli avanzaba a su velocidad normal cuando la locomotora se estrelló en la obstrucción. La locomotora y el depósito de carbón rodaron por el precipicio hasta quedar a una distancia de unos cincuenta pies de la orilla del mar. El maquinista y el fogonero murieron

instantáneamente, sus cuerpos fueron limpiamente mutilados por las rocas puntiagudas. Los cuatro vagones, que con la locomotora y el depósito de carbón componían el tren, no pasaron el precipicio. El primer vagón se giró y quedó sobresaliendo parcialmente por el acantilado, el enganche entre este y el depósito de carbón afortunadamente se partió. El segundo vagón se giró entre los escombros, mientras que los dos restantes no se salieron de los carriles. El grado del desastre fue menor por un segundo deslizamiento, que ocurrió mientras el tren llegaba al lugar, este suceso previno a los pasajeros que estaban viajando en el tren. El capitán Pryce de Cyffeonydd Welshpool, vicepresidente del ferrocarril cambriano, estaba en el vagón volcado, pero él, así como los otros pasajeros, escapó maravillosamente sin lesión alguna. (The Graphic, 13 de enero de 1883).

Para intentar incluir un rango de posibles resultados en la evaluación de riesgo es necesario desarrollar modelos de múltiples consecuencias (escenarios de consecuencias) y evaluar su probabilidad de ocurrencia. Así, el riesgo asociado a un efecto producido por un determinado movimiento de ladera (Ej evento) se puede representar como:

$$\text{Riesgo} = \text{Prob. (evento)} \times \text{Prob. (consecuencias en el escenario 1)} \times \text{Consecuencias adversas (en el escenario 1)}$$

El riesgo asociado con todos los efectos posibles que podrían ocurrir será:

$$\text{Riesgo total} = \text{Prob. (evento)} \times \sum \text{Prob. (consecuencias adversas} \times \text{(Consecuencias adversas en los escenarios 1 a n))}$$

La visión probabilística de las consecuencias es particularmente útil para el *análisis retrospectivo* de una consecuencia particular después de que haya sucedido. Por ejemplo, puede ser útil demostrar que, en el caso del ejemplo simple utilizado anteriormente, habría una probabilidad de uno entre diez millones de que chocaran dos trenes después del desprendimiento.

Este tipo de problemas se presta en sí mismo a utilizar *árboles de eventos* (ver la sección estimación de la probabilidad a partir de juicios de expertos en el capítulo 4) para establecer el rango de resultados que podrían ser ocasionados por un evento concreto. El juicio experto se necesita para identificar todos los componentes significativos de los escenarios de

consecuencias y después realizar estimaciones en cada nodo a lo largo del árbol del evento. Por ejemplo, suponiendo un evento (E), tal que sea un desprendimiento de bloques que afecta a una carretera, que tiene una probabilidad de ocurrencia de $P(E)$. Si este evento ocurriera, la exposición (L) de los bienes tendría una probabilidad condicional $P(L | E)$. De igual manera, el impacto (I) tendría una probabilidad condicional $P(I | L)$ dado este nivel de exposición. La probabilidad de este escenario de consecuencias, o cadena de eventos, ocurra es:

$$\text{Probabilidad del escenario de consecuencias} = P(\text{Evento}) \times P(L | E) \times P(I | L)$$

La metodología de *árbol de evento* utiliza *lógica predictiva* para a partir de un evento de rotura simple examinar las posibles consecuencias del mismo. Un método alternativo es identificar un escenario concreto (Ej. dos trenes colisionando) y usar la *lógica retrospectiva* para establecer como pudo ocurrir el accidente, es decir las relaciones causa efecto que gobernaron el accidente o *evento superior*. Las combinaciones de factores necesarios para generar un evento superior determinado se determinarán mediante el uso de *árboles de fallos*. (Ej. Fussell, 1973, 1976; Kumamoto and Henley, 1996).

Trabajando hacia atrás desde la parte superior del árbol, las condiciones previas requeridas se establecen cada vez más en detalle. Los factores individuales se agrupan mediante una *puerta "o"* o una *puerta "y"* para demostrar si es necesaria la ocurrencia de un factor u otro o de ambos al mismo tiempo. La probabilidad de una precondition sea satisfecha puede obtenerse de la estadística histórica (Ej. la frecuencia de fallo de los sistemas de alerta temprana) o a partir del juicio de expertos. El análisis mediante árbol de fallos permite obtener información muy útil respecto a la probabilidad de ocurrencia de un evento superior o accidente y los "camino causa-efecto" por los cuales tal acontecimiento podría ocurrir. Los esfuerzos para mejorar la seguridad de la ladera (mitigación) se pueden enfocar y refinar usando los resultados de este análisis.

G) Deslizamiento del frente de una cantera en Hong Kong tras un episodio de lluvias que puede afectar a viviendas ilegales.

Estimación de las consecuencias mediante el método del árbol de eventos, método prospectivo.

La barriada de chabolas de The Lei Yue Mun en Hong Kong está situada al pie de una ladera de 20 a 40 metros de alto cuya pendiente alcanza entre 65 y 80°. En esta ladera se han desarrollado en el pasado tareas de extracción de áridos durante el pasado siglo XX (Ho et al., 2000). El terreno natural del frente de la cantera alcanza cerca de 200 metros sobre algunas casas del poblado ilegal. Tanto la ladera natural como los taludes de la cantera han experimentado inestabilidades a lo largo de la historia. Numerosos eventos de grandes deslizamientos ocurrieron durante o inmediatamente después de un periodo de intensas lluvias en Agosto de 1995, que causaron grandes daños en las viviendas. La pérdida de vidas pudo evitarse ligeramente por la evacuación de personas durante la tormenta.

Para modelizar las consecuencias de la actividad de deslizamientos en este lugar se utilizó una metodología de árbol lógico de eventos (event tree), como parte de una evaluación del riesgo para fundamentar las decisiones a tomar a cerca de la necesidad de reubicar las chabolas (Smallwood et. al., 1997). La metodología adoptada fue la siguiente:

1. Estimar la frecuencia de los procesos de deslizamiento en el lugar, mediante una revisión de fotos aéreas que cubrían un periodo de 55 años (1940-95). Se reconocieron un total de 115 eventos de deslizamiento.
2. Estimar el alcance potencial de los deslizamientos de diferente magnitud utilizando el modelo de distancia de alcance de Wong and Ho (1996), para determinar el "ángulo de fricción aparente" que se basa en una línea proyectada desde la coronación del escarpe hasta el punto de máximo alcance de la masa deslizada (por ejemplo el ángulo de alcance) Los ángulos de fricción aparentes utilizados en este lugar se representan en la tabla 5.25.

