

The logo for CienciaUAT, featuring the text "CienciaUAT" in a bold, orange, sans-serif font. The "U" is slightly larger and more prominent than the other letters.

CienciaUAT

ISSN: 2007-7521

cienciauat@uat.edu.mx

Universidad Autónoma de Tamaulipas

México

Espinosa-Vega, Catalina Elvira; Tapia-Espinosa, Arkin Alain; Camacho-Astigarrabia, Eduardo; Sánchez-Sánchez, Yarelis

Caracterización del sistema físico-geográfico que influye en las multiamenazas de la subcuenca del río Caldera, Panamá

CienciaUAT, vol. 11, núm. 2, enero-junio, 2017, pp. 6-23

Universidad Autónoma de Tamaulipas

Ciudad Victoria, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=441949672001>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



© Catalina Elvira Espinosa Vega

Caracterización del sistema físico-geográfico que influye en las multiamenazas de la subcuenca del río Caldera, Panamá

Physico-geographical characterization of the system that influences the multi-hazards in the sub-basin of Caldera River, Panama

Catalina Elvira Espinosa-Vega^{1,2*}

Arkin Alain Tapia-Espinosa³

Eduardo Camacho-Astigarrabia³

Yarelis Sánchez-Sánchez⁴

¹Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias e Ingeniería, Boulevard Bahía S/N, Esq. Ignacio Comonfort, Del Bosque, Chetumal, Quintana Roo, México, C.P. 77019.

²Universidad Autónoma de Chiriquí, Facultad de Humanidades, Departamento de Geografía, Ciudad Universitaria-El Cabrero, David, Chiriquí, Panamá, C.P. Estafeta Universitaria, Apartado 0427.

³Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Urbanización El Cangrejo, Vía Simón Bolívar con la intercepción de la Vía Manuel Espinoza Batista y José De Fábrega, Provincia de Panamá, Panamá, Panamá, C.P. Estafeta Universitaria, Apartado 3366.

⁴Ministerio de Ambiente de Panamá, Departamento de Geomática, Sede Principal Calle Broberg, Edif. 804, Ancón, Panamá, Panamá, Apartado C-0843-00793.

***Autora para correspondencia:**
esvecaellabsig@gmail.com

Fecha de recepción:
25 de enero de 2016

Fecha de aceptación:
13 de septiembre de 2016

RESUMEN

La caracterización del sistema físico-geográfico constituye una herramienta que permite determinar las multiamenazas generadas por los fenómenos naturales. El término de multiamenaza describe la presencia de más de una amenaza relevante en el geosistema con interacciones en diferente nivel. El objetivo de este trabajo fue la caracterización de los factores del sistema físico-geográfico de la subcuenca del río Caldera, Panamá, que pueden ser considerados como multiamenazas naturales y que influyen en el riesgo a desastres del área. Se estudió la geología, geomorfología, climatología, edafología e hidrografía de la zona. Se realizó un análisis sistémico, complementado con el trabajo de campo, utilizando el método di-

recto, sobre la base del criterio experto o método heurístico. Se determinó que las principales amenazas que ocurren en el área de estudio son de origen sísmico, volcánico, la alta susceptibilidad por inestabilidad de laderas y las inundaciones. Dichas amenazas y su relación con la acción antrópica deben ser consideradas dentro de los planes de ordenamiento territorial y en la gestión del riesgo de desastres existentes en esta zona de Panamá.

PALABRAS CLAVE: sistema físico-geográfico, multiamenazas, gestión local del riesgo, subcuenca del río Caldera, Panamá.

ABSTRACT

The characterization of the physico-geographical system is a tool used to determine the mul-

ti-hazards generated by natural phenomena. The term multi-hazard describes the presence of more than one relevant hazard in the geosystem with different levels of interaction. The aim of this work was the characterization of the physico-geographical factors that can be considered as multi-hazard, and influence the disaster risk for the sub-basin of Caldera River, Panama. A systemic analysis of the geology, geomorphology, climatology, soil science and hydrography of the zone was conducted. Such analysis was complemented by fieldwork, using the direct method on the base of the expert criterion or heuristic method. The results indicate that the main hazards occurring in the study area are related to seismic and volcanic issues and its high vulnerability due to slope instability and flooding. These hazards and their relationship with anthropic action need to be considered in land use plans and disaster risk management in this area of Panama.

