

LA MODELIZACIÓN DE LOS FLUJOS VOLCÁNICOS PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS Y LA PLANIFICACIÓN ESPACIAL EN HAWAII

Urbano Fra Paleo

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Extremadura

Frank Trusdell

Hawaiian Volcano Observatory. U.S. Geological Survey

RESUMEN

La evaluación de los riesgos causados por el volcán Mauna Loa se ha basado en la modelización de los niveles de riesgo y en el seguimiento de las variables físicas precursoras de una erupción. La aplicación de los estudios a la planificación del territorio no ha sido completa por la falta de un modelo territorial que integre el factor riesgo y por la carencia de una perspectiva sobre la relación entre el origen de los episodios y espacios habitados, modelización que se lleva a cabo analizando la disposición espacial de las coladas por medio de la geometría del terreno.

Palabras clave: Riesgos naturales, volcanes, modelización ambiental, planificación territorial.

ABSTRACT

The assessment of volcanic risk caused by Mauna Loa has been based on hazard zoning and monitoring of physical phenomena considered as precursors of an eruption. The application of the results to spatial development has not been complete for the absence of a territorial model that integrates the risk factor and for the lack of a perspective regarding the relationship between episode sources and settlements, modelling that has been carried out analysing the spatial pattern of lava flows through the terrain geometry.

Key words: Natural hazards, risk, volcanoes, environmental modelling, spatial development.

Fecha de recepción: marzo de 2001.

Fecha de admisión: junio de 2001.

1. ÁREA DE ESTUDIO

Las Islas Hawai'i, son un espacio habitado de relativa pequeña dimensión —16.636 km²— que se caracteriza por su aislamiento, fragmentación y localización en una zona de elevados riesgos naturales (ciclones tropicales, tsunamis y erupciones volcánicas), circunstancia que supone un coste importante por los daños causados o por los gastos derivados de la prevención de estos riesgos, correspondientes a lo que Smith (1996) llama ajustes al riesgo por medio de la aceptación y la distribución de la carga.

Las 8 islas grandes —Hawai'i, Maui, Lana'i, Moloka'i, O'ahu, Kaho'olawe, Kaua'i y Ni'ihau— y las 124 pequeñas, se integran en un conjunto mucho más amplio que es la cadena montañosa marina Emperador-Alineación de Hawai'i de 6.126 km. Esta gran estructura volcánica, con dirección N en la primera sección y NO en la segunda, está formada por más de 80 grandes volcanes y se extiende desde el centro del Océano Pacífico hasta las Islas Aleutianas. La actividad volcánica comenzó hace 85 millones de años en este *hot-spot* —punto débil de la corteza que permite que el magma aflore a la superficie— y el movimiento de la placa pacífica dio lugar a 129 volcanes, de los que 104 formaron islas que, en la Alineación Emperador, se hundieron por subsidencia. Los volcanes se formaron con una frecuencia temporal cada vez mayor, con un decreciente intervalo espacial y una altura creciente. En la Cadena Emperador la tasa de crecimiento es de 1,1 volcán cada millón de años y el espaciado es de 57 km., 1,7 Ma en la parte occidental de la Cadena Hawaiiana y 4 en la parte oriental con un espaciado respectivo de 45 y 30 km. (Clague, D.A., 1996), cambios que responden a una variación en el movimiento de la placa sobre el *hot-spot* en los últimos 5 Ma. Los volcanes que afloraron a la superficie presentan una ruptura de la pendiente del terreno, siendo menor sobre la superficie. Tras cesar la actividad volcánica y el aporte de materiales, la subsidencia y la erosión son los procesos dominantes, para envejecer posteriormente mediante la subsidencia como único proceso y alcanzar así la fase Guyot.

La isla de Hawai'i está compuesta por cinco volcanes: Kohala, Hualalai, Mauna Kea, Mauna Loa y Kilauea, que forman un complejo poligenético alimentado por un intrincado sistema de conductos conectado a las cámaras magmáticas individuales. El primer volcán fue Mahukona, al NO, ya extinto y que ha permanecido siempre bajo el mar; Loihi, al SE, es el más reciente y permanece aún sumergido.

Mauna Loa (montaña extensa en hawaiano) es un volcán escudo activo que se encuentra en su fase evolutiva final —por lo que su actividad eruptiva está declinando—, y ocupa una gran parte (50,5%) de la superficie de la isla de Hawai'i con sus 5.100 km². Se levanta 4.169 m. sobre el nivel del mar, que sumados a los 5.000 m. sumergidos y la curvatura de la placa pacífica por el peso de esta masa, dan una dimensión de su volumen, 41.650 km³. A la tasa eruptiva actual se calcula que no se ha construido en menos de 1 Ma, pero la tasa actual es mucho más reducida que la pasada (Clague, D.A., 1998), con un período de recurrencia de 1.459 días.