Deslizamiento de debris	Pequeño	Medio	Grande	Muy grande	Extremadamente grande
Volumen m³	<50	50-500	500-5.000	5.000-50.000	>50.000
Ángulo de fricción aparente	47	43	35	32	30

Tabla 5.25 Ángulos de fricción aparentes para coladas de derrubios de diferente volumen (Según Smallwood et al: 1997)

3. Clasificación de peligro de cada evento de deslizamiento con distinto alcance potencial en tres categorías o niveles – alto, medio y bajo – en base al juicio de expertos. El peligro asociado a un determinado evento de volumen dado se reduce a medida que se incrementa la distancia entre el alcance y el pie del talud. Como se observa en la figura 14, solo se consideran de bajo peligro a los deslizamientos pequeños cuando afectan a las zonas próximas al talud (zonas A y B) mientras que los deslizamientos grandes tienen un peligro alto en esas zonas, intermedio en la zona C y bajo en la zona D.
4. Subdivisión del área de estudio del poblado en 149 celdas con un tamaño de 20 m por 20 m. El número de personas y la ocupación temporal en cada celda (medida de la exposición) se determinó mediante una encuesta sobre la población.
5. El establecimiento del árbol lógico de eventos para cada bloque de referencia. Árboles de eventos individuales considerados a partir de tres agrupaciones del peligro (bajo, intermedio y alto).

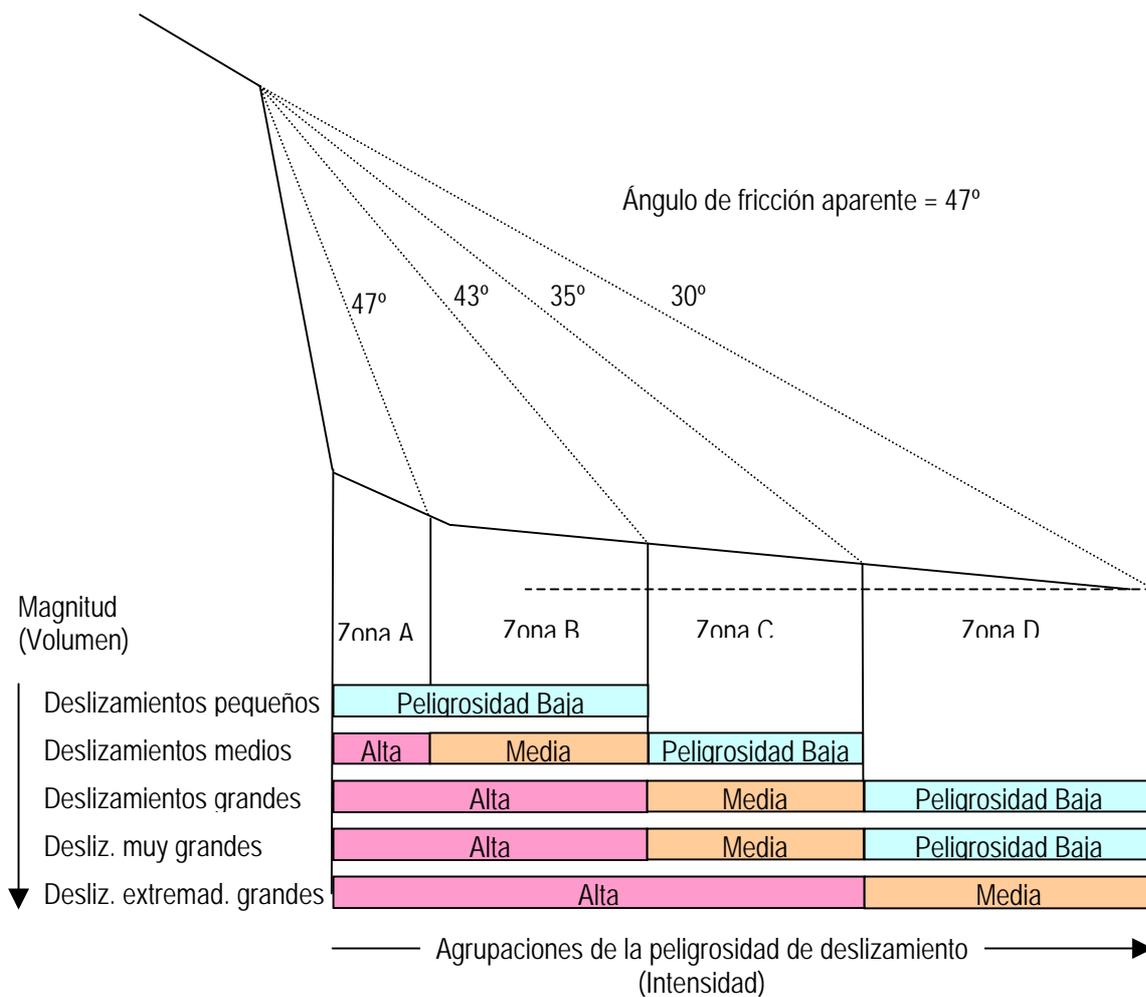


Figura 14. Esquema peligrosidad por alcance de desprendimientos.

La figura 15 representa un extracto de un árbol lógico de eventos desarrollado para uno de los bloques de referencia e ilustra los múltiples escenarios de consecuencias asociados con un deslizamiento de tierras pequeño. Cada rama del árbol lógico representa un escenario de consecuencias diferente, donde las consecuencias (por ejemplo muertos, heridos graves o leves) se determinarán con una combinación única de varios factores:

- La proximidad de los edificios afectados y la población (por ejemplo la agrupación de peligrosidad del evento de deslizamiento)
- La exposición temporal de la población (por Ej. tiempo en que ocurre el evento, noche o día, determinadas horas)
- Probabilidad de que los sistemas de alerta frente a deslizamientos fueran tomados en cuenta o no.

- La eficiencia en la respuesta de los servicios de emergencia
- La ocurrencia de peligros secundarios como el fuego.

Sistemas reglados de vulnerabilidad, basados en el juicio experto, se utilizaron para estimar el número de heridos graves, muertes y de heridos de menor importancia producidos por eventos tipo de cada una de las agrupaciones del peligro. Una estadística equivalente se determinó según:

$$\begin{aligned} \text{Mortalidad equivalente} &= \text{Número de muertos} \\ &+ [0,1 \times \text{Número de heridos graves}] \\ &+ [0.005 \times \text{número de heridos leves}] \end{aligned}$$

Los resultados se utilizaron para justificar la gestión del riesgo individual y colectivo.

Figura 15. Ejemplo de árbol lógico de eventos que muestra los múltiples escenarios posibles asociados a la ocurrencia de un deslizamiento pequeño (según Wong et al., 1997). Observar que el número de heridos se obtiene de a partir de sistemas reglados específicos del sitio en cuestión (vulnerabilidad).