KEYWORDS: geographic-physical system, multi-hazards, local disaster risk management, sub-basin of Caldera River, Panama.

INTRODUCCIÓN

La combinación de factores tanto internos como externos del sistema físico-geográfico, conjugada con las acciones antrópicas, pueden generar multiamenazas y aumentar el riesgo a desastres por amenazas naturales (Johnson y Gheorghe, 2013). El término “multiamenazas” se genera como resultado de las políticas internacionales que surgen con la Agenda 21, planteada en 1992, para la reducción del riesgo y el desarrollo sustentable (Kappes y col., 2010; 2012). Este término puede ser referido cuando se presenta más de una amenaza relevante en el geosistema (Van-Westen y col., 2011; 2013) y estas muestran interacción entre ellas (Gill y Malamud, 2014).

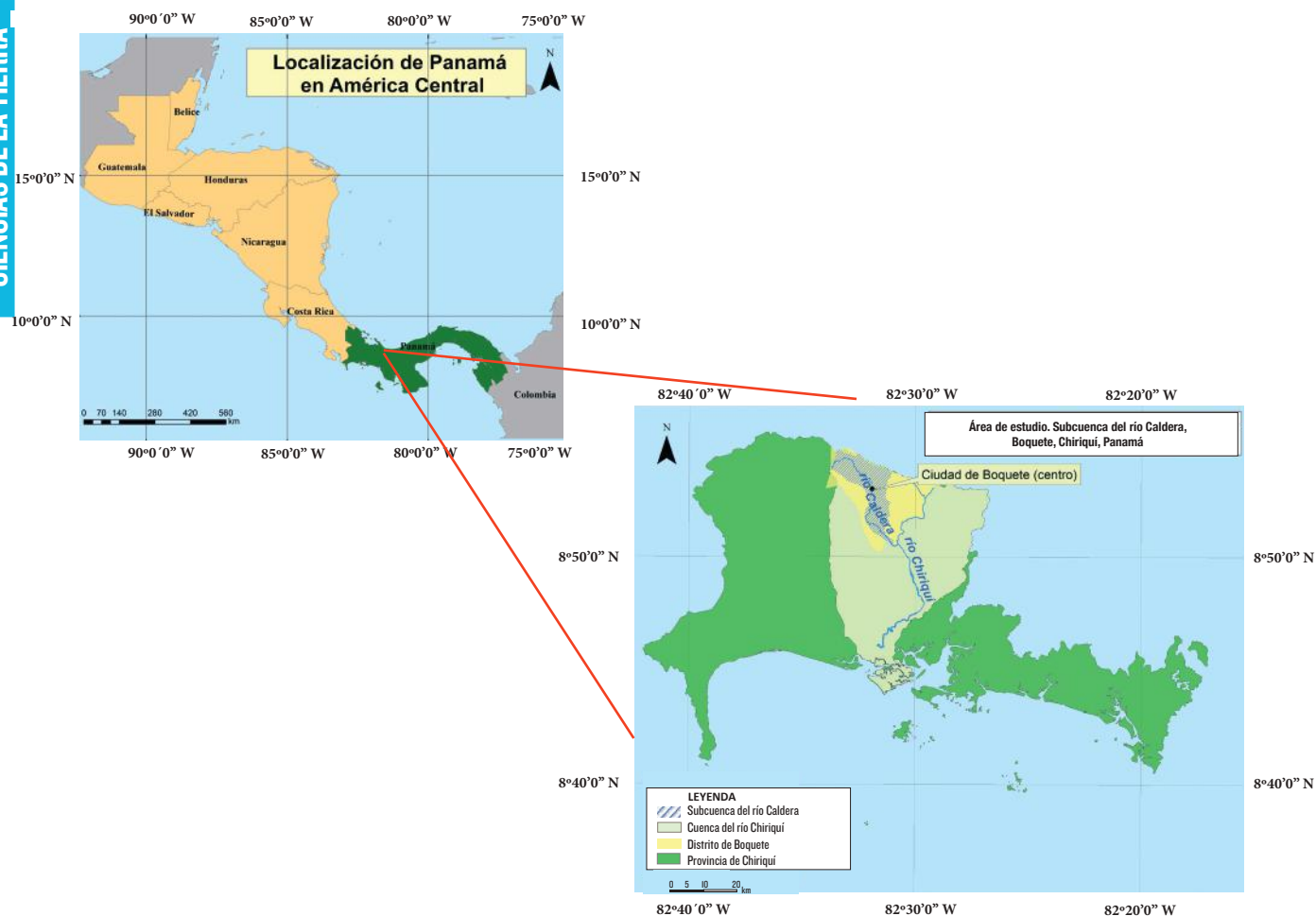
Se han desarrollado diversas investigaciones a nivel mundial, que evalúan las multiamenazas desde enfoques cualitativos y cuantitativos con base a los diferentes factores físico-geográficos y humanos que conforman un sistema social determinado (Marzocchi y col., 2012; Van-

