

9.2. Caracterización de la susceptibilidad

Para caracterizar la susceptibilidad se han analizado los factores condicionantes de la ocurrencia de inestabilidades de ladera. Se han realizado cartografías de cada uno de ellos: geomorfología, procesos activos, pendientes, grado de fracturación, vegetación, orientación y litología.

Estos mapas han sido solapados para obtener, finalmente, el mapa de susceptibilidad a las inestabilidades de ladera en el volcán de Usulután.

Para la realización de cada uno de los mapas temáticos se ha empleado una metodología diferente. Los mapas de orientación y pendientes se han elaborado a partir de los mapas de la base cartográfica digital del SNET. Los mapas geomorfológico, estructural, de procesos gravitatorios y de vegetación se han elaborado mediante la observación de campo y fotografía aérea. El mapa geológico se ha obtenido del mapa digital (E=1:100.000), de El Salvador.

9.2.1. Mapa estructural

Se ha elaborado un mapa estructural con la finalidad de caracterizar el área de estudio (mapa n°3. "elementos estructurales". anexo2) y para la realización del mapa de susceptibilidad por inestabilidades gravitatorias, para el cual se realiza una zonificación mostrando las diferentes áreas según la densidad de fracturas (mapa n°11. "grado de fracturación". anexo2). La realización del mapa estructural se ha basado principalmente en la observación de las fotografías aéreas.

Se observa, de forma general, un alto grado de fracturación de la zona, identificándose las líneas de fractura gracias a la erosión producida por las quebradas principales que dejan aflorar parte de las entrañas del edificio volcánico y gran parte también, por las inestabilidades ocurridas en éste, que dejan al descubierto la roca fresca. Las laderas S y NNW y NE han sido caracterizadas como zonas menos fracturadas. Esta menor densidad se debe a la poca visibilidad de fallas, hecho que puede estar condicionado por la presencia de vegetación o por el menor encajamiento de las quebradas o por la falta de fotografías aéreas en detalle para estas zonas. Por tanto, para la realización del mapa estructural seguirán siendo las zonas de estudio en detalle, las tres quebradas principales, las zonas mejor caracterizadas y en este caso, las más representativas del alto grado de fracturación del edificio volcánico.

En el mapa estructural elaborado se observa la presencia de las dos direcciones estructurales mayores E-W y NW-SE, esta segunda a veces norteadas, así como el sistema de fallas subordinadas NE-SW.

La dirección estructural mayor E-W, correspondiente a las fallas que delimitan la fosa media o graben central, se refleja en el área de estudio, quedando dos de las cinco quebradas principales orientadas paralelamente en esta misma dirección.

La segunda dirección principal NW-SE incluso N-S, es otra de las direcciones que predominan en el área de estudio. N-S es la dirección de orientación de la quebrada “California” y parte de “El Cargadero”, predominando para esta última quebrada la dirección subordinada NE-SW.

En la parte alta o crestas de las cabeceras de las quebradas se vuelve a mostrar esta marcada influencia de las fallas, ya que quedan orientadas E-W y N-S. Además de la orientación de las quebradas y las crestas que caracterizan tan acusadamente la morfología del edificio volcánico, se observa en la ladera NW una falla con dirección NE-SW, que marca un cambio de pendiente acusado en la parte alta del edificio, donde nacen quebradas poco evolucionadas pero con rasgos definitorios de una tendencia de evolución.

Queda claramente reflejada la influencia estructural en la morfología y red de drenaje del edificio volcánico y de las quebradas. Observando a una escala más de detalle el desarrollo de torrentes tributarios y la unión entre ellos, se refleja la influenciada de estos planos de debilidad dando como resultado direcciones preferenciales coincidentes con las fallas y en ocasiones ángulos marcados en las uniones entre ellos. En lo que respecta a las inestabilidades, la mayoría de ellas se ven afectadas por una falla, concretamente cerca del 98% de las inestabilidades caracterizadas. De aquí la importancia asociada a este factor como factor condicionante de las inestabilidades, ya que además de delimitar gran parte de éstas, actúa como plano por el cual se infiltra parte del agua que pasa a formar parte del terreno, favoreciendo en estos puntos la meteorización del terreno y por tanto, su susceptibilidad a ser erosionado y aumentando las presiones internas del mismo.

En general, el edificio volcánico, por sus características intrínsecas como la presencia de materiales poco consolidados, y su ubicación geológica, situado en el margen sur de la fosa central y próximo a la zona de subducción, sometido por tanto a una continua sismicidad, se encuentra altamente fracturado.

9.2.2. Mapa geomorfológico

Se ha considerado necesaria la elaboración del mapa geomorfológico como base para la creación del mapa de susceptibilidad, ya que la ocurrencia de estas está determinada, por la morfología del terreno. Así mismo podemos ubicar las inestabilidades identificadas en el terreno sobre las unidades creadas. (mapa n°4.”mapa geomorfológico”.anexo2).

Su realización se ha efectuado mediante las observaciones de campo y el análisis e interpretación de fotografías aéreas y mapa topográfico a escala 1:25.000.

Unidades geomorfológicas

Se han distinguido seis unidades geomorfológicas que se describirán a continuación, así como otros elementos diferenciables. Los rangos de pendiente así como la tipología e intensidad de los procesos activos asociados definen estas unidades: Ladera alta, ladera media, ladera baja. Quebradas, zona de captación de agua y Piedemonte.

Ladera alta

Ladera de cotas más elevadas (desde 700m. hasta 1400m.), con pendientes mayores del 30 %. La red de drenaje existente en el volcán nace en estas áreas y discurre ladera abajo a favor de zonas de debilidad tectónica (líneas de fallas) o litológicamente más alteradas.

Esta red se encuentra intensamente encajada, dando lugar a la formación de quebradas, en cuyas laderas se hallan las inestabilidades identificadas en esta unidad geomorfológica.

Los procesos de erosión hídrica y gravitatorios, deslizamientos y desprendimientos, se desarrollan con una gran intensidad. Éstos se alimentan respectivamente dando lugar a encajamientos de dimensiones cada vez mayores y vertientes abruptas en las quebradas. Es conveniente mantener cierto control sobre estas zonas de encajamiento, ya que es aquí donde puede iniciarse un proceso de erosión remontante y consiguiente creación de una zona de cárcava de difícil recuperación.

Ladera media

Pendientes mayores del 10% y cotas medias (desde 350m. hasta 960m.). Al disminuir la pendiente, el encajamiento de las quebradas es menos pronunciado y por tanto las vertientes menos abruptas.

Sin embargo continúan existiendo procesos de erosión, tanto en las vertientes de las quebradas como en la misma ladera, en la que los cultivos intensivos y los constantes incendios dan lugar a unos terrenos muy vulnerables.

Ladera baja

Son aquellas laderas con pendientes menores del 10% y cotas bajas (desde 200m. hasta 800m.). Ha sido diferenciada de la ladera media por el rango de pendientes. En algunas zonas desaparecen las formas encajadas, en las que ya no existe una dirección preferente de flujo tan marcada, hablándose de incisión lineal más que de encajamiento.

Los procesos de erosión hídrica adquieren menor importancia que en las unidades superiores, debido a la existencia de pendientes más suaves que hacen disminuir la energía del flujo. No obstante existen algunas quebradas que todavía presentan unas dimensiones considerables, especialmente en la ladera oeste del volcán.

