

11.CONCLUSIONES

A lo largo de este informe se han ido analizando los diferentes factores que influyen y caracterizan las amenazas identificadas en la zona del volcán de Usulután que han sido objeto de este estudio, inestabilidades de ladera, avenidas e inundaciones. Se han analizado los factores que determinan la ocurrencia de los procesos asociados a estas amenazas, los factores condicionantes y los factores desencadenantes. Como ya explicábamos al inicio de este documento, inestabilidades e inundaciones son dos procesos asociados cuya dinámica debe tratarse como un conjunto, ya que la ocurrencia del primero va a determinar, de forma directa, la del segundo. No obstante, se ha tratado de hacer un análisis por separado para lograr una representación más clara y un mejor entendimiento.

La caracterización de una amenaza, así como la identificación de la peligrosidad y riesgo asociados, requieren de un estudio en detalle, no solo del momento en que se realiza dicho estudio, sino de la evolución de esta amenaza en un tiempo pasado, hecho que proporciona una gran información sobre posibles eventos futuros asociados a ella.

Se ha realizado una caracterización del estado general en el que se encuentra el volcán en el momento actual y más en detalle de las tres quebradas en las que se ha basado el estudio, *El Cargadero*, *La Quebradona* y *California*. Para ello se ha realizado un análisis morfológico de las subcuencas y el inventario y cartografía de las inestabilidades de las laderas. Podrá así realizarse un seguimiento del desarrollo de los procesos y de los cambios provocados por éstos.

Se ha determinado igualmente el grado susceptibilidad por inestabilidades de ladera a partir del análisis de los factores condicionantes y la identificación de áreas inundables, así como un estudio hidrometeorológico en detalle, que podrá servir como base para completarse en el caso de lograrse un registro más prolongado en cuanto a datos de precipitaciones e intensidades y de sismos en la zona.

Como ya se ha indicado repetidas veces, la falta de documentación, registros y datos disponibles, ha complicado la determinación de la peligrosidad de las inestabilidades y riesgo asociado a las avenidas e inundaciones. No obstante se ha realizado una caracterización de manera cualitativa de peligrosidad y riesgo asociado al volcán por inestabilidades e inundaciones.

A lo largo de la presentación de los diferentes capítulos se han ido elaborando conclusiones. En éste, se pretende dar una visión general y obtener los resultados que servirán de base para la elaboración y diseño de recomendaciones y medidas correctoras para su aplicación en el área.

Se presentan dichos resultados o conclusiones según las diferentes temáticas que han sido tratadas en este estudio, que constituyen los factores condicionantes y desencadenantes de las amenazas presentes. Se detallan también los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización de las amenazas, susceptibilidad y peligrosidad.

Geomorfología y relieve

La geomorfología y el relieve han sido analizados como factores condicionantes de la ocurrencia de inestabilidades de ladera. De manera general se observa un edificio volcánico caracterizado por un intenso encajamiento de la red hídrica según líneas preferenciales, con la existencia de grandes y pequeñas quebradas en estado de continua evolución.

Durante la elaboración del inventario de inestabilidades, se observó cómo, además de las zonas identificadas, la casi totalidad de las laderas de las quebradas *El Cargadero*, *La Quebradona* y *California*, se encuentran afectadas por procesos de erosión y en un estado de equilibrio semiestable. En resumen:

- Se trata de un área de relieve joven, con pendientes mayores de 30% en gran parte del edificio volcánico.
- La dinámica principal que da forma al relieve está caracterizada por los procesos de erosión, tanto por la ocurrencia de movimientos gravitatorios, como debidos a la intensa dinámica torrencial, y por procesos de sedimentación.
- Dichos procesos se desarrollan de forma natural, en la búsqueda de un equilibrio tanto de las laderas, como de la red de drenaje, modificando el perfil hacia menores pendientes.

- La mayor densidad de inestabilidades se localiza en las partes de la ladera alta y cabeceras de las quebradas.
- Las inundaciones y avenidas se localizan en la ladera baja, asociadas al pie de las quebradas y las morfologías cónicas.