Estructuralmente se compone de una gran caldera compuesta en la cumbre —Moku'aweoweo— formada en torno al año 1200, dos rift al NE (NERZ) y SO (SWRZ) y un conjunto de fisuras radiales localizadas al N y NO cuya proximidad a los rift hace que puedan considerarse desde el punto de vista de foco como una unidad, ya que un 76,1% está en un radio de

1,5 km. de aquéllos. El rift SWRZ se extiende desde la cumbre hasta la orilla del mar y por debajo de éste, siguiendo una dirección menos homogénea que el NERZ.

El flanco oeste y sureste muestran una alta inestabilidad, por asentarse en zonas no consolidadas de elevada pendiente, y una parte se está desplazando a lo largo de fallas normales que forman el sistema de Kealakekua-Kaholo y Hanuapo-Kaoiki respectivamente. De forma periódica se producen pequeños deslizamientos que dan lugar a terremotos de intensidad media, que en períodos más largos toman forma de deslizamientos en masa como 'Alika, hace 110.000 años.

Se han documentado 33 erupciones en un período que se ha denominado histórico, comprendido entre 1832 y 1984. Todas han tenido origen en el entorno de la caldera para migrar posteriormente en la mitad de los casos hacia las zonas debilitadas del rift o las fisuras, excepto las erupciones de 1843, 1859, 1877 y 1935. El primer cronista fue el reverendo Titus Coan que, procedente de la costa este de Estados Unidos para evangelizar a la población nativa, con fina pluma describió en el *American Journal of Science* todo lo sucedido en la isla desde 1835 hasta su muerte en 1882 (Trusdell, F.A. y Lockwood, J.P., 1997).

2. LOS RIESGOS VOLCÁNICOS

Los riesgos derivados de una erupción y asociados a la actividad volcánica son las coladas volcánicas, fragmentos de lava, gases emitidos, terremotos, deslizamientos del terreno y fracturas, aunque estos dos últimos sólo se producen prácticamente en zonas muy próximas al punto de erupción. Las erupciones de los volcanes de tipo hawaiano son apacibles, de lavas basálticas y con un componente explosivo inexistente o débil, al menos en las que se han producido en tiempos históricos.

Los riesgos más comunes y de mayor impacto son los derivados de las coladas volcánicas, que recorren grandes distancias siguiendo cursos que cubren y destruyen los elementos que encuentran a su paso. En el vecino volcán Kilauea la continua erupción desde 1983 desde los conos del rift Pu'u 'O'o y Kupaianaha ha tenido una serie de episodios que han destruido 181 viviendas, con unas pérdidas económicas de 61 millones de dólares hasta 1991, sin incluir las infraestructuras —13 km. de carretera de acceso a los asentamientos— y la propiedad del suelo. Habría que añadir edificaciones singulares de carácter público como el Waha'ula Visitor Center, Royal Gardens Community Center, Mauna Kea Congregational Church, yacimientos arqueológicos como el de Waha'ula y los asentamientos históricos de Lae'apuki, Kamoamo, Ka'ili'ili y Poupou-Kauka.

La estratificación del riesgo

La primera modelización y cartografiado de las zonas de riesgo fue realizada por Donald Mullineaux y Donald Peterson en 1974, posteriormente revisada por Mullineaux, Peterson y Crandell en 1987, Christine Heliker en 1990, y Wright, Chu, Esposito, Heliker, Hodge, Lockwood y Vogt en 1992 (Kauahikaua *et al.*, 1995 y Trusdell, F.A., 1995), autores que formularon un modelo basado en nueve niveles de riesgo utilizando criterios cuantitativos y en función de la probabilidad de que un área sea cubierta por flujos (tabla 1), aunque sin considerar otros efectos derivados de una erupción. Los criterios utilizados han sido la proximidad

a la cumbre —donde está la caldera— y a los dos rift, la localización de las áreas cubiertas por la lava y la frecuencia de las erupciones en el período del que existen registros históricos, así como en los últimos 750 años, y la topografía actual de la superficie. Esta estratificación de los riesgos se ha aplicado a toda la isla, a los cinco volcanes, pero en la zona de influencia de Mauna Loa sólo encontramos cuatro tipologías de zonas: 1,2,3 y 6 (figura 1). La zona 4 se localiza en Hualalai, la 5 en Kilauea, las 7 y 8 en Mauna Kea y la 9 en Kohala. Las tres primeras categorías además son compartidas por el volcán Kilauea, actualmente en erupción.