En aquellos puntos en los que no hay canales definidos, el agua fluye por la ladera en forma de arroyada hasta encontrar una zona favorable para su encauzamiento. Estas zonas en ocasiones son caminos o carreteras de importante conexión entre comunidades o núcleos urbanos.

En estas áreas tienen lugar los procesos de inundación y avenidas en condiciones de altos caudales. Éstos se ven aumentados en por la cantidad de agua que se ha ido sumando a lo largo de la cuenca y especialmente por la carga sólida. Cuanto mayor sea la energía del flujo aguas arriba mayor capacidad tendrá para arrastrar los materiales dispuestos a lo largo del cauce y al pie de las laderas, aumentando así la peligrosidad de dicho flujo.

En estas zonas de la ladera se dan también procesos de sedimentación, cuando el flujo hídrico pierde su capacidad de seguir transportando carga sólida, quedando ésta abandonada en los cauces o ladera.

Quebradas

Como ya se ha indicado, todo el volcán se encuentra afectado por los procesos de erosión hídrica que dan lugar al encajamiento de quebradas. En esta unidad geomorfológica se agrupan las cinco quebradas de mayores dimensiones. Se distinguen así cinco quebradas principales, tres de ellas más desarrolladas, en las que se ha centrado el estudio en detalle: *El Cargadero*, *La Quebradona* y *California*. Las otras dos quebradas son *La Periquera* y *El Juguete*, esta última la más pequeña de las cinco.

Se disponen con una morfología radial, partiendo de la cima del volcán, a una cota máxima de 1.451m. y llegando hasta los puntos que se han considerado límites de afectación de cada uno de sus cursos, en los que intervienen otros cauces que se suman a ellos. Quedan por tanto las cinco cuencas dividiendo la ladera del volcán en tres zonas: ladera noroeste, ladera noreste y ladera sur. Las quebradas el cargadero y el juguete presentan una orientación NE-SW, las quebradas la quebradona y la periquera E-W y la quebrada de California S-N. Esta disposición, así como la del resto de los encajamientos que se producen en las laderas del volcán, tiene un fuerte control tectónico.

El perfil longitudinal de algunos cauces de las quebradas presenta unos saltos de hasta 10m. metros de altura debido a la presencia de basaltos más resistentes a la erosión o posiblemente a la existencia de fallas con desplazamiento vertical. Se observa en algunas zonas de cabecera cómo la sucesión de estos saltos da lugar a una morfología escalonada, en la que se alcanzan pendientes de hasta el 70 %.

La profundidad máxima de encajamiento es de unos 690m. en el cargadero y la altura media de los taludes es de unos 150-200m.

Estas quebradas se originan a raíz de un proceso de encajamiento fluvial, semejante al que ocurre actualmente en las quebradas más pequeñas ubicadas en las unidades geomorfológicas de ladera. La evolución de los encajamientos en el tiempo, producida por los mismos procesos de erosión y gravitatorios, y la existencia de una importante red de fracturas, entre otros factores, ha dado lugar a estas formas más desarrolladas y por tanto diferenciadas del resto de las quebradas.

Los procesos gravitatorios, deslizamientos y desprendimientos, tienen lugar prácticamente a lo largo de toda la vertiente de las quebradas. Los procesos de erosión hídrica tienen una gran importancia en la dinámica de estas formas, siendo más intensos en las cabeceras, en zonas de mayor pendiente y parte convexa de las curvas del cauce.

En la parte baja de las quebradas, donde el encajamiento es menor y por tanto se ve disminuida la altura de los taludes hasta llegar a perderse en algunos casos, se producen los fenómenos de avenidas e inundaciones.

Dentro de esta unidad se han identificado diferentes elementos geomorfológicos:

Cicatrices de deslizamiento. Delimitan la cabecera de los movimientos gravitatorios. Se han cartografiado las cicatrices de las inestabilidades observadas, así como otras identificadas mediante observación de fotografía aérea. Se diferencian cicatrices recientes y cicatrices fósiles.

Zonas de erosión. Son zonas en las que la erosión es especialmente fuerte, dando lugar a laderas lavadas y por tanto más vulnerables a la ocurrencia de procesos gravitatorios.

Depósitos. Son zonas donde los procesos de sedimentación dan lugar a depósitos de volúmenes importantes y por tanto cartografiables a la escala de trabajo. Se asocian especialmente al pie de taludes por acumulación de material producto de las inestabilidades.

Crestas. Líneas de división de las quebradas que delimitan vertientes de pendientes elevadas. Son formas altamente vulnerables a la erosión por su propia morfología, agravado por el hecho de que las ondas sísmicas se amplifican en estos lugares. Los materiales observados en estas zonas se encuentran altamente meteorizados.

Captación de agua

Esta unidad se encuentra asociada a las laderas este y oeste del volcán. Es la zona donde desembocan diversos cursos torrenciales procedentes del cerro el Tigre, el cerro Tecapa y el volcán de Usulután. Se diferencian dos zonas de recarga. Al oeste, la zona de recarga del río Gualache y al este la zona recarga del río Santa María.

Piedemonte

Esta unidad se encuentra ubicada bajo la ladera sur del volcán. Define la zona por la que transcurren los cursos de agua de las quebradas de esta ladera sur. Es una planicie ce

suaves pendientes en la que los cursos de agua continúan encajándose en niveles de roca basáltica.

Asociadas a estas unidades geomorfológicas descritas se han identificado otras formas por su relación directa con los procesos que se caracterizan en este estudio, procesos gravitatorios e inundaciones.

Inestabilidades

Como se indica en el apartado anterior, se ha creado un mapa de inestabilidades en el que éstas han sido cartografiadas con el fin de localizar y de observar la densidad en los diferentes tramos de ladera. No obstante son incluidas en este mapa como formas del terreno producidas por procesos gravitatorios y asociadas a las unidades geomorfológicas.

Conos de deyección

Otras formas asociadas son los conos de deyección. El curso de los torrentes está condicionado por la morfología de estos, con forma en planta de abanico y bajo ángulo en sección vertical. Algunos cursos se encajan bordeando estas estructuras. Los que transcurren sobre ellas presentan normalmente estructuras más ramificadas y menos encajadas debido a la propia morfología del cono, de pendientes más suaves y sin un gradiente definido en una sola dirección. Se han identificado dos tipos de conos de deyección, asociados a las quebradas y asociados a las laderas del volcán.

Estos últimos se ubican en la ladera media del volcán. Estarían asociados al proceso de formación de la estructura volcánica, durante el periodo de actividad eruptiva. El propio flujo de las lavas va dando lugar a esas formas abombadas. No han sido cartografiados por considerarse que existe una tendencia general en toda la ladera a esta morfología.

Se han identificado cuatro conos asociados a las grandes quebradas, en la ladera baja. Su génesis puede explicarse como el resultado de un proceso de sedimentación del material que va siendo erosionado y desprendido progresivamente de dichas quebradas, transportado durante los regímenes torrenciales hasta estos lugares en los que flujo perdería velocidad y capacidad de transporte de carga sólida.