Estudio geológico e hidrogeológico

Mediante la observación de fotos aéreas y la observación de las litologías en las zonas de escarpes se concluye que:

- La zona está constituida por materiales volcánicos efusivos, formados principalmente por depósitos piroclásticos con un grado de consolidación bajo y niveles basáltico-andesíticos, que presentan distintos grados alteración. Su disposición radial cabuzando hacia el exterior del edificio volcánico favorece junto con las características intrínsecas de estos la susceptibilidad a la ocurrencia de inestabilidades.
- El edificio volcánico se encuentra altamente fracturado debido a sus rasgos litológicos, presencia de material poco consolidado, y a la situación geológica, en el margen sur de la fosa central próxima a la zona de subducción.
- Se reconoce la presencia de dos familias principales de fallas según las dos direcciones estructurales principales E-W y NW-SE, a veces norteada, así como el sistema de fallas subordinadas NE-SW, con un control decisivo sobre la ocurrencia de inestabilidades y el encajamiento de la red hídrica.
- La infiltración del agua meteórica se produce favorecidos por la existencia de una porosidad elevada en determinadas litologías o a favor de superficies de rotura (fallas y diaclasas) que propician la ocurrencia de inestabilidades gravitatorias.
- Las inestabilidades se producen principalmente en lugares donde existen una o más fallas, asociadas a conjuntos litológicos con diferentes competencias (como las intercalaciones de niveles basáltico-andesíticos y depósitos piroclásticos).

Estudio hidrometeorológico

Mediante el análisis de las precipitaciones y del comportamiento del agua meteórica se ha detectado la importancia de este factor como desencadenante tanto de inestabilidades de ladera como de avenidas e inundaciones.

La erosión hídrica actúa sobre las laderas y quebradas debido al impacto de las gotas de lluvia y a la escorrentía superficial. Ambos procesos están condicionados por la existencia o no de cobertura vegetal que es capaz de absorber la energía de la gota de lluvia, frenar la erosión y transporte de las partículas del terreno y disminuir la escorrentía superficial. Se desarrollan con mayor intensidad asociados a fuertes pendientes y zonas de poca cohesión de las partículas de suelo o roca.

El agua actúa también aumentando las presiones internas al infiltrarse en el terreno, favoreciendo la ocurrencia de inestabilidades.

Se puede concluir:

- Tiene especial importancia, en la ocurrencia de inestabilidades gravitatorias y avenidas e inundaciones, la intensidad diaria con que se producen precipitaciones y la precipitación acumulada que determina el grado de saturación del terreno y por tanto la capacidad de infiltración de éste.

- La capacidad erosiva de la escorrentía superficial es muy intensa, especialmente en momento de fuertes lluvias, tanto la de los flujos de las quebradas, favorecida por la carga sólida que transportan, como la que circula por las laderas, que actúa sobre unos suelos en ocasiones muy degradados. El desarrollo de estos procesos de erosión da lugar a una pérdida de sustentación de las laderas, tanto por erosión de los cauces de las quebradas, como por la erosión directa de las laderas del volcán, contribuyendo a la existencia de una mayor probabilidad de ocurrencia de inestabilidades, así como de avenidas e inundaciones.

- La capacidad soportable de los cauces es insuficiente, en lo que respecta a la carga líquida estimada, en algunos de los puntos a lo largo de las quebradas. La importante carga sólida que es transportada en momentos de fuertes lluvias aumenta la probabilidad de la ocurrencia de desbordamientos, avenidas e inundaciones.

- Las condiciones más propicias para la ocurrencia de inestabilidades e inundaciones son precipitaciones intensas en terreno saturado, especialmente si ha habido o hay actividad sísmica.

Sismicidad

La continua sismicidad que caracteriza el país se debe a la situación geológica de éste, sobre un borde de placas convergente. La ocurrencia de sismos, junto al factor hídrico, son los factores desencadenantes de la ocurrencia de inestabilidades.

La elevada sismicidad afecta a la estabilidad de los taludes, debido a las presiones internas provocadas por las ondas sísmicas y a la creación de fracturas. Generan por tanto la ocurrencia de procesos gravitatorios y condiciones muy favorables para la evolución de éstos. La ocurrencia de inestabilidades genera grandes acumulaciones de material en los cauces susceptible de ser transportado por los regímenes torrenciales, aumentando la probabilidad de ocurrencia de desbordamientos e inundaciones.

Actividad de los procesos

Los procesos con mayor incidencia en el área de estudio son los procesos de erosión hídrica y gravitatoria, la sismicidad, la sedimentación y las inundaciones y avenidas.