Tipo de rotura	Parte del día	Alertas tomadas en cuenta	Eficiencia de la respuesta de emergencia	Peligros secundarios	Probabilidad	Escenario de consecuencias	Heridos leves	Heridos graves	Muertos	Muertos equivalentes	
Desliz. pequeño	Día	Área evacuada	Respuesta rápida	No	0,9	0,0315	1. Rotura pequeña; durante el día, las alertas fueron tomadas en cuenta y la respuesta fue buena. No hubo peligros secundarios.	0,3888	0,1296	0	0,015
				Fuego	0,1	0,0035	2. Rotura pequeña; durante el día, las alertas fueron tomadas en cuenta y la respuesta fue buena. Hubo peligros secundarios.	0,648	0,1296	0	0,016
			Respuesta pobre	No	0,9	0,0135	3. Rotura pequeña; durante el día, las alertas fueron tomadas en cuenta pero la respuesta fue pobre. No hubo peligros secundarios.	0,2592	0,2592	0	0,027
				Fuego	0,1	0,0015	4. Rotura pequeña; durante el día, las alertas fueron tomadas en cuenta pero la respuesta fue pobre. Hubo peligros secundarios.	0,5184	0,2592	0	0,029
		Área no evacuada	Respuesta rápida	No	0,9	0,2835	5. Rotura pequeña; durante el día, las alertas no fueron tomadas en cuenta y la respuesta fue buena. No hubo peligros secundarios.	0,432	0,144	0	0,017
				Fuego	0,1	0,0315	6. Rotura pequeña; durante el día, las alertas no fueron tomadas en cuenta y la respuesta fue buena. Hubo peligros secundarios.	0,72	0,144	0	0,018
			Respuesta pobre	No	0,9	0,1215	7. Rotura pequeña; durante el día, las alertas no fueron tomadas en cuenta y la respuesta fue pobre. No hubo peligros secundarios.	0,288	0,288	0	0,03
				Fuego	0,1	0,0135	8. Rotura pequeña; durante el día, las alertas no fueron tomadas en cuenta y la respuesta fue pobre. Hubo peligros secundarios.	0,576	0,288	0	0,032
	Noche	Área evacuada	Respuesta rápida	No	0,9	0,0315	9. Rotura pequeña; durante la noche, las alertas fueron tomadas en cuenta y la respuesta fue buena. No hubo peligros secundarios.	0,776	0,2592	0	0,03
				Fuego	0,1	0,0035	10. Rotura pequeña; durante la noche, las alertas fueron tomadas en cuenta y la respuesta fue buena. Hubo peligros secundarios.	1,296	0,2592	0	0,032
			Respuesta pobre	No	0,9	0,0135	11. Rotura pequeña; durante la noche, las alertas fueron tomadas en cuenta pero la respuesta fue pobre. No hubo peligros secundarios.	0,5184	0,5184	0	0,054
				Fuego	0,1	0,0015	12. Rotura pequeña; durante la noche, las alertas fueron tomadas en cuenta pero la respuesta fue pobre. Hubo peligros secundarios.	1,0368	0,5184	0	0,057
		Área no evacuada	Respuesta rápida	No	0,9	0,2835	13. Rotura pequeña; durante la noche, las alertas no fueron tomadas en cuenta y la respuesta fue buena. No hubo peligros secundarios.	0,864	0,288	0	0,033
				Fuego	0,1	0,0315	14. Rotura pequeña; durante la noche, las alertas no fueron tomadas en cuenta y la respuesta fue buena. Hubo peligros secundarios.	1,44	0,288	0	0,036
			Respuesta pobre	No	0,9	0,1215	15. Rotura pequeña; durante la noche, las alertas no fueron tomadas en cuenta y la respuesta fue pobre. No hubo peligros secundarios.	0,576	0,576	0	0,06
				Fuego	0,1	0,0135	16. Rotura pequeña; durante la noche, las alertas no fueron tomadas en cuenta y la respuesta fue pobre. Hubo peligros secundarios.	1,152	0,576	0	0,063

H) Polígono industrial situado en una cantera con desprendimientos. Ejemplo de árbol lógico de eventos.

Un pequeño polígono industrial se construyó en una antigua cantera de caliza. La urbanización consta de una combinación de estructuras ligeras (naves industriales), usadas por pequeñas empresas que elaboran componentes electrónicos, talleres de automóviles y compañías de servicios y los aparcamientos adyacentes a estas.

Después del invierno de 2000-2001 que fue especialmente lluvioso tubo lugar una actividad de desprendimientos rocosos significativa que hizo aumentar la preocupación por los riesgos sobre los negocios y, en particular sobre su personal y sus clientes.

Se desarrollaron una serie de árboles lógicos de eventos para modelizar los múltiples escenarios asociados con los posibles desprendimientos de roca de las paredes de la cantera. Se construyeron árboles individuales para los eventos de desprendimiento de un grado particular de magnitud y frecuencia. La Figura 16 presenta el ejemplo de uno de estos árboles, ilustrando la posibles consecuencias de un desprendimiento de 5000 m³ con una probabilidad anual de ocurrencia de 0.01 (establecida a partir de datos históricos y juicio de expertos). La complejidad del árbol viene dada por los parámetros considerados:

- influencia de los obstáculos naturales, tales como árboles o bloques situados en la base del frente de la cantera, los cuales podrían cuál prevenir que el desprendimiento alcanzara el límite del área desarrollada.
- la presencia o ausencia de barreras protectoras artificiales (una parte del polígono está protegido por una barrera de alambre)
- los elementos en riesgo en el fondo de la cantera, incluyendo los espacios libres, aparcamientos y naves industriales.
- el tiempo o sincronización en que el evento ocurre. Se definió un modelo simple de población teniendo en cuenta la ocupación del lugar en los diferentes intervalos del día. La jornada se dividió en seis

periodos de cuatro horas, cada uno de los cuales tendrá un valor de ocupación media para cada uno de los elementos en riesgo.

- la suerte de que el desprendimiento esquivara todos los elementos y llegara a detenerse sin causar ningún daño o pérdida humana.
- la probabilidad de que los vehículos aparcados puedan estar ocupados en el momento del desprendimiento.
- la posibilidad de que un bloque pueda atravesar una ventana o un muro de una estructura, junto con el potencial de rotura completa o parcial del edificio.

Cada rama del árbol lógico representa un escenario de consecuencias diferente. Las consecuencias fueron determinadas por un panel de expertos (ver la sección "Probabilidad estimada a través de juicio de expertos en el capítulo 4) que se basaron en juicios y experiencias de otros incidentes de desprendimiento, además de asignar las estadísticas de mortalidad esperable para cada escenario teniendo en cuenta el modelo de población.