9.2.2. Procesos Activos

La dinámica de las amenazas geológicas existentes en el volcán está determinada por la intensidad con que actúan los procesos activos. En este apartado se detallará cuáles son estos procesos y cómo actúan. Igualmente se hace una descripción del mapa de procesos activos elaborado.

En el área de estudio se aprecian cuatro tipos de procesos principales: procesos sísmicos, procesos de erosión (gravitatorios e hídricos), procesos de sedimentación y procesos de inundación.

Procesos de erosión gravitatoria

Los tipos de movimientos gravitatorios observados en la zona son principalmente dos, deslizamientos traslacionales y desprendimientos. Los deslizamientos traslacionales están asociados a los depósitos piroclásticos. Cuando presentan una alternancia de niveles de colada basáltica, estos basaltos pueden ser también arrastrados, o bien verse afectadas por desprendimientos al producirse la pérdida de la sustentación que daban los depósitos piroclásticos. Aunque los desprendimientos tienen una menor magnitud que los deslizamientos no por ello son menos importantes, debido a la frecuencia con que ocurren y al aporte de un material de mayores dimensiones (bloques de hasta dos metros de diámetro) que puede ser puesto en funcionamiento. Este hecho incrementa el potencial erosivo del flujo y los daños, en el caso de que éste alcance zonas habitadas.

Estos movimientos se producen en la interacción entre fuerzas desequilibrantes y fuerzas equilibrantes. El esfuerzo cortante tiende a producir el deslizamiento y la resistencia al corte o cizalladura se opone a éste. El esfuerzo cortante puede aumentar por diversas causas: el aumento del ángulo de pendiente, el aumento del peso de la superficie del terreno, la alternancia de estratos de diferentes competencias, la existencia de fallas y grietas, la alteración del terreno por efecto de la meteorización, por acciones sobre la vegetación o por la existencia de tensiones internas (producidas por los sismos o por infiltración de agua)

Procesos de erosión Hídrica

Los procesos de erosión hídrica se refieren al lavado superficial producido principalmente en zonas desprotegidas, así como al encajamiento de los cursos torrenciales y a la incisión lineal que ocurre ladera abajo, en zonas de pendiente más suave. Son procesos con un régimen estacionario ya que ocurren únicamente en la estación lluviosa, de mayo a noviembre.

El lavado superficial se desarrolla en las laderas. Intervienen dos factores: el impacto de la gota de lluvia y la escorrentía superficial.

El impacto de la gota de lluvia está determinado por la existencia o no de cobertura vegetal, que puede absorber la energía de las gotas y disminuir la erosión y transporte de partículas. La erosión por salpicadura toma mayor importancia en suelos cultivados sobre los que no se han tomado medidas de protección y en las laderas carentes de cobertura vegetal, especialmente a mayor pendiente y menor cohesión de las partículas del suelo o la roca.

La escorrentía superficial es función (según Horton) de la intensidad de la precipitación, de la capacidad de infiltración y del lugar de la vertiente. Cuando el suelo absorbe toda la precipitación no se produce escorrentía. Si la cantidad de precipitación es

mayor a la velocidad de infiltración máxima, el exceso de volumen discurrirá por la superficie. En la parte superior de la vertiente, el flujo es ante todo laminar, haciéndose más turbulento al aumentar el caudal y la velocidad. Agravan este proceso dos factores, la escasa cubierta de vegetación y las precipitaciones intensas en las tormentas locales. Se manifiesta especialmente en aquellas zonas de ladera media-baja en las que la morfología del terreno no facilita la existencia de cauces bien definidos (formas de relieve convexas como los conos de deyección), donde el uso del suelo predominante es la agricultura intensiva y donde se producen incendios frecuentemente.

La incidencia de la erosión hídrica es importante por varios motivos. El flujo producto de la escorrentía superficial tiende a formar canales tanto en las laderas del volcán como en las vertientes de las grandes quebradas (arroyada en surcos). El desarrollo de estos canales dará lugar a nuevos torrentes, haciendo que estas zonas sean más susceptibles a la ocurrencia de procesos gravitatorios, así como de inundaciones en las zonas más bajas de la ladera, donde desembocarían estos flujos canalizados.

Procesos de sedimentación

Los procesos de sedimentación ocurren principalmente a lo largo de los cauces de las quebradas, en aquellos lugares donde los cursos torrenciales pierden capacidad de arrastre, dejando a su paso la carga sólida que transportaban.

Existen también los depósitos asociados a las inestabilidades de ladera, que se encuentran al pie de los taludes afectados. Esta acumulación de material es transitoria. Sólo espera la llegada de una precipitación de intensidad suficiente para formar parte de la carga sólida el caudal, pudiendo favorecer la ocurrencia de nuevos deslizamientos a su paso e inundaciones en las partes bajas.

Por otra parte, existen procesos de sedimentación asociados a las zonas bajas de la ladera, puntos receptores de los materiales arrastrados durante procesos de escorrentía superficial, en los que el agua fluye sin un cauce definido, erosionando las laderas a su paso.

Procesos de avenidas e inundaciones

Los procesos de avenidas e inundaciones se producen al pie de las quebradas, cuando se generan unos caudales elevados cuyos volúmenes superan al de la capacidad de la cuenca. En estos puntos las pendientes son suaves y por tanto los cursos de agua no tienen suficiente capacidad erosiva como para encajarse en el cauce, produciéndose de este modo los desbordamientos. Estos desbordamientos también ocurren cuando se produce una acumulación de depósitos sobre el cauce demasiado grande. Si la energía del flujo no es suficientemente alta como para transportarlos, se produce un tapón que impide que este flujo continúe su curso, causando el desbordamiento. El flujo puede desbordar hacia una quebrada aledaña o por la ladera sin un cauce definido, diseminando el material arrastrado por la ladera.

Se producen avenidas en aquellas zonas con suave pendiente y en regímenes de altos caudales. Las inundaciones se dan en zonas más llanas, por acumulación de agua que queda estancada en estas zonas.

MAPA DE PROCESOS GRAVITATORIOS

En el mapa se muestra el grado de actividad de los procesos gravitatorios (mapa n°12, "procesos de inestabilidad gravitatoria"). Ha sido realizado con una doble función. Por un lado refleja el grado de actividad de las inestabilidades en el momento de ejecución del presente proyecto. Por otro lado, para la elaboración del mapa de susceptibilidad por inestabilidades se ha tenido en cuenta este grado de actividad. Los taludes en los que se han activado los movimientos gravitatorios quedan desprovistos de suelo y vegetación, siendo altamente vulnerables a la erosión. Estos procesos de inestabilidad continuarán desarrollándose hasta que se alcance un estado de equilibrio.

Igualmente, para la elaboración del mapa de susceptibilidad se ha tenido en cuenta la intensidad de la erosión hídrica, ya que los procesos de erosión hídrica y la ocurrencia de movimientos gravitatorios están íntimamente relacionados. Han sido consideradas como zonas más susceptibles a la ocurrencia de inestabilidades aquellas en las que la erosión hídrica es más intensa, como los encajamientos en las laderas o las cabeceras de las grandes quebradas. Sin embargo este proceso no ha sido representado gráficamente debido a que actúa sobre la totalidad del volcán y a la dificultad que representa diferenciar los diferentes grados de actividad. Sí se han diferenciado sin embargo en el mapa geomorfológico los encajamientos y los límites de las grandes quebradas, que serían las áreas de erosión más intensa.