Los procesos de erosión actúan con mayor intensidad en la ladera alta y en las quebradas del volcán. Se ha caracterizado el grado de actividad de los procesos gravitatorios, observándose un grado de moderado a muy alto asociado a las quebradas de estudio.

Los procesos de sedimentación actúan principalmente en la ladera baja, asociados en las quebradas más evolucionadas a los conos de deyección.

Factor antrópico

El factor antrópico interviene directamente sobre la vegetación y los suelos. Las actividades que desarrolla el hombre determinan el estado en que se presentan los citados recursos naturales. De forma indirecta este hecho repercute sobre la intensidad de los procesos activos. El punto donde radica la importancia de la vegetación y los usos del suelo, es el hecho de que es el único factor condicionante de los procesos que se caracterizan en este estudio en el que se puede intervenir con el fin de minimizar el riesgo asociado.

Mediante el análisis de los aspectos poblacionales y usos del suelo observamos el predominio de un uso intensivo de este recurso y la frecuente quema de terrenos, degradando la cobertera vegetal. Por otra parte, a nivel de infraestructuras, se observa una problemática

en cuanto al estado y ubicación de carreteras y caminos, que en algunos casos constituyen las únicas vías de acceso a núcleos rurales.

Como consecuencias de la pérdida del suelo se detectan de forma general las siguientes problemáticas:

- Reducción de suelo útil para la agricultura.
- Deforestación.
- Aumento de las áreas expuestas a los procesos geodinámicos externos.
- Desestabilización de los suelos superficiales.
- Aumento del caudal líquida y sólido de las quebradas.
- Acumulación de materiales en los lechos de las quebradas.

Estas problemáticas dan lugar a unos efectos indirectos sobre la población:

- Pérdidas económicas por reducción de la producción agrícola y forestal.
- Disminución de la calidad de los cultivos al producirse un empobrecimiento del suelo.

Por otra parte, se han detectado las siguientes carencias:

- La falta de una práctica de conservación y planificación del uso del recurso forestal y agronómico, asociado a una falta de capacitación de los miembros de las comunidades y de las entidades locales, y a una carencia de concienciación sobre la importancia que supone la conservación de estos recursos.

- La falta de adecuación de la red viaria a las condiciones existentes en el área detectada en: la ubicación de caminos en líneas preferenciales de flujo del agua de la escorrentía superficial y carencia de una red de drenaje para la evacuación de éste agua; la ubicación de carreteras perpendiculares a las quebradas, sin que exista un canal de desagüe con una capacidad adaptada a los caudales asociados a dichas quebradas.

- Inexistencia de sistemas de drenaje de las aguas de lluvias y de las aguas negras en la mayor parte de viviendas de las áreas rurales y falta de concienciación sobre la problemática asociada.

Caracterización de las amenazas

Las amenazas caracterizadas en la zona han sido las inestabilidades de ladera y las avenidas e inundaciones.

Las inestabilidades de ladera han sido consideradas como una amenaza media. Presentan de forma general unos estados de desarrollo de medio a altos y unos grados de estabilidad bajos. La principal tipología identificada se trata de deslizamientos traslacionales

con desprendimientos asociados, generalmente sobre depósitos piroclásticos con intercalación de niveles basáltico-andesíticos. Se distribuyen a lo largo de la ladera alta del volcán y asociadas a las quebradas. Esta ubicación está condicionada por el rango de los factores condicionantes que determinan el grado de susceptibilidad del terreno.

Las avenidas e inundaciones ocurren en las zonas bajas de la ladera, zonas de suave pendiente donde el flujo pierde su capacidad de transporte, asociados a la escorrentía de las propias laderas o al desbordamiento de las quebradas. Las avenidas e inundaciones asociadas a desbordamientos de las quebradas transportan una importante carga sólida. La amenaza va a depender del escenario en el que sucedan y va a verse disminuida a medida que nos alejamos del punto de desbordamiento. La escorrentía superficial en las laderas están asociadas a las morfologías cónicas donde se generan flujos en forma de arroyada en manta que transportan principalmente carga en suspensión (lodo). La amenaza es menor pero de frecuencia con la que suceden es alta y dependiente de las intensidades de las precipitaciones y del grado de saturación de suelo.