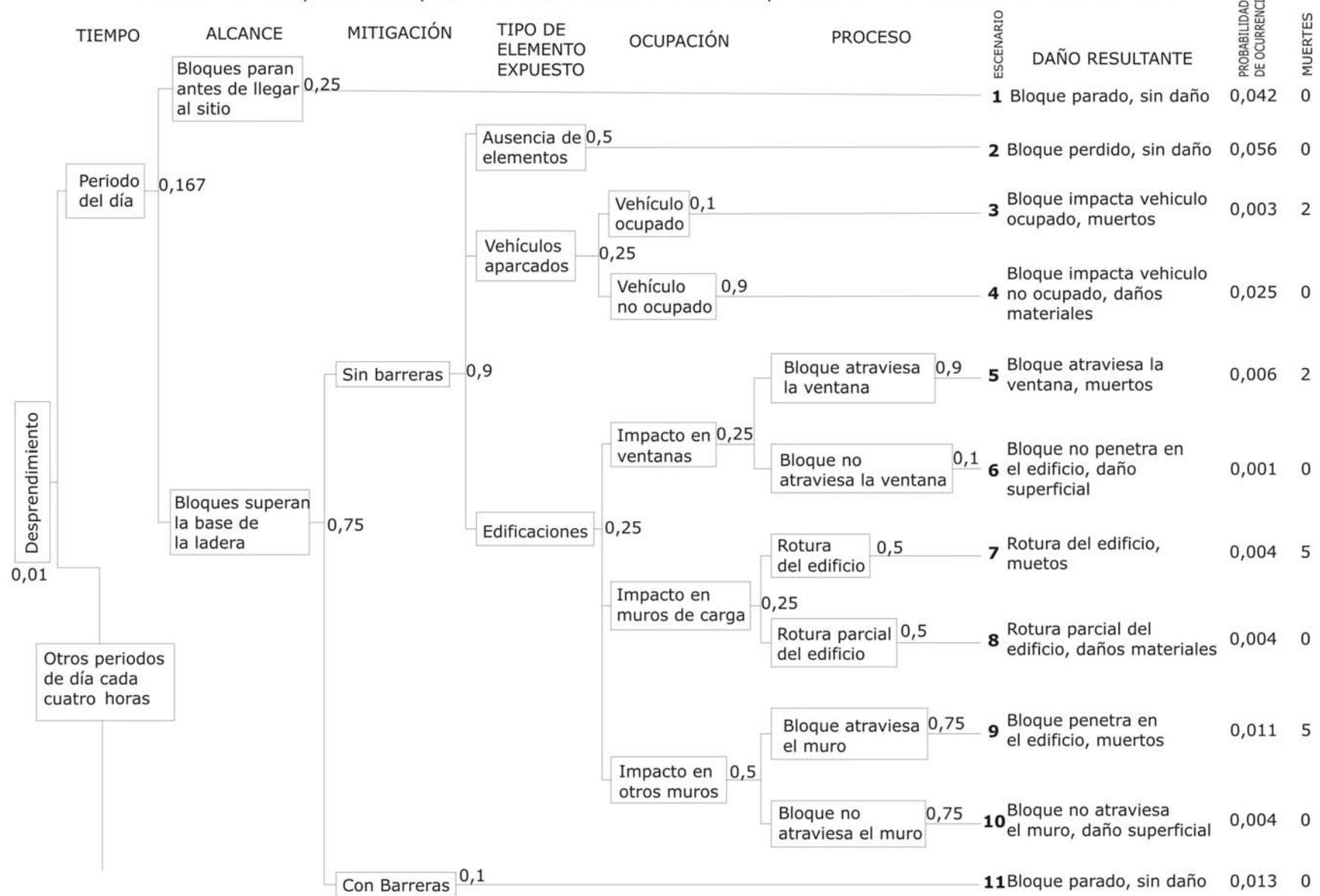
El riesgo medio en el lugar, expresado en términos de riesgo potencial de muerte, fue calculado como el producto de la probabilidad de que un evento tenga lugar y la suma de las muertes asociadas para cada uno de los escenarios descritos:

$$\text{Riesgo (Evento R)} = \text{Prob. (Evento)} \times \sum (\text{Prob. de consecuencias adversas} \times \text{Escenarios de consecuencias 1 a n})$$

Como se considera un rango de eventos según su magnitud y probabilidad de ocurrencia el riesgo total medio se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Riesgo Total} = \sum (\text{Riesgo, Eventos 1 a R})$$

Árbol de eventos para un desprendimiento de 5.000 m³ con una probabilidad de ocurrencia anual de 0.01



1) Un niño muere tras una explosión de gas en su casa causada por la rotura de una conducción enterrada en una ladera que deslizó. Ejemplo de árbol lógico de fallos.

Un niño murió tras una explosión ocurrida en una casa construida sobre un deslizamiento preexistente. La explosión tuvo lugar cuando un temporizador automático que controlaba una lavadora situada en el sótano soltó una chispa. Una conducción de gas había sido dañada como resultado de un evento de reactivación del deslizamiento y el escape de gas se fue acumulando en el sótano. La figura 5.10. representa el árbol lógico de fallos desarrollado para exponer los factores causales que dieron lugar al accidente y para estimar la probabilidad de este escenario de consecuencias tan particular. Es preciso puntualizar que este es uno de los numerosos escenarios que podrían haber sucedido tras el evento de deslizamiento, una mayoría abrumadora de ellos no habrían producido este daño fatal.

Los puntos clave en la secuencia del accidente fueron los siguientes:

- El chico estaba presente cuando sucedió la explosión. El niño estaba jugando con su tren eléctrico que había sido instalado en el suelo del sótano. El sótano era utilizado por el niño todos los días por la mañana (8 a.m. a 12 a.m.) aproximadamente durante una hora, por lo que la probabilidad de que el sótano estuviera ocupado durante la explosión se estimó en:

$$\text{Prob. (ocupado)} = \text{Prob. (explosión en la mañana)} \times \text{Prob. (Niño presente)} = 4/24 \times 1/4 = 0,0416$$

