

9.3. Análisis de la peligrosidad por inestabilidades

La peligrosidad puede expresarse en función de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural destructivo o perjudicial y de su energía (magnitud de la amenaza). Se incluye la ciclicidad, es decir, el cálculo de retorno del fenómeno. Se puede establecer que la peligrosidad es el producto de la probabilidad de ocurrencia por la amenaza.

P=Peligrosidad
p=probabilidad
A=amenaza

$$P = p \times A$$

En el apartado anterior se ha caracterizado la influencia de los factores condicionantes en la ocurrencia de inestabilidades, como características propias del terreno. En éste se analiza la influencia de los factores desencadenantes, como agentes externos al terreno.

Los factores que desencadenan la ocurrencia de inestabilidades de ladera en el volcán de Usulután son los sismos y el comportamiento hídrico. Debido a la dificultad que supone realizar un tratamiento estadístico de los datos con los que se cuenta (insuficientes en cuanto a la cantidad de años registrados), y de establecer una relación entre ambos eventos, no se ha obtenido un dato sobre el periodo de retorno y por tanto no se ha determinado una peligrosidad de manera cuantitativa. Sí se ha realizado un análisis cualitativo, con la susceptibilidad del terreno como base.

En el presente capítulo se realiza además un análisis de los datos disponibles así como una comparación de las fotos aéreas de los distintos años, con el fin de observar la evolución de las inestabilidades, aunque sea de un periodo de tiempo corto. Dicho análisis pretende también determinar la potencialidad del fenómeno y obtener en cierto grado una respuesta sobre el momento en qué puede ocurrir.

9.3.1. Sismicidad

La sismicidad es la principal causa de la generación de las inestabilidades, debido tanto a la ocurrencia de terremotos como a la existencia de pequeños sismos que afectan de manera continua al área de estudio. El factor sísmico de mayor incidencia en los movimientos de laderas es la intensidad de la sacudida y en segundo lugar la duración.

En cuanto a los terremotos, la aceleración vertical y horizontal de las ondas sísmicas modifica el estado natural de esfuerzos del terreno y por lo tanto puede alterar el equilibrio de

las laderas y taludes, o generar y reactivar fracturas en las que el aumento de la presión del agua puede provocar igualmente inestabilidades.

Mediante la observación de los datos de terremotos disponibles (ver anexo5/tabla1), se puede obtener un tiempo medio de ocurrencia de los terremotos que afectan al Departamento de Usulután de 10.87 años (sin tener en cuenta los dos primeros registros entre los que parece que faltan datos intermedios). Esta aproximación no corresponde a los periodos de retorno, cuya estimación precisaría de un registro más amplio de datos y de un análisis diferenciado entre terremotos de origen local y regional.

Gracias a la información aportada por los habitantes de los núcleos próximos al volcán, se sabe que durante los terremotos del año 2001 los procesos de inestabilidad de ladera fueron intensos, tanto en el mismo momento de manifestación de los sismos como durante sus réplicas los días siguientes. Esto es prueba de la gran influencia que tienen los terremotos sobre la estabilidad de las laderas.

Con respecto a los pequeños sismos cabe pensar que el continuado movimiento afecta a la estabilidad de los taludes al generar unos esfuerzos en el subsuelo, una removilización de las partículas de los materiales y una reactivación de las fallas existentes, lo que en su conjunto provoca una disminución de la cohesión del terreno.

Observando registros de sismos de los meses de marzo y junio del año 2001 (ver anexo5/tabla2) se puede destacar la ocurrencia de hasta seis sismos en un mismo día. Es un ejemplo de la continua sismicidad a la que se hacía referencia.

Se podría concluir, que la continua actividad sísmica afecta de manera muy notoria a la estabilidad de los taludes, generando inestabilidades y condiciones muy favorables para la evolución de estas, donde la influencia de otros factores, condicionantes y desencadenantes, aumentan su grado de afectación.