Westen y col. 2013; Komendantova y col., 2014; Fuchs y col., 2015). En cuanto al Istmo Centroamericano, la evaluación de las multiamenazas es incipiente, a pesar de considerarse como “una zona de multiamenazas” (UNISDR y CEPREDENAC, 2014). Dado este hecho, es importante realizar estudios que evalúen las diversas amenazas que pueden afectar un área en esta región, en función de los agentes determinantes como los factores físico-geográficos. La subcuenca del río Caldera se localiza en el distrito de Boquete, provincia de Chiriquí, en el suroccidente de Panamá (Figura 1). La formación de esta subcuenca está condicionada por la combinación de factores físicos, como la geología, geomorfología, climatología, edafología e hidrografía, que generan una complejidad del sistema físico-geo-gráfico. Como consecuencia de esta complejidad, la subcuenca del río Caldera se ve expuesta a amenazas de origen natural y socionatural. Algunas de las amenazas de origen natural generadas por la configuración física-geográfica y que pueden afectar al sistema social son los sismos, el vulcanismo, las inestabilidades de laderas y las inundaciones.

El presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar el sistema físico-geográfico de la subcuenca del río Caldera en Panamá, que genera las multiamenazas naturales que la afectan.

MATERIALES Y MÉTODOS

La subcuenca del río Caldera está constituida por un relieve montañoso, con elevaciones superiores a 2 000 msnm y pendientes abruptas (Espinosa y Arriaga-Hurtado, 2014). Según la clasificación climática de KÖPPEN-GEIGER (Peel y col., 2007), la subcuenca del río Caldera se caracteriza por un clima templado muy húmedo, con precipitaciones durante todo el año, aunque con una marcada disminución en la época seca (Cf). La precipitación es elevada, sobre todo en los meses de la época lluviosa (mayo a noviembre), con una media anual de 3 466 mm/a (Rogelis y col., 2014) y una escorrentía de 2 433 mm/a (Van-der-Weert, 2009). La población que habita la subcuenca del río Caldera es de 21 370 habitantes (INEC, 2010).



■ **Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.**

Figure 1. Geographic location of the study area.

Fuente: Modificado a partir de IGN (2004); Sánchez (2009); Natural Earth (2016).

Análisis de la información

La primera etapa consistió en un trabajo de campo realizado en el 2012, para delimitar el área de estudio a través de la hoja topográfica de Boquete (IGN, 1993). Se seleccionó la subcuenca del río Caldera por ser la zona de mayor afectación por diversos fenómenos naturales cotidianos y extremos. Se identificaron en campo las coordenadas geográficas del área delimitada, a través de un GPS, y se tomaron fotografías de diversos puntos de afectación por amenazas de origen natural. Además, se realizó una observación directa de la configuración del espacio estudiado, para identificar las unidades geográficas que conforman el geosistema. Meses más tarde, se llevó a cabo una segunda etapa que consideró las u-