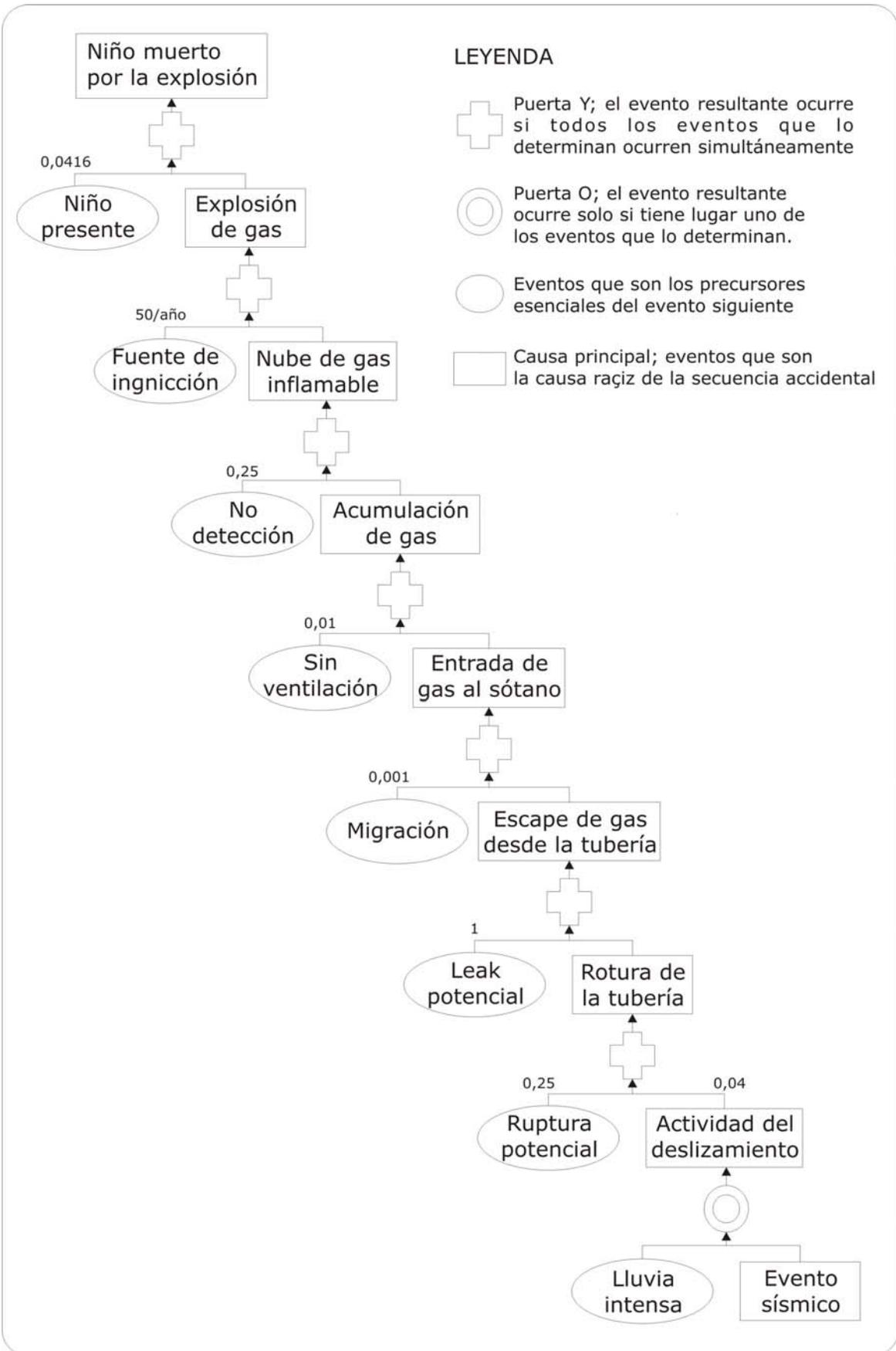
Si asumimos que el niño fue sorprendido por la explosión la probabilidad de muerte es muy alta (probabilidad = 1.0)

- La ignición de la nube de gas la produjo la chispa de un interruptor accionado por un temporizador automático. el interruptor era puesto en funcionamiento una vez a la semana (excepto cuando la familia salía durante dos semanas o durante las vacaciones anuales) y de ahí que la frecuencia de ignición fuera de 50 veces al año.

- La acumulación de gas no fue detectada porque no existían detectores de gas en el sótano. Se asume que el olor a gas no le era familiar al niño, en su presencia los padres podría haber dado la señal de alarma. La probabilidad de que el gas no fuera detectado se asumió como de un 0,25.
- La acumulación de gas en el sótano. No había ventilación mecánica en el sótano, pero la puertas no permitían el cierre hermético. La nube alcanzó propiedades explosivas durante la noche. Además, la acumulación podría haber sido disipada cuando las puertas del sótano se abrieron por la mañana. La probabilidad de la apertura de las puertas del sótano no fuera suficientes para prevenir la acumulación de la nube de gas se estimó en 0.01.
- La entrada de gas dentro del sótano. Las losas de hormigón que cubrían el sótano tenían un número importante de grietas, probablemente resultado de la pobre calidad de la construcción o el efecto de movimientos anteriores del terreno. La probabilidad de que el gas haya sido capaz de migrar desde el punto de rotura de la canalización y entrara en el sótano a través de sus grietas se estimó en 0,001
- El escape de gas de la tubería. Si la tubería de gas hubiera roto entonces, con tal que la pipa llevara el gas, habría un escape. La probabilidad de que hubiera gas en la tubería en el momento de la ruptura fue asumida como 1,0
- La rotura de la tubería. La probabilidad de que un deslizamiento tuviera la suficiente intensidad como para romper la tubería se estimó en 0,25
- La reactivación del deslizamiento. La probabilidad anual de reactivación del deslizamiento se estimó en base a registros históricos de actividad de deslizamientos en el área en 0,04.

Según el árbol de análisis la probabilidad anual de accidente fatal sería:

$$Prob. (accidente fatal) = Prob. (evento) \times Prob. (escenario) = 0.04 \times 0,0416 \times 50 \times 0,25 \times 0,01 \times 0,001 \times 1 \times 0,25 = 5,2 \times 10^{-8}$$



5.4.2 Complejidad de resultados e incertidumbres futuras,

El potencial de generación de consecuencias adversas es el producto de la peligrosidad de un peligro específico y de las condiciones de exposición en un lugar y en un tiempo determinado. Por tanto, a las incertidumbres generadas al tratar de conocer la magnitud, características y tiempo de ocurrencia de un futuro evento de deslizamiento (peligrosidad) hay de añadir las incertidumbres para saber que valores serán efectivamente afectados (exposición) y con qué grado de severidad sufrirán el impacto (vulnerabilidad).

Pequeñas variaciones en la magnitud o en el tiempo de generación del evento pueden dar lugar a dramáticas variaciones en el nivel de pérdidas, especialmente cuando se trata de vidas humanas. Por consiguiente, con objeto de definir y cuantificar los resultados posibles, podrían necesitarse un gran número de modelos de consecuencias o escenarios, especialmente en eventos complejos, múltiples o compuestos.

Es necesario hacer un balance entre los esfuerzos y recursos necesarios para la evaluación de todos los resultados posibles y las generalizaciones necesarias para intentar caracterizar el escenario "mejor estimado". Por un lado, puede ser la escala del peor escenario posible que dirige la toma de decisiones, por otro lado el análisis de tales escenarios extremos o catastróficos puede desviar la atención lejos de los escenarios con consecuencias menos dramáticas pero más frecuentes (por ejemplo el impacto en la economía local de daños recurrentes en edificios causados por movimientos lentos del terreno). Definir cuidadosamente el alcance puede ser útil para limitar cualquier análisis de las consecuencias hacia un fin determinado o una valoración específica del riesgo, pero aun así se presentarán algunos problemas para enfocar el rango completo de las consecuencias adversas.