Tabla 1
LOCALIZACIÓN Y CRITERIOS DE LA ZONIFICACIÓN DE RIESGOS

Zona	Superficie cubierta por la lava desde 1800 (%)	Superficie cubierta por la lava en los últimos 750 años(%)	Áreas
1	> 25	> 65	Caldera y rift
2	15-25	25-75	Áreas adyacentes
3	1-5	15-75	Áreas distantes
6	-	Muy poca	Áreas protegidas por la topografía

Fuente: US Geological Survey.

Un análisis complementario es el realizado por Lockwood y Lipman (1987), que han dividido la superficie del volcán en cuatro distritos en función del origen de las erupciones y de la tasa de extrusión: rift NE (NER), rift SO (SWR), área al este de Moku‘aweoweo (MKS) y área al norte de Moku‘aweoweo (MKN).

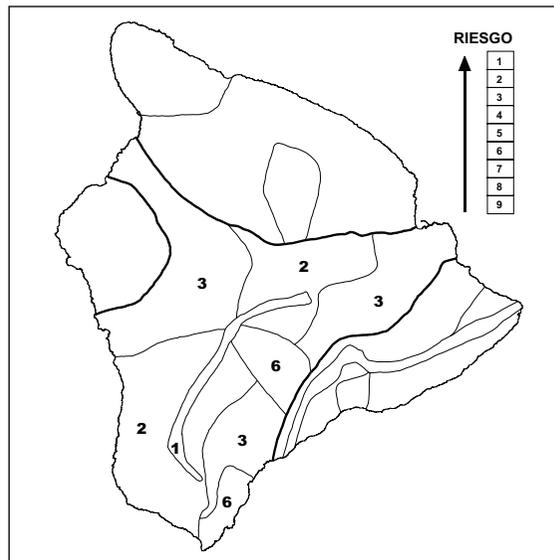


Figura 1. Zonas de riesgo.

3. LA EVALUACIÓN DEL RIESGO

Hay distintos enfoques para modelizar el riesgo que se pueden reducir a dos: los enfoques frecuencial y espacial o, de forma simplificada, se trata de conocer el momento cuándo se produce —la secuencia eruptiva— o dónde se produce —la localización— la erupción (tabla 2). Decker *et al.* (1995) observa que la modelización temporal puede llevarse a cabo de dos modos, midiendo los tiempos de reposo cuando las erupciones son cortas, o midiendo el tiempo de recurrencia que expresa el intervalo de tiempo comprendido entre el comienzo de una erupción y la siguiente. Wickman (1966) concluyó que los intervalos de tiempo entre las erupciones son aleatorios, y Klein (1982) que el tiempo medio de recurrencia era en el momento anterior a la erupción de 1984 de 1.412 días; este autor observa también que las erupciones de Mauna Loa y Kilauea tienen una correlación negativa, es decir, que cuando las erupciones en un volcán son frecuentes en el otro son escasas, lo que tiene relación con que el volumen de una erupción en Mauna Loa es proporcional al tiempo transcurrido desde la anterior.

Una perspectiva espacial es la adoptada por Trusdell (1995) al determinar la región inundable por las coladas, utilizando las características de 17 flujos históricos documentados, región que excede en ciertos casos los límites del volcán, mientras que en el NO, E y SE se retrae. Para ello ha realizado el cartografiado completo de las coladas históricas y prehistóricas así como la caracterización de su morfología, continuando la labor iniciada por Lockwood (Trusdell, 1995). La perspectiva espaciotemporal ha sido adoptada por Kauahikaua *et al.* (1995) para estimar los intervalos de recurrencia y el porcentaje de cobertura en una malla de 3 km de resolución, en las cuencas estimadas y en las zonas de riesgo 1 y 2.

Se ha planteado una modelización de los riesgos derivados de las coladas volcánicas partiendo del principio de que la geometría del terreno actual condiciona las trayectorias que las coladas pueden seguir, ya que los flujos de lava pretéritos condicionan los procesos futuros. Desde esta perspectiva todas las zonas son potenciales objetivos, dado que la isla ha sido edificada por otros flujos, el 90% de la isla está cubierta por coladas de menos de 4.000 años (Decker *et al.*, 1995). Se trata de un modelo predictivo, por cuanto permite conocer con la aparición de un evento cuáles son los procesos que pueden tener lugar.