El área de actuación de los procesos gravitatorios ha sido limitada a aquellos lugares en los que se han identificado las inestabilidades actuales (en trabajo de campo y foto aérea), las inestabilidades fósiles (mediante observación de foto aérea), así como a otros puntos que reúnen las mismas condiciones litológicas, geomorfológicas y estructurales, en los cuales estos procesos son potencialmente activos si bien no se ha detectado la existencia de inestabilidades por los medios de observación citados. El grado de actividad está determinado por el grado de desarrollo de las inestabilidades identificadas. Así hemos distinguido cuatro grados de actividad: muy activo, activo, moderadamente activo y poco activo. Debe tenerse en cuenta que este grado de actividad ha sido estimado para el momento de realización del estudio y que éste es susceptible de cambios. Por una variación de los factores que determinan la ocurrencia de procesos gravitatorios (pendiente, porcentaje de agua involucrado, características geomecánicas de la roca, entre otros) un área estable puede llegar a alcanzar un estado de desequilibrio y viceversa.

-Proceso muy activo: zonas con escarpes sin vegetación y depósitos recientes. En algunas áreas se producen movimientos gravitatorios con una frecuencia suficientemente

elevada como para que éstos sean observables en tres meses de trabajo de campo (especialmente los desprendimientos).

-Proceso activo: zonas en las que las inestabilidades presentan escarpes lavados, con escasa vegetación. Depósitos no consolidados pero en parte lavados.

-Proceso moderadamente activo: zonas en las que los escarpes están moderadamente vegetados y los depósitos algo consolidados, con vegetación o ausencia de depósitos.

-Proceso poco activo: zonas en las que se reúnen características favorables a la ocurrencia de estos procesos, aunque no hayan sido identificadas inestabilidades en la actualidad.

Resultados mapa de procesos gravitatorios

Los procesos de inestabilidad gravitatoria principalmente asociados a las quebradas y a las partes altas de las laderas del volcán, como se observa en el mapa. Se detectan puntos de actividad muy alta en las tres quebradas principales y en la cabecera de la quebrada Gualache, que presenta un alto grado de evolución.

A continuación se describen las zonas donde mayor actividad existe para cada quebrada y se realiza una estimación de su evolución.

En la quebrada *El Cargadero* la máxima actividad se asocia a dos zonas. La zona de ladera este corresponde con una inestabilidad de grandes dimensiones y litología muy vulnerable por la intercalación de niveles de piroclastos con diferente granulometría. Se ubica en un punto del cauce de fuerte erosión y se estima su evolución hacia el sur, por la presencia de fallas identificadas en fotografía aérea, lo que uniría esta inestabilidad con las dos que se encuentran en estos puntos más meridionales, de menores dimensiones.

En la ladera oeste, la franja caracterizada por una mayor actividad corresponde con un área altamente inestable, con un alto grado de evolución. La inestabilidad más desarrollada presenta una intercalación de depósitos piroclásticos y niveles basálticos y una pendiente abrupta. Se distinguen dos zonas más afectadas en el escarpe, presentando una mayor profundidad. Se estima que el conjunto de esta inestabilidad podría evolucionar en sentido norte y sur, uniéndose a las zonas ya afectadas aunque menos desarrolladas que la circundan.

En la quebrada *La Quebradona* se aprecia una mayor actividad en las cabeceras y en la ladera sur. Este tramo de ladera presenta una intensa red de fracturas (observadas en foto aérea), así como grietas y ausencia de vegetación en su cabecera. La litología se define por depósitos piroclásticos con niveles de basaltos intercalados. Se estima una evolución, hacia una mayor profundidad de las inestabilidades asociadas en este tramo.

En la cabecera sur el alto grado de actividad está asociado a una ladera de pendiente abrupta, en la que la red de fracturas tiene un fuerte control sobre los basaltos, dando lugar a inestabilidades de tipo desprendimiento o deslizamiento rocoso. Se estima que continúen

ocurriendo estos procesos, favorecidos por el comportamiento hídrico en estas zonas de cabecera.

En la cabecera norte la zona de alta actividad corresponde con una cicatriz de inestabilidad profunda, que se estima continúe desarrollándose. El material asociado a la cabecera de esta inestabilidad está constituido por fragmentos de basalto alterados, en forma de clastos de diversos tamaños y partículas finas no cohesionadas.

En la quebrada de *California*, las zonas más activas corresponden con la cabecera y la ladera oeste. La cabecera presenta una gran inestabilidad en proceso de desarrollo, marcada por la intensa red de fracturas (identificadas en foto aérea) y grietas en cabecera, así como por la morfología de cresta que la une con la quebrada *La Quebradona*. La roca basáltico andesítica se presenta altamente meteorizada, especialmente en la cabecera de la inestabilidad, en la que se observan fragmentos sueltos de roca. Se aprecia un a mayor profundidad en la parte alta, estimándose una evolución de ésta inestabilidad hacia una mayor profundidad del escarpe.

En la ladera oeste, existe una amplia zona de inestabilidades, con un fuerte control tectónico. La litología presente consiste en depósitos piroclásticos y alternancia de niveles basálticos. Se distinguen cuatro inestabilidades que pueden tender a unirse si se siguen desarrollando estos procesos en las zonas que se presentan vegetadas en la actualidad.

Por último, la cabecera de la quebrada *Gualache*, presenta un grado de desarrollo aun no muy elevado pero una zona amplia de afectación. Sería recomendable el tratamiento de este área para frenar la evolución del proceso de erosión antes de que sea irreversible su recuperación.

Las quebradas *El Cargadero*, *La Quebradona* y *California* presentan, a parte de estos puntos más activos, una actividad elevada asociada principalmente a las cabeceras y a algunos tramos correspondientes con la ladera media y una actividad moderada en las áreas restantes.

Las quebradas asociadas a las laderas del volcán han sido asociadas a un grado de actividad generalmente bajo, excepto en las cabeceras y en aquellos puntos en los que se han identificado inestabilidades de dimensiones considerables, a los que se les ha otorgado un grado de actividad alto o moderado.

En resumen, los procesos gravitatorios afectan de forma general a todas las quebradas del volcán, con distintos grados de actividad, dando lugar a inestabilidades de diversos tamaños y grados de evolución. Estos grados diferentes de desarrollo muestran una ladera en desequilibrio, en la que se estima que se continúen desarrollando estos procesos.

9.2.4. Mapa de susceptibilidad

La elaboración del mapa de susceptibilidad por inestabilidades es uno de los objetivos de este proyecto. Así, de igual forma que se ha realizado una caracterización de las inestabilidades con la creación de la base de datos y la cartografía, se completa el estudio con el presente mapa que refleja los distintos grados de susceptibilidad por inestabilidades existente en el volcán de Usulután.

Los factores que condicionan la ocurrencia de inestabilidades se han ido representando en diversos mapas, como ya se explicó al inicio de este capítulo, los cuales se han solapado para la obtención, finalmente, del mapa de susceptibilidad (mapa n°13 "susceptibilidad a las inestabilidades" anexo2).