Es importante reseñar que sean cual sean los escenarios considerados, estos tendrán una validez limitada en el tiempo, ya que la naturaleza y el valor de las cosas expuestas al riesgo generalmente están en continuo cambio, Aunque es bastante difícil predecir patrones de actividad humana a corto plazo e incluso obtener consenso en las valoraciones que se otorgan a las cosas o a los recursos medioambientales, llega a ser especialmente dura y difícil la

evaluación de las situaciones con que nos encontraremos en el futuro. Partidarios de la Futurología, han intentado predecir la naturaleza de la sociedad y como operará en diversos escenarios futuros, pero los análisis retrospectivos indican que tales "previsiones" no han sido hasta la fecha suficientemente útiles (¿porque no estamos todos vestidos con trajes de papel de aluminio y viajamos en coches voladores?).

La población aumenta, la economía se desarrolla y la progresiva proliferación de actividades humanas e infraestructuras en áreas lejanas y medioambientalmente hostiles harán que el potencial de generación de daños por movimientos de ladera aumente. Además, la mejora del nivel de vida, da como resultado el aumento del valor de la propiedad y el incremento generalizado en la posesión de bienes familiares caros, tales como televisiones, lavadoras, neveras, etc., todos ellos altamente vulnerables. Suleman et al, (1988) sugieren que el daño potencial con respecto a inundaciones alcanzaría sobre el 50% para corta duración y un 100% para eventos de inundación de larga duración, entre 1977 y 1987; una pauta similar se puede prever para deslizamientos.

Idealmente, estos escenarios considerando la posibilidad de los eventos en el futuro más lejano pueden intentar incluir resultados del desarrollo, cambios en la distribución de la población, número y concentraciones, y cambios en los valores de las cosas, aunque todo será más incierto a medida que aumente el tiempo en el futuro. En realidad, no obstante, la mayoría de las evaluaciones de consecuencias usan como referencia la distribución y el valor de los bienes actuales y los proyectan hacia el futuro, controlando de este modo la especulación.

**Anexo 1: Datos de pérdidas ocurridas por movimientos de
ladera en España y en el Mundo.**

Datos

El deslizamiento más caro en la historia de los Estados Unidos ocurrió en Thistle, Utah, en la primavera de, 1983. El coste total atribuido a este deslizamiento superó los 500 millones de dólares.

El terremoto de Loma Prieta en Octubre de 1989 desestabilizó cientos de deslizamientos en un área de 5,400 millas cuadradas. Además de los daños causados de decenas de millones de dólares en daños a la viviendas, otras estructuras y servicios, los deslizamientos bloquearon muchas vías de comunicación impidiendo en muchos casos las tareas de salvamento y rescate.

Las pérdidas debidas a movimientos de ladera en EEUU exceden los dos mil millones de dólares y entre 25 y 50 muertos al año (Krohn y Slosson, 1976 Bromhead, 1986 y USGS, 2000). Un 20% del total de daños por riesgos geológicos. Las mayores pérdidas por deslizamiento en EEUU ocurren por eventos ampliamente extendidos, Las grandes precipitaciones o los terremotos desencadenan miles de deslizamientos que causan espectaculares daños en un poco espacio de tiempo sobre grandes áreas.

En nuestro país no existen datos sistemáticos al respecto.

Impacto económico y social de los Riesgos Geológicos en España IGME 1987: pérdidas en torno a los 0.896 billones de pesetas, para un horizonte de 30 años (1986-2016) según la hipótesis de riesgo máximo, lo que representa un 11% del total de las pérdidas a nivel nacional.

Ratio beneficio coste es del 8.74. La aplicación de medidas de prevención y corrección definidas como costes (92.284 millones de pesetas), tienen un importante reflejo en la disminución de las pérdidas esperadas, definidas como beneficio (806.364 millones de pesetas)

Un problema añadido y no esperado en la construcción del canal de Panamá fue la existencia de deslizamientos de tierra desde las orillas del canal, sobre todo en el Corte Gaillard. Las reexcavaciones debidas a estos deslizamientos aumentaron alrededor de un 25% la cantidad de tierra que se había calculado remover. El coste final del canal fue de 336 millones de dólares.

Deslizamiento de Azagra en Navarra 1874, destrucción del pueblo y muerte de al menos 100 personas

Olivares 1986, flujo de margas sobre la población, no produjo daños pero la inversión en control y estabilización fue muy alta, en torno a los 1000 millones de pesetas IGME 1994. Además del gran impacto social.

En Benamejí (Córdoba) se producen movimientos de ladera que afectan al casco urbano desde el siglo XVII. El resultado es casas y calles destruidas. En 1998-99 se realizaron inversiones para el control y estabilización definitiva del movimiento por valor de 1500 millones de pesetas.

En la primavera de 1999 se produjo la reactivación del deslizamiento de Intza (Navarra) lo que puso en alerta a la población ante el temor de que pudiera ocasionar desperfectos en los edificios o infraestructuras de la zona. En 2001 se realizaron obras de estabilización por valor de 28,3 millones de pesetas.

Año	Nº deslizamientos y/o desprendimientos	Nº provincias afectadas	Nº Hundimientos	Víctimas	Daños estimados (en pesetas de cada año)
1990	17	11	2		6.900 millones
1991	5 / 10	15	4	3	4.500 millones
1992	42	20	1	4	3.534 millones
1993		16		11	3.120 millones
1994	90	24		1	8.760 millones

Tabla . Daños anuales en España por movimientos de ladera. Datos ITGE 1990-1994

Año	Ciudad/País	Nombre y tipo	Proceso desencadenante	Impacto
1911	República de Tadjik	Usoy Deslizamiento de roca	Terremoto de Usoy M=7.4	54 muertos
1919	Indonesia (Java)	Kalut lahar. Flujo de lodo de material volcánico	Erupción del volcán Kelut	5.100 muertos 104 poblaciones destruidas
1920	Ningxia (China)	Haiyuan deslizamiento		~100.000 muertos
1921	Republica de Kazakh	Alma-Ata Flujo de derrubios	Fusión de nieve	500 muertos
1933	Sichuan (China)	Deixi Deslizamiento	Terremoto de Deixi M=7.5	6.800 muertos; 2.500 ahogados cuando se rompió la presa
1939	Hyogo (Japón)	Deslizamiento de Mount Rokko /Flujo de lodo	Lluvia	505 muertos, 130.000 casas destruidas
1941	Huaraz (Perú)			5.000 muertos
1949	Republica de Tadjik (Tayikistán)	Deslizamiento de roca de Kahit	Terremoto de Khait M=7.5	De 12,000 a 20,000 muertos; 33 poblaciones destruidas
1953	Wakayama (Japón)	Deslizamiento del río Arita / Flujos de derrubios y lodo	Tifón, Lluvia	460 muertos y 4.722 casas destruidas
1953	Kyoto (Japón)	Deslizamientos de Minamiyamashiro / Flujos de derrubios y lodo	Tifón, Lluvia	336 muertos y 5.122 casas destruidas