9.3.2. Comportamiento hídrico

En el análisis del comportamiento hídrico como factor desencadenante de los movimientos de ladera no sólo deben tenerse en cuenta las precipitaciones y su intensidad sino también el grado de saturación de los materiales, determinado por la lluvia acumulada. Se hace un estudio más detallado de las características de las precipitaciones en el capítulo 10, como factor desencadenante de las inundaciones.

El agua actúa sobre el terreno aumentando las presiones internas al introducirse en poros, diaclasas, planos de discontinuidad o fracturas del terreno. En terrenos con comportamiento geomecánico tipo suelo, el aumento de agua disminuye progresivamente las

presiones efectivas en el material, haciendo disminuir su cohesión. En el caso de diaclasas o fracturas el agua tendrá un plano más definido para infiltrarse y las presiones ejercidas serán más efectivas.

En el momento en que las presiones internas superan la resistencia al corte del terreno se producen las inestabilidades, de forma más acusada en los años siguientes a la ocurrencia de terremotos durante los que el terreno queda más susceptible por la pérdida de cohesión y generación de nuevas fracturas, favoreciendo la infiltración y disminuyendo en conjunto la estabilidad de las laderas.

La intensidad de la lluvia, como se ha indicado anteriormente, es un factor a tener en cuenta. La manera en que ocurran las precipitaciones va a determinar si el agua tiene tiempo suficiente para infiltrarse en el terreno, en caso de bajas intensidades, o si tenderá a formar parte de la escorrentía superficial, en forma de arroyada en manto o concentrada en cauces. Cabría pensar que son menos perjudiciales las altas intensidades, ya que al infiltrarse menos agua serán menores las presiones internas. Sin embargo, la escorrentía superficial actúa intensamente en la erosión de laderas, quedando éstas desprotegidas de cobertera y por tanto más susceptibles a ser afectadas por procesos gravitatorios. Por otra parte, el aumento de escorrentía superficial conlleva un aumento de caudales, y en consecuencia mayor erosión de los cauces. Esto genera una reducción del soporte de los taludes ubicados sobre estos cauces, haciéndolos más susceptibles a la ocurrencia de inestabilidades.

La lluvia acumulada determina igualmente el comportamiento del agua de las precipitaciones. En condiciones de terreno saturado no quedará espacio para la infiltración, produciéndose principalmente escorrentía superficial. En este caso tendríamos un escenario doblemente perjudicial, ya que se sumaría a las presiones internas la erosión superficial.

En resumen, las condiciones más favorables para la ocurrencia de procesos gravitatorios serían: precipitaciones intensas al final del invierno (en terrenos saturados), especialmente si ha habido o hay actividad sísmica.

9.3.3. Evolución de las inestabilidades

Con el fin de determinar la evolución de las áreas inestables y la relación existente entre éstas y sus factores desencadenantes, se ha realizado una comparación del estado de las quebradas en foto aérea para los años 1949, 1970, 1992 y 2001. Esta observación no es del todo objetiva ya que el clima de esta zona permite un rápido crecimiento de la vegetación. Si las fotos de los distintos años han sido tomadas al final del invierno pueden presentarse las inestabilidades cubiertas de vegetación, sin que esto signifique que no sigan activas. Por otra

parte la escala varía de unas fotos a otras, dificultándose la comparación así como la observación de inestabilidades en aquellas de escala mayor.

En las fotografías aéreas del año 2001, tomadas después del primer terremoto, (enero/2001), se observan pocos cambios en cuanto al número de inestabilidades con respecto a los otros años. Sí pueden distinguirse zonas en tonos más claros que indican una reactivación reciente. Con el estudio de campo realizado después de las lluvias del año 2001, del terremoto de febrero y de las continuas réplicas sísmicas, sí hemos podido observar áreas más amplias de inestabilidad.