Para determinar los rangos de susceptibilidad del terreno se han establecido cuatro rangos para cada factor condicionante. La determinación de estos rangos se ha realizado mediante observaciones de campo y consulta del trabajo "caracterización de la microcuenca del río Yamabal" (Santana, M., El Salvador). Estos rangos se detallan en la siguiente tabla y se explican posteriormente.

Rango de susceptibilidad	4- Susceptibilidad muy alta	3- Susceptibilidad alta	2- Susceptibilidad moderada	1- Susceptibilidad baja
Pendiente	Mayor de 50%	Entre 30-50%	Entre 15-30%	Menor de 15%
Litología	-Fuerte alternancia basaltos/piroclastos -Alternancia basaltos/piroclastos de caída. Porosidad primaria y secundaria. -Piroclastos poco consolidados, bajo contenido en matriz y bandeados por niveles de diferente granulometría. Porosidad principalmente primaria.	-Ligera alternancia basaltos/piroclastos. Porosidad primaria y secundaria. -Basalto-andesita fracturados y meteorizados. Porosidad secundaria.	-Depósitos con alto contenido en matriz fina semiconsolidado y tamaño de grano heterogéneo. Porosidad principalmente primaria. - Niveles potentes de coladas basálticas afectados por diaclasas y fracturación. Porosidad secundaria.	-Coladas piroclásticas consolidadas. Porosidad principalmente primaria.
Fracturación	Áreas con densidad de fracturas alta.	Áreas con densidad de fracturas media	Áreas con densidad de fracturas baja.	Áreas sin fracturas observadas.
Procesos activos	Muy activo.	Activo.	Moderadamente activo.	Poco activo.
Geomorfología	Cabecera de quebradas, fondos de valle y encajamientos torrenciales.	Ladera alta.	Ladera media.	Ladera baja. Conos de deyección.
Orientación	Norte	Este	Oeste	Sur
Vegetación	Ladera quemada.	Ladera lavada.	Cultivos temporales (maíz, frijol) o matorral.	Bosque o cafetal.

Tabla 1- Rangos de susceptibilidad de los factores condicionantes de las inestabilidades de ladera en el volcán de Usulután.

Factores condicionantes

Pendiente

La pendiente condiciona la estabilidad de una ladera ya que con ella varían las componentes de la gravedad y el rozamiento del talud, fuerzas que van a determinar su equilibrio (mapa n°9."pendientes".anexo2). Los movimientos gravitatorios se producen en el momento en el que se produce un desequilibrio entre las fuerzas existentes en un talud. Al aumentar la pendiente aumenta la componente tangencial de la gravedad, que es una de las fuerzas desestabilizadoras, y disminuye el rozamiento o resistencia a la cizalla (función de la componente normal de la gravedad), como fuerza estabilizadora. Por tanto a mayores pendientes, será necesaria una mayor cohesión del talud para mantener el estado de equilibrio así como unas presiones de agua menores para que éste equilibrio se pierda. Para cada material existe un esfuerzo admisible relacionado con cada valor determinado de la inclinación del terreno, denominado "ángulo de reposo".

Se han diferenciado los cuatro rangos de susceptibilidad del siguiente modo:

Rango4- Se han considerado como muy vulnerables aquellas pendientes mayores del 50%. Estas se dan en pocos lugares, asociadas generalmente a las vertientes de las quebradas.

Rango3- Con alta vulnerabilidad se han distinguido las pendientes entre el 30% y el 50%. Estos rangos se encuentran asociados a la ladera alta.

Rango2- Se han considerado zonas de vulnerabilidad moderada en función de la pendiente a aquellas cuyos rangos oscilan entre el 15% y el 30%. Estos se encuentran asociados a la ladera media.

Rango1- Se han considerado como zonas menos vulnerables aquellas cuyas pendientes son menores del 15%.

Litología

El factor litológico ha sido estudiado únicamente en las tres quebradas principales y extrapolado al resto del volcán para elaborar el mapa de susceptibilidad. No se ha realizado sin embargo un mapa en el que pueda mostrarse la variedad con que se presentan y asocian las litologías observadas, que si han sido descritas en el capítulo 7. Se cuenta no obstante con un mapa geológico del volcán de Usulután, obtenido del realizado a escala 1:100.000 para El Salvador, que muestra, a grandes rasgos, las formaciones litológicas y los miembros que las conforman (mapa n°2."geológico".anexo2).

Para la determinación del grado de susceptibilidad con respecto a la litología se han asociado las características geomecánicas, permeabilidad y grado de alteración, dada la ausencia de un estudio detallado de las mismas, para poder determinar su afectación como factor condicionante.

Por tanto, en el factor litológico van a quedar reflejadas las características del material, su estado de alteración, la disposición de los materiales de diferentes competencias y la permeabilidad de éstos.

El grado de permeabilidad determina la cantidad de agua que puede infiltrarse en un terreno, aumentando la presión interna y disminuyendo así la cohesión y estabilidad.

Existen dos tipos de permeabilidad, según esté asociada a la porosidad del material, permeabilidad primaria, o a las diaclasas y fracturación, permeabilidad secundaria. La permeabilidad primaria está asociada a la génesis de una litología, es decir, aquella dada por el vacío que puede quedar entre las partículas que forman la roca o el suelo. La permeabilidad secundaria de una roca o suelo es adquirida después de su formación, también llamada postdeposicional y se asocia principalmente a fisuras, fracturas o cualquier discontinuidad.

Tanto diaclasas como planos de discontinuidad facilitan la percolación de agua aumentando las tensiones internas y por tanto aumentando la probabilidad de ocurrencia de movimientos gravitatorios, especialmente si dichos planos son paralelos a las líneas de pendiente.

La diferencia de competencia de los materiales además de variar las características geomecánicas de los depósitos tiene una gran importancia, ya que si existe una mayor erosión de los más vulnerables, quedan desprotegidos los niveles más competentes por el descalce producido, y por tanto más susceptibles a la ocurrencia de inestabilidades.

Para la determinación de los siguientes rangos se han considerado varias litologías o combinaciones de éstas.

Rango4- Se consideran en este rango de mayor susceptibilidad las siguientes combinaciones de litologías y estructuras: fuerte alternancia de basaltos y piroclastos, ligera alternancia de basaltos y piroclastos de caída, y piroclastos poco consolidados bandeados por niveles de diferente granulometría con bajo contenido en matriz.

Los depósitos piroclásticos en general (lapillis, escorias, bombas, a excepción de los depósitos finos) pueden constituir formaciones de buena permeabilidad, siendo ésta dependiente de las clases granulométricas, la disposición de estas clases y el grado de compactación de las formaciones.

Los depósitos piroclastos de caída han sido considerados como la litología más susceptible, ya que no existe una fuerte cohesión entre los clastos (contactos puntuales) ni matriz que los una. La permeabilidad primaria es alta, debido a la alta porosidad dada por el alto grado de vesiculación, tamaño de grano homogéneo y ausencia de matriz, al igual que la permeabilidad secundaria, debida a la existencia de fracturas que afectan a los depósitos, pueden considerarse niveles importantes para el almacenamiento de agua. Estos depósitos se encuentran asociados a niveles de colada basáltica-andesítica. La interconexión de fracturas entre ambos depósitos va a determinar la tipología de acuíferos colgantes o profundos.