Año	Ciudad/País	Nombre y tipo	Proceso desencadenante	Impacto
1958	Shizuoka (Japón)	Deslizamiento de Kanogawa/ Flujo de derrubios y lodo	Tifón, Lluvia	1.094 muertos y 19.754 casas destruidas
27 Oct. 1959	Minatitlán Colima (México)	Flujo de derrubios y lodo	Huracán , Pdaria=263 mm	300 muertos, 1/3 de Minatitlan sepultada. 80% del área cultivable.
1962	Ancash (Perú)	Nevado de Huascarán / Avalancha de derrubios		De 4.000 a 5.000 muertos, la mayor parte de la ciudad de Ranrahirca destruida
1963	Frulli-Venezia-Griulia (Italia)	Deslizamiento de rocas de Vaiont	Llenado del embalse en zona inestable. Ola que sobrepasó la presa de Vaiont	~2.000 muertos; daños en la ciudad de Longarone y otros 4 pueblos. Pérdidas de ~ \$970 millones en dólares americanos de 1994
1964	Alaska (Estados Unidos)	Deslizamiento de Alaska	Terremoto de 1964 M=9.4	860 millones en dólares americanos de 1994
1965	Yunnan (China)	Deslizamiento de rocas		444 muertos; 4 localidades destruidas
1966	Río de Janeiro (Brasil)	Deslizamientos de Río de Janeiro /Avalanchas y flujos de derrubios y lodo	Fuertes llluvias	~1.000 muertos
1967	Serra das Araras (Brasil)	Deslizamientos de Serra das Araras/Avalanchas y	Fuertes llluvias	~1.700 muertos

Año	Ciudad/País	Nombre y tipo	Proceso desencadenante	Impacto
		flujos de derrubios y lodo		
1970	Ancash (Peru)	Nevado de Huascarán Avalancha de derrubios	Terremoto M=7.7	18.000 muertos; La ciudad de Yungay destruida y Ranrahirca parcialmente destruida. Recorrió 16 Km a 280 Km/h.
May. 1973	Costa Rica	Deslizamiento en Tilaran Arenal	Terremoto	26 muertos y más de cien heridos, con un impacto económico estimado en 4.000.000 de dólares americanos de 1994
1974	Huancavelia (Peru)	Mayunmarca Deslizamiento de rocas y avalancha de derrubios	Lluvias intensas	~450 muertos; la ciudad de Mayunmarca destruida; la rotura de un represamiento de 150 m de alto causó grandes inundaciones río abajo
1976	Sa Mau Ping Hong Kong	Deslizamiento		18 muertos
18 May. 1980	Washington (Estados Unidos)	Deslizamiento de rocas de Mount St. Helens / Avalancha de derrubios, Lahar	Erupción del Mt. St. Helens, Hielo y nieve derretidos	El deslizamiento histórico más largo del mundo 23km de avalancha de derrubios con una velocidad media de 25 Km/hr; La superficie movilizada fue de 95

Año	Ciudad/País	Nombre y tipo	Proceso desencadenante	Impacto
				km de largo. 500 millones de \$ en pérdidas directas.
13 Dic. 1982	Región de Marche	Deslizamientos de Ancona		342 hectareas de terreno urbano y suburbano movilizadas, daños en dos hospitales destrucción de 280 edificios (865 apartamentos) desplazamiento de carreteras y ferrocarril en 2,5 Km, un muerto y 3661 evacuados. 700 millones de \$ de 1989.
1983	Utah (Estados Unidos)	Deslizamiento de derrubios de Thistle	Fusión de nieve y fuertes lluvias (El Niño)	Pérdidas totales \$400~\$600 millones en dólares americanos de 1994
1983	Gansu (China)	Salsean / Deslizamiento de loess		237 muertos; 4 poblaciones sepultadas
Sep. 1985	El Salvador.	Deslizamiento en el volcán de San Salvador		400 muertos y un impacto económico de 1.600 millones de dólares. 30 Km ² de superficie movilizada
1985	Tolima (Colombia)	Nevado del Ruiz / Flujo de derrubios, Lahar.	Erupción del Nevado del Ruiz	>20.000 muertos; cuatro poblaciones destruidas Armero; la

Año	Ciudad/País	Nombre y tipo	Proceso desencadenante	Impacto
				longitud del flujo fue de ~100 Km.
8 Oct. 1985	Mameyes, (Ponce, Puerto Rico)	Deslizamiento	Lluvias continuadas y variaciones del nivel freático.	129-180 muertos y 120-260 hogares destruidos en Mameyes. Mayor nº de muertos en USA
1986	Papua Nueva Guinea	Deslizamiento de rocas de Bairaman / Avalancha	Terremoto de Bairaman M=7.1	La ciudad de Bairaman destruida. La avalancha formó una presa de 210 m de alta que almacenó un lago de 50 millones de m ³ ; la rotura de la presa causó un flujo de derrubios de 100 metros de profundidad río abajo
1986	Guatemala	Deslizamientos en el occidente del país		75 muertos ~200 damnificados impacto económico de 10.000.000 dólares.
6 Sep. 1987	El Limón, Maracay (Venezuela)	Flujos y avalachas de derrubios.	Lluvia intensa: 174 mm en 4,5 horas, 96 mm en 15 minutos	2000000 m ³ de material movilizado. 600 muertos en la localidad de El Limón. Pérdidas 800.000 dólares.
1987	Napo (Ecuador)	Deslizamiento de Reventador	Terremoto de Reventador M=6.1	~1,000 muertos \$1.3 billones en dólares

Año	Ciudad/País	Nombre y tipo	Proceso desencadenante	Impacto
			y M=6.9	americanos de 1994
28 Jul. 1987	Valtellina	Avalancha de Valtellina		40106 m ³ de rocas y derrubios calleron de una ladera entre 2350 y 1550 msnm. Tres pueblos arrasados: Morignone, San Antonio de Morignone y Aquilone 29 muertos.
Feb. 1988	Río de Janeiro (Brasil)	Deslizamientos y desprendimientos	Lluvias intensas y prolongadas	277 muertos y 735 heridos en barrios en cerros ocupados por fabelas.
23 Jun. 1988	Catak, (Turkía)			~ 75 muertos
17 Feb. 1990	Irán	Deslizamiento de Sardasht/ Avalancha de rocas		21 muertos
Ene. 1990	Sri Lanka	Deslizamiento		33 muertos
May. 1990	China	Deslizamiento		52 muertos
14 Jul. 1990	India	Utar Pradesh / Flujo de barro		70 muertos
28 Ago. 1990	Filipinas	Deslizamiento de Nueva Vizcaya		85 muertos
21 Sep. 1990	Colombia	Deslizamiento de Medellín		20 muertos y 6 millones de dólares