Se ha determinado la siguiente relación en función del tipo de escenario ante el que nos encontramos:

	TERREMOTO	NO TERREMOTO
Amenaza Baja		Invierno seco
Amenaza Media	Invierno seco	Invierno normal
Amenaza Alta	Invierno normal	Invierno copioso
Amenaza Muy Alta	Invierno copioso	

Susceptibilidad a las inestabilidades de ladera

La susceptibilidad del terreno está determinada por los factores condicionantes, características intrínsecas del terreno. De forma general se concluye que:

- La pendiente, la litología, la fracturación y la actividad con que se desarrollan los procesos, son los factores que más peso tienen en la determinación de la susceptibilidad del terreno.

- Las áreas de susceptibilidad muy alta están asociadas a las cabeceras de las quebradas y a tramos de las laderas de éstas: ladera oeste (Quebradas *El Cargadero* y *California*) y ladera sur (Quebrada *La Quebradona*)

- Las áreas de susceptibilidad alta se asocian a las quebradas de estudio y a las cabeceras de las quebradas ubicadas en las laderas del volcán.
- Las áreas de susceptibilidad moderada y baja se asocian a la ladera media y baja del volcán.

Peligrosidad por inestabilidades de ladera

A estas zonas de susceptibilidad se les ha asociado una peligrosidad en función de la caracterización de la amenaza y de la probabilidad de ocurrencia, estimándose 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

Análisis cualitativo de la peligrosidad por avenidas e inundaciones

En la estimación de la frecuencia de la amenaza por avenidas e inundaciones se estima:

- Debido a la dificultad de determinar los diferentes rangos de peligrosidad de los diferentes escenarios, terremotos y “no” terremotos, asociados a las diferentes amenazas que se generan dependientes del régimen de precipitaciones, estaciones e intensidades de lluvias, y el momento de la ocurrencia (grado de saturación del suelo) se analiza una peligrosidad para la ocurrencia de la mayor amenaza en el análisis cualitativo del riesgo por avenidas e inundaciones.

- Sin embargo, podemos determinar que el estado actual de las quebradas, con importante material susceptible de ser arrastrado y cauces con poca capacidad soportable, aumenta la probabilidad de ocurrencia de desbordamientos en las partes bajas de la ladera, en forma de avenidas e inundaciones aún en inviernos secos, si la intensidad de las lluvias es elevada.

- El estado de desprotección actual de las laderas, propicia una elevada escorrentía superficial con lluvias de intensidades de moderadas a altas, dando lugar a flujos de lodo con

amenaza baja y moderada respectivamente, que discurren por las partes bajas de la ladera. La ocurrencia de lluvias de intensidades moderadas y altas es habitual en la estación lluviosa, por tanto, esta amenaza baja tiene una probabilidad alta de ocurrencia.

Análisis cualitativo del riesgo por avenidas e inundaciones

Se ha elaborado un análisis cualitativo del riesgo por avenidas e inundaciones, diferenciado el riesgo asociado a laderas y a quebradas, teniendo en cuenta que ambos procesos ocurren simultáneamente y se deben sumar, obteniendo:

Asociado a las laderas

El agua que se recoge en las laderas, discurre transportando gran cantidad de partículas finas, dando lugar a un flujo con una importante carga en suspensión que se canaliza frecuentemente en caminos o pequeñas quebradas.

Se ha estimado que se trataría en este caso de una amenaza media, para acumulaciones e intensidades de lluvias elevadas, determinada en función de la energía involucrada en el proceso. La probabilidad de ocurrencia sería media, asociada a eventos huracanados. La peligrosidad resultante sería media.

Considerando para esta amenaza una vulnerabilidad media, siendo el grado de exposición alto. El daño resultante sería medio-alto.

Sumando los factores estimados obtendríamos un riesgo medio para las comunidades que se encuentran al pie del volcán en cuanto a los efectos de la escorrentía que circula por la ladera.

Asociado a quebradas

Se ha caracterizado el riesgo que supondría una amenaza de avenidas e inundaciones con gran potencial erosivo, que pueden ocurrir tras momentos de terremotos y fuertes lluvias.

La probabilidad de que pueda darse esta amenaza muy alta es baja, resultando una peligrosidad asociada media-alta.

La exposición y la vulnerabilidad son alta y muy alta respectivamente, ocasionando un daño alto.

El riesgo resultante se puede calificar de medio a alto.