Tabla 2
MODELIZACIÓN ESPACIO TEMPORAL DEL RIESGO VOLCÁNICO

VARIABLE	SIGNIFICADO
Tiempo	Cuándo ha estado activo
Frecuencia temporal	Más activo en unos períodos que en otros
Espacio	Dónde ha estado activo
Frecuencia espacial	Más activo en unas áreas que otras
Espacio + Tiempo	Dónde ha estado más tiempo activo
Tiempo + Espacio	Cuándo ha ocupado más área

El objetivo es conocer las variables geométricas del terreno, particularmente pendiente y curvatura, para predecir las rutas óptimas y seguir el comportamiento y la localización espacial de las variaciones —velocidad de flujo, cambios de ésta— que pueden tener lugar a medida que siguen su curso hacia el máximo punto distal localizado en la costa. Se parte de un modelo digital del terreno (MDT) con una resolución espacial de 20 metros para obtener información de los procesos a pequeña escala, resolución que se ha reducido en algunos análisis a 200 m. para obtener información generalizada a escala regional.

El primer paso dado ha sido la identificación de los cursos potenciales de las coladas (figura 2), asumiendo que los focos pueden ser los rift y la cumbre (Trusdell, 1995), las cuales siguen la dirección de máxima pendiente a partir del punto de efusión. Se identifican además los límites máximos alcanzables por aquéllas y los canales que conducen el flujo de la lava; para estos últimos se hace con una menor resolución y así definir a escala local las áreas afectadas. Puede decirse que una zona no será afectada con elevada probabilidad si lo ha sido recientemente, puesto que el relieve generado desviará los nuevos flujos hacia flujos más antiguos. En los estudios realizados sobre Mauna Loa hasta el presente, se ha venido utilizando un área de potencial impacto de este volcán definida por los límites perimetrales máximos de los flujos históricos y prehistóricos, pero el área proximal global puede extenderse más allá de acuerdo con el relieve actual por medio de nuevos flujos que fluyan por las áreas periféricas.

Como resultado del análisis anterior se identifican las áreas (figura 3) o regiones volcánicas, que ponen en relación los flujos potenciales entre sí —ya que siguen direcciones homogéneas—, los destinos u objetivos alcanzables y los focos potenciales. Se han identificado tres zonas de sombra de tamaño medio al SO, SE y E en las que el modelo estima que no hay coladas que puedan tener su origen en la caldera o los rift. Sólo podrían producirse episodios si tiene lugar una erupción en la parte más baja de los rift —al E— o en una fisura que se abriese en estas mismas áreas. La zona de sombra al oeste del asentamiento Hawaiian Ocean View Estates (HOVE) coincide casi exactamente con la Reserva Natural Manuka, un espacio fores-

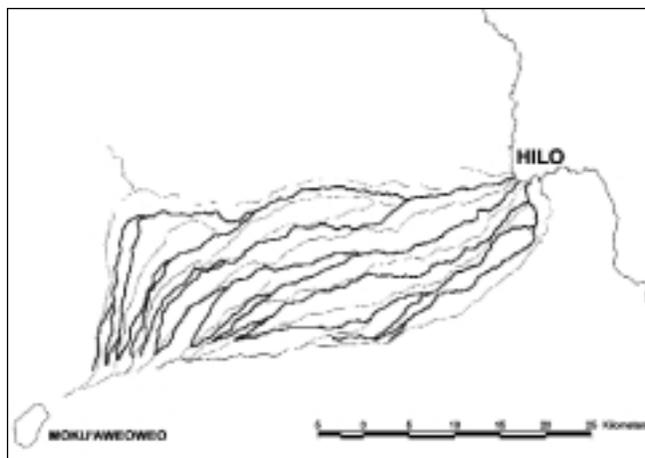


Figura 2. Flujos y límites en la región NE.

tal que ha evolucionado como tal debido a la ausencia de episodios en el período histórico. La zona de sombra de Na'alehu al SE ya había sido identificada en los mapas de riesgo, a diferencia de las demás, aunque su extensión es menor. La tercera —al este de la ciudad de Hilo— tiene una forma elongada, indicando que sólo episodios muy localizados pueden alcanzar el área donde está el aeropuerto principal de la isla. Finalmente, la zona MKS, a la que se le ha asignado un nivel de riesgo 6, no parece cumplir las condiciones para ser una zona de sombra, siendo cierto que sólo erupciones procedentes de la caldera que rebosen ésta o que abran fracturas en este flanco —no existentes hoy— pueden generar flujos que la alcancen.