Desde 1949 hasta el año 2001 se han producido nueve terremotos con repercusión en el área de estudio. Se ha realizado una aproximación según la cual el 80% de las zonas afectadas actuales, lo estarían ya en 1949. No se observa por tanto una gran diferencia en cuánto al número de áreas inestables, intuyéndose que durante este periodo ha habido una evolución de la magnitud de las inestabilidades más que una actuación sobre áreas estables. Es decir la tendencia principal ha sido la incidencia sobre terrenos ya inestables. Esto nos da una idea sobre el tiempo de recuperación de estas zonas, que se puede suponer mayor de 50 años.

Teniendo en cuenta que en este periodo de 50 años se ha detectado un aumento del 20% en cuanto al número de inestabilidades y que han sido 9 los terremotos que han afectado en el área de estudio, se puede estimar que con cada terremoto se produciría un incremento de algo más del 2% de inestabilidades. Sin embargo, en cuanto a la reactivación de áreas afectadas, se estima que ocurre de forma constante durante la estación seca, condicionada por la actividad sísmica, y especialmente durante la estación lluviosa. Este proceso continuará manifestándose hasta que los taludes alcancen un estado de equilibrio. Con la reforestación de estas zonas se puede contribuir a mejorar el estado en que se encuentran en la actualidad, frenando por lo menos en parte el continuo proceso de erosión que afecta a las laderas.

9.3.4. Grado de peligrosidad

Como ya se ha indicado al inicio del presente apartado, no se ha podido determinar la peligrosidad de manera cuantitativa, se ha hecho sin embargo un análisis cualitativo.

Dado que la peligrosidad se define como la amenaza por la probabilidad de ocurrencia de dicha amenaza, se han estimado ambos factores para determinarse el grado de peligrosidad por inestabilidades de ladera asociado al volcán.

La amenaza ha sido considerada, de forma general, como una amenaza media, en función de la magnitud, dada por el volumen de material implicado. Existen también movimientos gravitatorios de menor magnitud, como los desprendimientos de bloques que ocurren de manera individualizada, que serían definidos como una amenaza baja. Sin embargo se ha caracterizado la amenaza media correspondiente a los deslizamientos traslacionales y desprendimientos asociados que se supone aportan la mayor cantidad de material al cauce.

La probabilidad de ocurrencia de estos movimientos ha sido determinada en función de la susceptibilidad, estimándose la siguiente relación:

Susceptibilidad muy alta	Probabilidad alta
Susceptibilidad alta	Probabilidad media
Susceptibilidad moderada	Probabilidad baja
Susceptibilidad baja	Probabilidad muy baja

Una vez determinados los grados de amenaza y probabilidad, se estima la peligrosidad mediante la siguiente matriz:

Amenaza ↑	Alta (4)	4B	8M	12A	16MA
	Media (3)	3MB	6B	9M	12A
	Baja (2)	2MB	4B	6B	8M
	Muy baja (1)	1MB	2MB	3MB	4B
		Muy baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)
		→ Probabilidad			

Fig1- Matriz de peligrosidad para establecer la escala de un mapa de peligrosidad. Desarrollada a partir de Altimir et al. (2001)

Según lo establecido, y en función de la susceptibilidad, representada en el mapa de susceptibilidad (mapa n°13."susceptibilidad a las inestabilidades".anexo2) quedaría la siguiente relación:

GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD	GRADO DE PELIGROSIDAD
Zonas de susceptibilidad Muy Alta	Peligrosidad Alta
Zonas de susceptibilidad Alta	Peligrosidad Media
Zonas de susceptibilidad Moderada	Peligrosidad Baja
Zonas de susceptibilidad Baja	Peligrosidad Muy Baja

Tabla 1- Relación grado de susceptibilidad-grado de peligrosidad para el volcán de Usulután.

De forma general, en las quebradas *El Cargadero*, *La quebradona* y *California*, así como en las quebradas asociadas a las laderas del volcán, obtendríamos unos grados de peligrosidad de media a alta en las zonas de cabecera y ladera alta.

Las laderas media y baja del volcán, así como las quebradas en estos tramos, se caracterizan principalmente por un grado de peligrosidad de baja a muy bajo.