Año	Ciudad/País	Nombre y tipo	Proceso desencadenante	Impacto
1990				americanos de 1990
13 Ene. 1991	Filipinas	Deslizamientos de Mindanao		21 muertos
17 Ene. 1991	Brasil	Rio de Janeiro		26 muertos
24 Feb. 1991	Papua-Nueva Guinea	Deslizamiento		200 muertos
5 Jun. 1991	Colombia	Deslizamientos de Antioquia		57 muertos
19 Jul 1991.	Colombia	Deslizamiento de Pasco y Mocoa		51 muertos
23 Sep. 1991	Yunnan (China)	Deslizamiento de Yunan		Tubo 4,5 km de longitud y murieron 216 personas de dos minutos.
9 May. 1992	Ecuador	Deslizamiento de escombrera minera	Fuertes lluvias	350 muertos
15 May. y 6 Jun. 1992	Tajikistán	Flujos de barro		258 muertos
20 jun. 1992	Mozambique	Changane River/ Flujo de barro		53 muertos
Jul. 1992	China	Deslizamientos de Beijing		228 muertos 20.000 casas destruidas y 76

Año	Ciudad/País	Nombre y tipo	Proceso desencadenante	Impacto
				millones de dólares norteamericanos de 1992 en pérdidas
1993	Nepal	Deslizamientos	Lluvias e inundaciones	917 muertos
Abr. 1993	Ecuador	Deslizamiento		300 muertos
May. 1993	Ecuador	Deslizamiento		210 muertos
Jun. 1993	El Salvador	Deslizamiento de ladera el Departamento de La Libertad		20 muertos
6 Jun. 1994	Cauca (Colombia)	Deslizamiento de Páez	Terremoto de Páez M=6.4	271 muertos; 1.700 desaparecidos; 32.000 desplazados; 16 localidades destruidas
1994	Kirguistán	Deslizamientos	Posible terremoto	150 muertos
27 Mar. 1995	Badakhsan (Afganistán)	Deslizamiento		354 muertos y 54 heridos
1997-98	San Francisco (Estados Unidos)	Deslizamientos	Lluvias (El Niño)	\$150 millones de dólares americanos de 1997 en daños directos
30 Jul. 1997	Thredbo, Australia	Deslizamiento		18 muertos enterrados en dos albergues de la estación de esquí.

Año	Ciudad/País	Nombre y tipo	Proceso desencadenante	Impacto
5 May. 1998	Sarno (Italia)	150 movimientos y 30 Coladas de derrubios y barro	Lluvias (140-170 mm día) y deforestación	137 muertos y 18 desaparecidos en Sarno, Siano, Bracigliano y Quindici. 300 millones de dólares en pérdidas
1998	Honduras	Deslizamiento del volcán Casitas. Lahar	Lluvias intensas Huracán Mitch	200.000 metros cúbicos de rocas y tierra. El Porvenir y Rolando Rodríguez - dos de las cinco comunidades alcanzadas por el alud-fueron totalmente arrasadas. 2.513 muertos.
14 al 16 Dic. 1999	Venezuela	Deslaves en la cordillera del Avila, Estado de Vargas. Avalanchas, Deslizamientos, Flujos de derrubios y lodo.	Lluvias intensas y prolongadas	5-10.000 muertos, más de 18.000 damnificados. 26.000 viviendas arruinadas.
13 Ene. 2001	El Salvador	Deslizamiento en Las Colinas en Santa Tecla	Terremoto del 13 de Enero M=7.6	600 muertos y 400 casas destruidas

Tabla Cuadro resumen de los principales movimientos de ladera ocurridos en el mundo en los últimos cien años. Modificado de Landslide, Chacón, Irigaray and Fernández, eds. A.A. Balkema/Róterdam, en base a datos obtenidos de CEPREDENAC 2002, USGS 2000, ITGE (1992-94).

Anexo 2: Mapas inventario de movimientos de ladera en España.

Los siguientes mapas inventario son fruto de la recopilación de datos sobre movimientos de ladera ocurridos en España. Los dos primeros muestran la distribución de movimientos sobre una base cartográfica provincial. El tercero muestra un mapa de susceptibilidad de movimientos de ladera realizado por el IGME sobre el que se ha dibujado el mapa inventario.

Con la información obtenida se ha confeccionado la base de datos Movimientos.mdb. La base de datos recoge eventos producidos por Movimientos del Terreno ocurridos en España. Así se han catalogado 418 movimientos de ladera desde 1830 hasta la actualidad.

En los últimos diecisiete años (1986-2002) han sido recopilados 174 Movimientos del Terreno (Deslizamientos y desprendimientos) en los que se han descrito daños, al menos de forma cualitativa.

La base está construida mediante el programa ACCESS 97, que permite la creación de tablas interrelacionadas para su consulta en función de cualquier registro de cualquier tabla. Por otro lado, la base de datos es compatible con algunos sistemas de información geográfica, en concreto con ArcView 8.1, lo que permite la representación cartográfica de la información contenida en la misma.

En la base se recoge información espacial y temporal de ocurrencia de cada uno de los fenómenos potencialmente dañinos ocurridos, así como una descripción de parámetros que describen la magnitud o intensidad de cada fenómeno. Además se incluye la descripción y valoración de daños y costes que estos han producido, a nivel de municipio, provincia y/o comunidad autónoma.

Las fuentes documentales utilizadas han sido varias:

IGME:

- Catálogo Nacional de Riesgos Geológicos, (1988). Actualización y remodelación de su base de datos
- Informes de Riesgos Puntuales (Movimientos de Ladera)
- Resúmenes de prensa (2000-2002)

CEDEX:

- Cartografía digital de cauces peninsulares

IGN:

- Cartografía digital de municipios y localidades

INE:

- Provincias (actualización a 1 de enero de 2002)
- Municipios y población (actualización a 1 de enero de 2001)
- Viviendas por municipio (actualización a 1 de enero de 1999)

Prensa:

- Agencia EFE: Servicio EFE-Data (Noticias de prensa de la agencia EFE 1986-actualidad)
- Prensa en Internet: El Mundo, El País, Heraldo de Aragón, etc...

Todos los registros de los eventos tienen referencias de los documentos y/o publicaciones utilizadas como fuentes de datos. Actualmente se están recopilando datos socioeconómicos a nivel municipal. Por ahora se dispone de índices de nivel económico (renta familiar disponible por habitante) e índices de actividad comercial, industrial y económica general, para cada uno de los 3181 municipios de más de 1000 habitantes. Estos datos son del anuario estadístico de La Caixa.

Bibliografía consultada