Se identifica una estructura compuesta de cinco regiones volcánicas que sigue un patrón similar a la zonificación realizada por Lockwood y Lipman (1987), aunque con ciertas diferencias conceptuales. La región NO es una cuña insertada entre los volcanes Mauna Kea y Hualalai a la que pueden llegar tres flujos del cráter y uno del NERZ, los flujos no experimentan una variación significativa en la dirección seguida ya que las pendientes tienen un gradiente continuo. La región NE contiene siete grandes flujos procedentes exclusivamente del NERZ y con destino en la ciudad de Hilo, alguno toma dirección inicial N hacia Mauna Kea para virar a dirección NE y bordear este volcán, mientras otros adoptan una dirección norte al final de su trayectoria para virar hacia Hilo (figura 2). La región E cubre zonas densamente ocupadas por la población como Mountain View, Kurtistown y Kea'au, con un des-

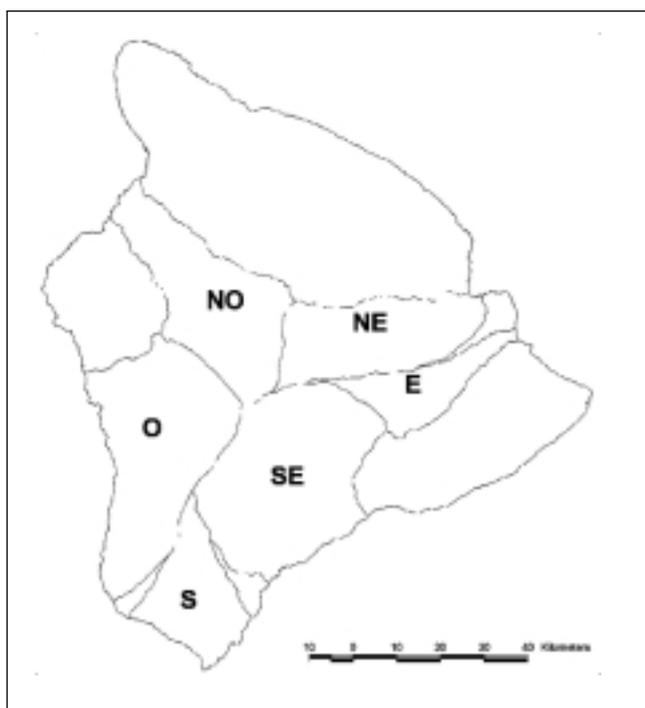


Figura 3. Regiones volcánicas.

tino muy focalizado en este punto, con origen en el NERZ y bordeando Kilauea. En la región SE la mayor parte de los flujos sufre un giro notable ya que toman una dirección inicial hacia la caldera de Kilauea para virar en su tramo final hacia el SO rodeando este volcán. Los flujos procedentes de Moku'aweoweo se insertan entre los procedentes de los rift NERZ y SWRZ. Es también la zona con menor impacto humano, pues prácticamente sólo se encuentra con el asentamiento de Pahala. En la región Sur, los flujos parten exclusivamente de la parte septentrional del SWRZ, zona muy próxima a la costa, lo que implica que los objetivos se encuentran muy próximos a las zonas foco, de lo que se deriva que es la zona que demanda una respuesta más rápida en situación de emergencia. En la región oeste se localizan flujos con dirección dominante hacia el oeste, en la parte sur procedentes del SWRZ y en la parte norte de la caldera. Entre ambas hay una pequeña zona de sombra centrada en torno a la Punta Pu'oa. Los flujos procedentes de la caldera sufren cierto giro al orientarse primero hacia el NO y posteriormente hacia la dirección dominante. La velocidad potencial es alta y homogénea ya que las pendientes son elevadas y sin variaciones notables. Afecta a zonas de elevada densidad de población en las que se encuentran asentamientos que van desde Captain Cook hasta Keauhou.

El análisis posterior identifica la zona proximal al cauce mínimo que modela el área de primera ocupación de la colada y que se corresponde con la parte convexa de las áreas de flujo delimitadas. Este análisis permite además identificar las zonas de incertidumbre en los límites estimados de los flujos determinadas por desniveles perimetrales bajos, muy próximos a la elevación del cauce mínimo.

Las zonas de incertidumbre son áreas muy localizadas en las que la colada puede cambiar la dirección estimada en función de otras variables como viscosidad del flujo, pendiente elevada, cambios en la velocidad, etc. Su localización se ha basado fundamentalmente en criterios de discordancia entre áreas proximales y áreas de flujo cuando los flujos atraviesan dorsales, en la proximidad de los flujos a sus límites y en discontinuidades de los límites causados por un relieve muy plano.