Los depósitos piroclásticos con contenido en matriz moderado no son por sí solos tan susceptibles, pero sí asociados a frecuentes intercalaciones de niveles de colada basáltica-andesítica, por la presencia de planos de debilidad así como la diferente competencia de

ambos materiales. Los niveles basálticos presentan en estas intercalaciones unos espesores de 0,5 a 1m y se encuentran afectados por un sistema de fracturas, además de las diaclasas por enfriamiento. El homogéneo tamaño de las partículas de los depósitos piroclásticos, asociado a un bajo contenido en matriz, otorga al material una permeabilidad por porosidad primaria media. La probable interconexión de las fracturas ligadas a los niveles de basaltos con los depósitos piroclásticos caracterizaría el conjunto con una permeabilidad combinada granular y por fisuración importante aunque heterogénea en la vertical, debido a la alternancia de niveles de conductividad hidráulica diferente.

Los depósitos piroclásticos poco consolidados se presentan como depósitos de grandes espesores. La susceptibilidad elevada se debe al poco contenido en matriz y a la disposición de los clastos de manera no consolidada (se disgregan con la mano). Se caracterizan por la presencia de bandeados formados por un tamaño de grano homogéneo pero variable en los diferentes niveles, dando una permeabilidad por porosidad primaria alta. Sumada a la permeabilidad secundaria por fisuración que afecta a los materiales, puede constituir una formación de buena permeabilidad.

Rango3- Se consideran susceptibles las siguientes litologías: ligera alternancia de basaltos y piroclastos, y basaltos meteorizados.

La alternancia de depósitos piroclásticos con basaltos se diferencia de la alternancia del grupo anterior por la presencia menor y más espaciada de niveles basálticos, que determina un menor número de planos de debilidad en el contacto entre ambos materiales.

La litología basáltico andesítica aflora principalmente en la parte alta, crestas y cabeceras del volcán. Se presentan altamente fracturada y meteorizada.

La permeabilidad primaria en estos materiales es casi nula, siendo importante la permeabilidad secundaria, por fisuración. A mediana y gran escala, la permeabilidad de los macizos basálticos es muy heterogénea.

Rango2- Se consideran moderadamente susceptibles los depósitos con alto contenido en matriz fina y tamaño de grano heterogéneo.

La presencia de una matriz semiconsolidada aporta cierta cohesión a estos depósitos. El alto contenido en matriz fina caracteriza a estos materiales por una alta porosidad pero baja permeabilidad o baja conexión entre los poros. La permeabilidad secundaria puede ser mayor debido a las fracturas y planos de discontinuidad que afectan a los materiales.

También se ha considerado moderadamente susceptibles los niveles potentes (8-10m) de coladas basálticas que afloran al W y al S de las laderas baja y pie de monte respectivamente. Se pueden diferenciar dos niveles, uno inferior donde la característica principal es el alto grado de diaclasas por enfriamiento con tendencia horizontal, y un nivel superior donde las diaclasas son verticales pudiéndose distinguir un sistema de fracturas que afecta al macizo rocoso. El macizo rocoso en conjunto puede caracterizarse por una permeabilidad por fisuración elevada.

Rango1- La litología considerada menos susceptible son las coladas piroclásticas consolidadas.

El tamaño de grano que conforma este tipo de depósito es heterogéneo. Está compuesto por un alto contenido en matriz que oscila entre el tamaño ceniza fina y gruesa y lapilli fino, y por piroclastos de tamaño muy variable (lapilli y bloques) que flotan en dicha matriz. La permeabilidad asociada al depósito es de tipo granular, permeabilidad primaria. Puede existir permeabilidad secundaria dada por las fracturas que afectan a todo el terreno.

Afloran principalmente en los cauces de cabecera, en los que el encajamiento se hace más profundo, así como en otros puntos a lo largo de las quebradas.

Fracturación

Las líneas de fracturación determinan planos de debilidad del terreno, a favor de los cuales se pueden producir inestabilidades por un aumento de las presiones internas por infiltración de agua o por rotura y pérdida de cohesión de los materiales, en el caso de cruce de dos o más fracturas.

Según la densidad de las fracturas en los distintos puntos se han identificado cuatro grupos (mapa n°11. "grado de fracturación".anexo2):

Rango4- Áreas con densidad de fracturas alta.

Rango3- Áreas con densidad de fracturas media.

Rango2- Áreas con densidad de fracturas baja.

Rango1- Áreas en las que no se observa la presencia de fracturas.

Como se explicará más adelante, se ha diferenciado un peso para cada factor condicionante. Para ello, se ha observado con qué rango se presentan éstos en las inestabilidades identificadas. En el caso de la fracturación se han creado cuatro rangos más detallados para obtener así un peso de la fracturación más preciso en estos puntos. Sin embargo, para la elaboración del mapa general de susceptibilidad del volcán se han tomado los rangos descritos en el mapa de grados de fracturación. Se han diferenciado cuatro rangos:

Rango4- Se consideran con una susceptibilidad muy alta aquellas inestabilidades que presentan un cruce de dos o más fracturas.

Rango3- Se consideran como altamente susceptibles aquellas inestabilidades que presentan una banda de fracturación, es decir, más de dos líneas de fractura que no se cruzan.

Rango2- Se consideran moderadamente susceptibles aquellas inestabilidades que presentan una línea de fracturación.

Rango1- Se consideran poco susceptibles las inestabilidades que no presentan fracturas observables.

Procesos activos

Se ha tenido en cuenta este factor para elaborar el mapa de susceptibilidad suponiendo que en las zonas en las que actualmente existe un grado de actividad elevado, en las que se ha superado el umbral de equilibrio, los factores que condicionaron la ocurrencia de procesos gravitatorios se alimenten unos a otros, haciendo que se mantenga el grado de inestabilidad que existe en la actualidad (mapa n°12."procesos de inestabilidad gravitatoria".anexo2).

Se determinan así los cuatro rangos de actividad que han sido representados en el mapa de procesos activos:

Rango4- Actividad muy alta

Rango3- Actividad alta

Rango2- Actividad moderada

Rango1- Actividad baja

Geomorfología

Las formas del terreno también controlan el grado de susceptibilidad (mapa n°4."geomorfológico".anexo2). Estas formas están asociadas a una pendiente y a la ocurrencia de los distintos procesos activos. Se han determinado del siguiente modo cuatro rangos de susceptibilidad:

Rango4- Unidades muy susceptibles: cabeceras de las quebradas, fondos de valle y encajamientos torrenciales.

La susceptibilidad de las cabeceras de las quebradas se debe al efecto combinado de varios factores. Por su altitud y disposición en las cotas más elevadas del volcán, están expuestas a una intensa meteorización. Son zonas en las que las precipitaciones son más elevadas y en las que existe una fuerte dinámica torrencial, por ser áreas de captación del agua de la lluvia. Presentan además inestabilidad por su propia geometría debido a las fuertes pendientes, especialmente en las zonas de crestas.

Los fondos de valle de las quebradas principales, así como los encajamientos torrenciales que se producen en las laderas del volcán, han sido consideradas como formas muy susceptibles debido a los procesos de erosión asociados a ellas. La erosión hídrica que se produce en los cauces hace que las vertientes pierdan estabilidad de los taludes situados sobre estos cauces, al irse perdiendo la cohesión de la base sobre el que se sustentan, dando lugar a fenómenos de descalce o desmonte.