Las coladas volcánicas tienen una disposición espacial y una forma diferente, resultado de su distinto comportamiento espacial, condicionado por un amplio abanico de factores que intervienen en mayor o menor grado en cada caso. Entre ellos se pueden mencionar la tasa volumétrica de erupción, el volumen emitido, la duración temporal de ésta, la composición



Figura 4. Forma de las coladas de 1950 (a) y 1859 (b y c) mostrando direcciones vacilantes sobre el rift (a), formas anastomosadas (b) y cambios de dirección (c).

química de la lava, su viscosidad; y factores externos como la pendiente y rugosidad del terreno, variable esta última que determina la fricción. Estas variables junto con las barreras topográficas determinan cambios en la forma del flujo tales como estrangulamientos, ensanchamientos, formas anastomosadas, bifurcaciones y cambios de dirección. Trusdell (1995) observa que la lava 'a' es sensible a los gradientes pero poco a las perturbaciones locales mientras que la lava pahoehoe es sensible a todas las escalas, especialmente con una pendiente mayor.

4. LOS EFECTOS DEL RIESGO

La estructura viaria de la isla muestra una disposición periférica (Hawai'i Belt Road) con muy pocos componentes radiales (Saddle Road), de modo que un flujo que se desplaza hacia el mar desde los focos potenciales tiene un efecto tardío sobre ésta y otras estructuras, pero llega a producirse si la erupción se prolonga o la tasa eruptiva es elevada: la erupción de 1942 interrumpió el abastecimiento de agua de Mountain View, la erupción que comenzó en 1983 de los conos Pu'u 'O'o y Kupaianaha de Kilauea ha cortado la Chain of Craters Road que comunica el sur del distrito de Puna, y el episodio de 1984 cerró una carretera secundaria, cortó una línea eléctrica y destruyó varias estaciones repetidoras (Kauahikaua, J., Trusdell, F.A. y Heliker, C., 1998).

Se han propuesto y llevado a cabo diversas medidas para atenuar o eliminar el riesgo de una colada una vez que la erupción ha tenido lugar, Smith (1996) citando a Bolt et al (1975) las clasifica en tres clases: bombardeo de la parte alta de la colada, estructuras de diversión y la refrigeración con agua. El primer procedimiento se comenzó a utilizar en 1881, posteriormente en el episodio de 1935 (Trusdell, F.A. y Lockwood, J.P., 1997) y el flujo cesó, pero en una evaluación posterior este último autor evaluó que se trató de pura coincidencia. Finalmente, en el episodio de 1942 se volvió a utilizar la fuerza aérea para bombardear la colada que amenazaba la capital, aunque sin efecto alguno.

Respecto de las estructuras de diversión, se han propuesto dos construcciones en 1937 y 1950 (Smith, 1996) para desviar las coladas que se pudiesen aproximar a la ciudad de Hilo hacia la zona de sombra inmediata, pero, de hecho, sólo se ha llevado a efecto una obra de esta clase en la parte superior del Mauna Loa Observatory, un observatorio meteorológico de NOAA localizado a gran altura y aislado de toda actividad humana para lograr las condiciones necesarias para la medición. El episodio de 1859 tuvo origen a escasa distancia de este punto. La prisión de Kulani, situada sobre la dorsal del volcán que prolonga el rift NE, está en unas condiciones similares como ha demostrado la trayectoria seguida por la colada del episodio de 1984. Es por ello que se ha llevado a cabo una evaluación (Kauahikaua, J., Trusdell, F.A. y Heliker, C., 1998) de las probabilidades de inundación de las nuevas instalaciones por un nuevo episodio.

5. LA PLANIFICACIÓN ANTE EL RIESGO

En las áreas de alta inestabilidad ambiental el riesgo es un componente territorial que debe ser integrado en la planificación, con el objeto de minimizarlo ya que no se puede eliminar. Es necesario disponer de tres componentes —sucesionales y que se retroalimentan—

para gestionar el riesgo: el seguimiento de las variables físicas —precursores— que permiten conocer el estado y la evolución seguida por el volcán, la modelización de los flujos potenciales y las áreas de riesgo, y la planificación de los usos del suelo. El seguimiento y la monitorización de las variables físicas se realiza desde que Thomas Jaggar comenzó a realizar observaciones y creó el Hawaiian Volcano Observatory en 1912, de modo que en este centro se miden los precursores de una erupción, de entre los que destacan dos: la creciente actividad sísmica y el inflado de la zona de cumbre. De este modo se puede predecir la localización del episodio que va a tener lugar. Las predicciones de las erupciones de 1975 y 1983 fueron cualitativamente correctas en cuanto a la temporalización y la de 1984 lo fue en lo que se refiere a su localización (Decker et al., 1995). Estas erupciones fueron precedidas por un período de dos años de creciente actividad sísmica —indicador de que el complejo magmático se está fracturando y que le magma está ascendiendo a la superficie— así como entorno a un año de tasas de inflado más rápidas. Pese a que Mauna Loa ha iniciado aparentemente un período de tiempos de recurrencia más largos (Decker et al., 1995) es necesario planificar como si en el futuro inmediato ocurriese una nueva erupción.

Respecto de la modelización se dispone de dos instrumentos: la zonificación de riesgos que relaciona los resultados del estudio de los flujos con la planificación regional y la modelización de los cursos que se relaciona con la planificación de los usos y la gestión de las emergencias frente a un episodio.

El condado de Hawai'i ha tenido tres fases en el desarrollo de sus instrumentos de planificación desde principios de los años 60 cuando se elaboraron los primeros planes de distrito. En esta primera fase los planes tienen una orientación zonal y de organización de los usos del suelo, superada en 1971 con el primer Plan General para todo el condado que contenía objetivos específicos de política espacial. En 1989 se elabora un nuevo plan que recoge las relaciones entre los componentes del territorio y plantea objetivos de desarrollo. En el año 2000 se ha iniciado un proceso de revisión que mantiene los mismos principios que el anterior y que revisa los usos del suelo adaptándolos a las nuevas necesidades y a los cambios producidos en los últimos 10 años. El riesgo volcánico, pese a ser un componente espacial de primer orden, no es recogido dentro de los objetivos y políticas, mientras que el control del riesgo de inundaciones dispone de un capítulo dentro de los objetivos generales y de los zonales. Sólo en las directrices de uso del suelo hay una mención general a que el espacio no edificable incluirá las áreas potenciales de riesgo natural.

El modelo territorial adoptado para la isla parece impulsar el desarrollo económico periférico, estructurado en torno a la principal vía de comunicación de la isla, Hawai'i Belt Road, y con dos prolongaciones a lo largo de Akoni Pule Highway al norte y Kea'au-Paho Road al este, ejes que refuerzan el componente perimetral. El uso agrícola coliga los heterogéneos componentes al mismo tiempo que consolida los espacios entre los núcleos o Census Designated Places (CDP) con suelo urbano o rural de distinta densidad, como la conexión entre Waimea y Kawaihae al N, fuera del alcance de Mauna Loa, o entre el último y el conjunto turístico Mauna Lani Resort-Waikoloa Beach Resort, donde se encuentran los mayores complejos hoteleros, dentro de la zona NO de Mauna Loa. El espacio entre Kea'au y Volcano, en la cumbre de Kilauea, ha sido propuesto como un gran espacio rural en el nuevo plan, que antes tenía un uso agrícola. De este modo se forma un continuum edificado de unos 40 km y de densidad variable entre la capital y el parque nacional de los volcanes, que es el principal

foco turístico de la isla, dentro de la zona E de Mauna Loa. Un caso aparte es el HOVE, ya mencionado, que refuerza su carácter de asentamiento al ser propuesto en el nuevo plan general como espacio rural, un espacio habitado desde 1961 localizado sobre zonas de riesgo 1 —13%— y 2 —87%— (Trusdell, 1995), porque se asienta sobre el rift SWRZ. El riesgo se incrementa cuando se propone un desarrollo turístico ladera abajo en la Bahía Pohue, lo que pone de manifiesto cierta discordancia entre evaluación de riesgos y planificación. El porcentaje de cobertura en los últimos 150 años de las zonas 1 y 2 es del 57% y 33% respectivamente (Hauahikaua *et al.*, 1995).

Este desarrollo deja atrás un modelo teórico de ordenación que evita el riesgo localizando las actividades de mayor valor económico y los asentamientos en las zonas de riesgo prácticamente nulo como Kohala-Mauna Kea y Hualalai, lo que sería un modelo de marginalización de los usos del suelo (figura 5). Por otro lado, parece que el modelo perimetral anteriormente descrito tiende a evolucionar a otro más intensivo, de lo que dan muestra pequeños signos, como la ocupación gradual de los espacios centrales de la isla con usos del suelo de mayor valor unitario.

Más allá del concepto de desarrollo sostenible, la sostenibilidad adquiere aquí un claro carácter; parece haber acuerdo en que se trata de diseñar y aplicar una estrategia de disminución del riesgo a la planificación del territorio. Estos modelos deben considerar que la gestión del uso del suelo es una herramienta de planificación que debe considerar que los habitantes y las actividades están ya instalados sobre el territorio y que han asumido el riesgo y aceptado la incertidumbre de la catástrofe, por lo que el objetivo es atenuarlo. La intensidad de ocupación y la asignación de usos del suelo varía en función de los riesgos asumidos y del análisis probabilístico basado en el componente *Espacio+Tiempo*.