Rango3- Unidad susceptible: ladera alta.

Igualmente que en las zonas de cabecera, las altas cotas y pendientes elevadas hacen que esta sea una unidad susceptible.

Rango2- Unidad moderadamente susceptible: ladera media.

Las pendientes son menores, siendo estas zonas menos susceptibles a los movimientos gravitatorios.

Rango1- Unidades poco susceptibles: ladera baja y conos de deyección.

Son unidades en las que las pendientes son suaves y los procesos de erosión menos intensos, consideradas por ello como poco susceptibles a la ocurrencia de inestabilidades.

Orientación

La orientación de las laderas determina el grado de insolación de éstas así como la erosión eólica, en función de la dirección de los vientos (mapa n°10."orientación de laderas".anexo2). Cuanto mayor sea la insolación, mayor será la evaporación del agua, cuya presencia tiene un efecto negativo en cuanto a la estabilidad de un terreno. Por otra parte tiene un efecto positivo indirecto, ya que el aumento de la humedad da lugar a una vegetación más intensa, y ésta proporciona una mayor estabilidad, amortiguando el efecto de la gota de lluvia y absorbiendo parte del agua caída disminuyendo así la escorrentía superficial. Además aporta una mayor cohesión al terreno con sus raíces. Como la vegetación ha sido considerada como un factor a parte, se considera únicamente el efecto negativo de la insolación.

Los vientos predominantes característicos del clima tropical mesoamericano son vientos del norte, fríos y secos que por su efecto erosivo y por el cambio de temperatura que ocasiona en el terreno tienen una gran incidencia sobre éste. Los vientos del E y el NE, provenientes del Caribe, húmedos y cálidos afectan igualmente en las laderas con esta orientación, con un efecto erosivo y de humectación-deseccación. Considerando los efectos de los vientos y de la insolación, se determinan los siguientes rangos:

Rango4- Susceptibilidad muy alta en laderas orientadas al norte.

Rango3- Susceptibilidad alta en laderas orientadas al este

Rango2- Susceptibilidad moderada en laderas orientadas al oeste.

Rango1- Susceptibilidad baja en laderas orientadas al sur.

Vegetación

Como ya se ha explicado la vegetación actúa de forma positiva sobre la estabilidad de un terreno (mapa n°1."usos del suelo".anexo2). Actúa como manto protector de los agentes externos erosivos que afectan al terreno, ya sean precipitaciones o vientos, aportando al mismo tiempo cohesividad a los suelos. Se han diferenciado cuatro rangos según los usos presentes en la zona:

Rango4- Susceptibilidad muy alta: zonas quemadas.

La quema de suelos es una técnica empleada de forma habitual en las zonas de cultivo. Los suelos quemados se ven desprovistos de sujeción y en aquellos lugares en los que las raíces aportaban una cohesión quedan cavidades, siendo por tanto más vulnerables a la erosión y a la infiltración de agua.

Rango3- Susceptibilidad alta: escarpes lavados.

Son aquellas zonas en las que existen actualmente inestabilidades y en las que los escarpes se presentan con escasa o ausencia de vegetación quedando un suelo desprotegido y vulnerable a ser erosionado.

Rango2- Susceptibilidad moderada: cultivos o matorral.

Los tipos de cultivos temporales que se practican en el área dejan desprotegidos los suelos, acentuándose la erosión si se trata de laderas con pendientes relativamente altas y donde no se han practicado hasta el día de hoy obras de protección de los suelos, generándose surcos por la incisión de la escorrentía superficial, que pueden evolucionar hacia la formación de quebradas.

Rango1- Susceptibilidad baja: bosque o cafetales.

Los cafetales por ser un cultivo permanente y por necesitar árboles de mayor tamaño para dar sombra, son prácticas que favorecen la protección a la erosión de los suelos.

Determinación de la constante de susceptibilidad

Para determinar el peso de los factores condicionantes se han observado los rangos que presentan éstos en cada una de las inestabilidades identificadas en las tres quebradas de estudio durante el trabajo de campo, según sus características. Una vez determinados estos rangos sumamos el número de inestabilidades que presentan un rango determinado para cada factor condicionante. Es decir, obtenemos el número de inestabilidades que poseen una susceptibilidad muy elevada en cuanto a la litología, o una susceptibilidad media según la pendiente, etc. Al hacer el conteo de estas inestabilidades, aquellas de menores dimensiones han sido consideradas como media inestabilidad para que éstas no tengan el mismo peso que el resto.

La constante de susceptibilidad se determina para cada factor por separado. Para el factor X, si suponemos que el total de las inestabilidades presentan un rango de cuatro, y multiplicamos este número total de inestabilidades por este rango, obtendríamos el valor de máxima susceptibilidad de este factor, ya que cuatro es el rango de susceptibilidad más alto. El número total de inestabilidades es 83, que multiplicado por el rango cuatro nos da un valor de 332, como valor de máxima susceptibilidad. Este será el valor base sobre el que referiremos el valor real que obtengamos.

Para determinar este valor real multiplicamos el número de inestabilidades que presentan un rango dado por el valor de este rango (de uno a cuatro). Sumando los productos de estas multiplicaciones obtendremos un valor de susceptibilidad del factor X. Dividiendo este valor por el valor de susceptibilidad máxima obtendremos una constante de susceptibilidad. Esta constante será mayor cuanto mayor sea el peso del factor condicionante.

En la siguiente tabla se adjuntan los resultados del producto del número de inestabilidades por el valor del rango que presentan estas inestabilidades para cada factor condicionante, así como la constante de susceptibilidad.

	pendiente	litología	fracturación	Procesos activos	geomorfología	orientación	Vegetación*
Nºinestabilidades con rango4 x 4	222	174	202	122	122	78	
Nºinestabilidades con rango3 x3	88,5	118,5	46,5	157,5	97,5	51	
Nºinestabilidades con rango2 x 2		4	37	4	44	79	
Nºinestabilidades con rango1 x 1			0,5			22	83
TOTAL	310,5	296,5	286	283,5	263,5	230	83
Cte.susceptibilidad	0,93	0,89	0,86	0,85	0,79	0,69	0,25

Tabla2- relación del rango de susceptibilidad de los factores condicionantes y las inestabilidades. (*al considerar la vegetación obtenemos un gran peso para este factor, ya que todas las inestabilidades se presentan desnudas en la actualidad. Se ha tenido en cuenta por tanto que inicialmente eran zonas forestadas, ubicando el total de inestabilidades en el rango1.)

Realización del mapa

Debido a que el estudio en detalle de campo ha sido únicamente realizado para tres quebradas, ciertos valores, como la litología o el grado de actividad de los procesos gravitatorios, se han extrapolado de forma aproximada para el resto del volcán.

En cada uno de los mapas base se ha determinado el valor de susceptibilidad según los rangos anteriormente dados para todo el volcán. Así se obtiene división en polígonos con valores de uno a cuatro. Estos valores son multiplicados en cada mapa por la constante de susceptibilidad del factor condicionante.