La planificación tiene que considerar distintas variables: la probabilidad de que un episodio ocurra, la vulnerabilidad —proporción del valor que puede ser destruido— de los elementos ante el evento, que en este caso es total porque la lava destruye y cubre lo que se encuentra en su recorrido. La vulnerabilidad, junto con el valor económico, introducen la dimensión humana y económica en la medida del riesgo, ya que son las variables que lo miden, además del tipo de riesgo natural.

Cuando existe una discordancia entre el proceso de toma de decisiones o la planificación y las condiciones del medio o los procesos ambientales que tienen lugar en un área, puede ser debido según Jones (1995) a varios factores: que se trata de un proceso en sí mismo com-

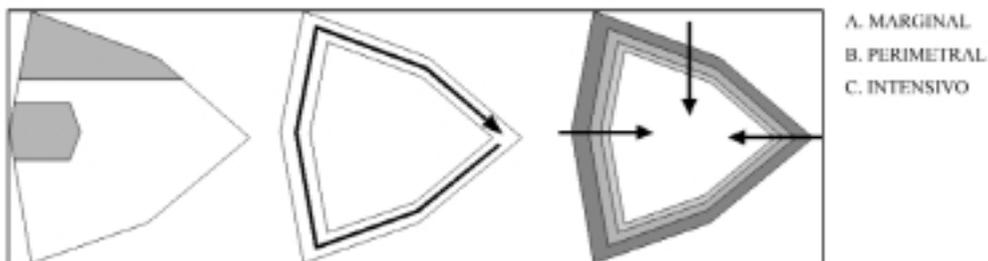


Figura 5. Modelos de desarrollo territorial.

plejo, o basado en información inadecuada, o con opciones imperfectas desde alguna perspectiva, porque hay un compromiso entre objetivos, escalas y marcos temporales, o por la participación de varios marcos institucionales.

BIBLIOGRAFÍA

- CLAGUE, D.A. (1996): «The growth and subsidence of the Hawaiian-Emperor Volcanic Chain». En *The origin and evolution of Pacific Island Biotas, New Guinea to Eastern Polynesia: pattern and processes*. Allen Keast y Scott E. Miller (eds.). SPB Amsterdam, Academic Publishing.
- CLAGUE, D.A. (1998): «Geology». En *Atlas of Hawai'i*. Sonia P. Juvik y James O. Juvik (eds.). Honolulu, University of Hawai'i Press. págs. 37-46.
- DECKER, R. W., KLEIN, F. W., OKAMURA, A. T. y OKUBO, P. G. 1995. Forecasting eruptions of Mauna Loa Volcano, Hawaii. En *Mauna Loa revealed: Structure, composition, history, and hazards*. American Geophysical Union. págs. 337-348.
- JONES, D., (1995): «Environmental Change, geomorphological change and sustainability». En *Geomorphology and land management in a changing environment*. McGregor, D. y Thomson, D.C, (eds.). New York, John Wiley and Sons. págs. 11-34.
- KAUAHIKAUA, J., MARGRITER, S. LOCKWOOD, J., y TRUSDELL, F. A. (1995): «Applications of GIS to the estimation of lava flow hazards on Mauna Loa Volcano, Hawaii». En *Mauna Loa revealed: Structure, composition, history, and hazards*. American Geophysical Union. págs. 315-325.
- KAUAHIKAUA, J., TRUSDELL, F. A. y HELIKER, C. (1998): *The probability of lava inundation at the proposed and existing Kulani Prison Sites*. US Geological Survey Open File 98-794.
- KLEIN, F.W., (1982): Patterns of historical eruptions at Hawaiian volcanoes. *J. Volcanol. Geother. Res.*, 12. págs. 1-35.
- LOCKWOOD, J. P. y LIPMAN, P. W. (1987): «Holocene eruptive history of Mauna Loa Volcano». En Decker, R. W., T. L. Wright y P. H. Stauffer, (eds.). *Volcanism in Hawai'i. U.S. Geol. Surv. Prof. Pa. 1350*, 2, págs. 509-536.
- SMITH, K. (1996): *Environmental hazards. Assessing risk and reducing disaster*. London, Routledge.
- TRUSDELL, F. A. (1995): «Lava flow hazards and risk assessment on Mauna Loa Volcano, Hawaii». En *Mauna Loa revealed: Structure, composition, history, and hazards*. American Geophysical Union. págs. 327-336.
- TRUSDELL, F. A. y LOCKWOOD, J. P. (1997): *Northeast rift zone of Mauna Loa guidebook*. Geological Society of America.
- US Geological Survey, (1997): *Volcanic and seismic hazards on the Island of Hawaii*. USGS, Washington.
- WICKMAN, F.E., (1966): «Repose period patterns of volcanoes». *Ark. Mineral. Geol.*, 4. págs. 291-367.