Para la realización del mapa de susceptibilidad sumamos los distintos valores de los mapas base solapando los siete factores condicionantes. La susceptibilidad final se obtiene a partir de los valores de mínima y máxima susceptibilidad total. Esto es, sumando las constantes de susceptibilidad de cada factor obtenemos un valor de 5,35 (susceptibilidad mínima). Multiplicando cada constante por cuatro y sumando los productos obtendremos un valor de 21,4 (susceptibilidad máxima). Así determinamos los cuatro rangos finales que indicarán el grado de susceptibilidad de las distintas áreas, generándose de este modo el mapa de susceptibilidad por inestabilidades de ladera:

Susceptibilidad muy alta	21,04	17,095
Susceptibilidad alta	17,095	13,15
Susceptibilidad moderada	13,15	9,205
Susceptibilidad baja	9,205	5,26

Tabla 3-Rangos de susceptibilidad para la elaboración del mapa de susceptibilidad a las inestabilidades de ladera en el volcán de Usulután.

Representación en porcentajes de los factores condicionantes

Las constantes de susceptibilidad obtenidas anteriormente son constantes absolutas, independientes para cada factor. A continuación se muestra una representación gráfica del peso relativo de los distintos factores condicionantes.

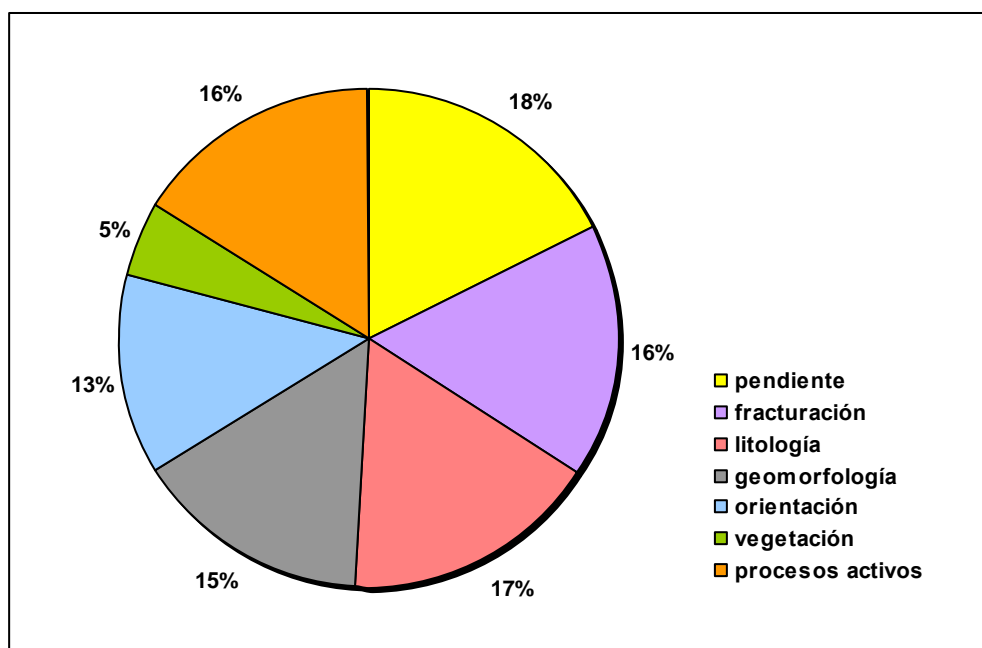


Fig1-Influencia de los factores condicionantes en porcentajes.

Como se puede observar, los factores que más influyen en la ocurrencia de inestabilidades de ladera en el volcán de Usulután son las pendientes y la litología (18%, 17%) seguidos de fracturación y actividad de los procesos (16%), geomorfología (15%) y por último orientación y vegetación (13%, 5%).

Los factores condicionantes de mayor importancia caracterizan el edificio volcánico por un alto grado de fracturación, la existencia de litologías vulnerables a la erosión y por altas pendientes. Si observamos como afectan las fracturas en las inestabilidades solapando ambos mapas, inestabilidades y elementos estructurales, podemos ver como la mayoría de inestabilidades están afectadas por fracturación, más concretamente, un 98%.

La litología predominante en el volcán de Usulután es altamente susceptible por el bajo grado de consolidación que presenta, debido a su temprana edad. Un 52% de las inestabilidades se producen en litología altamente susceptible.

La predominancia de fuertes pendientes, debido a que se trata de un relieve joven, se dan principalmente en las partes altas y cabeceras de las quebradas, donde la red de drenaje,

también joven y por tanto de carácter muy erosivo, se encaja fuertemente en zonas preferenciales generando laderas muy verticales. Casi el 66% de las inestabilidades se dan en pendientes superiores al 50%, el 34% restantes corresponde a pendientes superiores al 30%.

Con similar porcentaje, en el factor geomorfológico, se obtiene casi un 37% de inestabilidades identificadas en unidades altamente susceptibles como cabeceras de las quebradas, fondos de valle y encajamientos torrenciales, e igual porcentaje en unidades susceptibles, laderas altas. En estas zonas predominan las fuertes pendientes debido principalmente al fuerte encajamiento de la red de drenaje.

En cuanto a la actividad, el 37% corresponde a inestabilidades donde se observa actividad muy alta, seguido de un 62% de actividad alta.

De manera global, el factor orientación presenta una menor incidencia con relación a los factores condicionantes de mayor peso. Cabría esperar observar en la orientación más desfavorable, la norte, una ladera más afectada, sin embargo la influencia de la orientación queda compensada por la existencia de una cobertera vegetal muy desarrollada.

La vegetación, aunque haya sido estimado como el factor que menor incidencia tiene, presenta una ventaja con relación al resto de los factores ya que es el único sobre el que se puede incidir de manera directa. La importancia relativa ante otros factores de mayor peso no debe hacer menospreciar la influencia que éste tiene. La protección que se consigue en zonas bien vegetadas, en ocasiones compensa la influencia de otros factores de mayor peso. La evolución de las inestabilidades es debida en gran parte a las condiciones de desprotección de las laderas, ocasionada durante y después de las fuertes sacudidas por la actividad sísmica y la actuación erosiva de las fuertes lluvias que se acentúa por la rápida deforestación y continuos incendios que suceden en las últimas décadas. Por tanto, la vegetación y el uso del recurso suelo practicado son de vital importancia. Reforestando y haciendo un buen uso de suelo, podemos frenar o desacelerar el proceso natural de erosión que afecta al edificio volcánico.

Resultados de la susceptibilidad

La zonificación de la susceptibilidad se encuentra controlada por los factores condicionantes, especialmente por las pendientes, la geomorfología y la litología, como factores de mayor peso.

Las áreas de susceptibilidad más elevada se encuentran principalmente en las cabeceras de las quebradas y en los tramos más vulnerables de las laderas, ladera oeste para las quebradas El Cargadero y California y ladera sur para La Quebradona, coincidentes con

las zonas que han sido identificadas como inestables en los mapas en detalle de las quebradas.

Las áreas de susceptibilidad alta se encuentran en la práctica totalidad de las quebradas de estudio y en las cabeceras de las quebradas asociadas a las laderas del volcán.

El resto de la ladera presenta una susceptibilidad moderada, principalmente por ser zonas de menor pendiente, con un menor control estructural y en las que los procesos de erosión hídricos no actúan con tanta intensidad, hecho aun más notorio en las zonas de la ladera baja, caracterizadas por un grado bajo de susceptibilidad.