nidades geográficas observadas en el trabajo de campo de la primera etapa y se aplicó un análisis sistémico, el cual consistió en identificar los factores y elementos-unidades fundamentales que conforman un geosistema; se caracterizaron cada uno de ellos y se determinaron sus elementos constitutivos sobre la base de la revisión bibliográfica referente a la ciencia geográfica y sus principales enfoques, como los propuestos por Zinck (1988); Verstappen y col. (1991); Strahler y Strahler (2005); Zinck (2012). En este sentido, se establecieron los elementos a considerar en la geología, tales como tipos litológicos, tectónica y vulcanismo; de la geomorfología, el relieve terrestre y sus modificaciones o geoformas; del suelo, los tipos y clasificación; del clima, la

clasificación, temperatura, precipitación, humedad, evapotranspiración y humedad relativa; por último, de la hidrografía, la red fluvial, cauce, caudal y régimen fluvial y la escorrentía.

Con base en la revisión bibliográfica realizada, se desarrolló una tercera etapa, que consistió en otro trabajo de campo (año 2013) en el área delimitada anteriormente (2012). A través de este trabajo de campo se identificó por medio del método directo sobre la base del criterio experto o método heurístico (Soeters y Van-Westen, 1996; Castellanos y Van-Westen, 2007; Miklin y col., 2009), los principales factores que componen el sistema físico-geográfico de la subcuenca del río Caldera y que originan las multiamenazas naturales existentes, entre los cuales está la geología, geomorfología, climatología, edafología e hidrografía. Se consideró el método directo o método heurístico, porque permite establecer indicadores geológicos, como el afloramiento de basaltos y otros materiales volcánicos, los tipos de fallas existentes; geomorfológicos, como las geoformas y características del terreno; hidrológico, como las características del relieve fluvial, que pueden generar procesos causales de las multiamenazas de la subcuenca del río Caldera, a través de la observación directa y con los criterios establecidos por el experto, dado la falta de información documentada sobre el área de estudio. Utilizando los indicadores señalados, se identificaron en campo las fallas existentes, algunas cicatrices de deslizamientos pasados; a su vez, se detectó la presencia de deslizamientos activos. A partir de estas observaciones, se determinó incluir el parámetro de pendiente para establecer el grado de peligro por deslizamiento. En el caso de la amenaza por inundación, se destacan las terrazas de inundación del río Caldera y sus afluentes; además, la erosión hídrica de las pendientes que están en las riberas de los ríos, quebradas y perfiles topográficos, que indican el material que ha sido arrastrado por el río a través de las inundaciones extremas.

Finalmente, la cuarta y última etapa consistió en un trabajo de escritorio, que permitiéndose analizar la información de campo. Por la relevancia de la

sismicidad, en el área de estudio, se generó una curva de amenaza y espectro de amenaza uniforme, con un periodo de retorno de 475 años, en un sitio en el centro de la ciudad de Boquete, con base en el enfoque de PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment): evaluación probabilística de amenaza sísmica en América Central, descrito por Benito y col. (2012). Así mismo, se revisaron las bases de datos que registran los fenómenos geográficos en los ámbitos estudiados, aportados por Redhum (2008); Desinventar (2013); Desinventar (2014); ETESA (2014); Instituto de Geociencias (2014); IRIS (2014); National Hurricane Center (2014) y USGS (2014).

El análisis cartográfico se realizó recopilando la información existente en formato digital: fotografías aéreas tomadas por el Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia” en 1977 y 1979; a escalas 1:5 000 y 1:10 000 en Boquete, Panamá. Asimismo, se emplearon capas de datos en formato vectorial y raster para crear mapas a escala 1:50 000, utilizando el programa ESRI, (del inglés *Environmental Systems Research Institute*. Arc Map, v10. California). A través del análisis cartográfico se determinó el grado de las pendientes y las características geomorfológicas de la zona.

Es importante destacar, que una de las limitantes presentadas durante el estudio fue la falta de datos suficientes, de los indicadores del sistema físico-geográfico, debido a que se carece de un registro sistematizado de los datos, ya que no existen redes de vigilancia y monitoreo de multiamenazas.

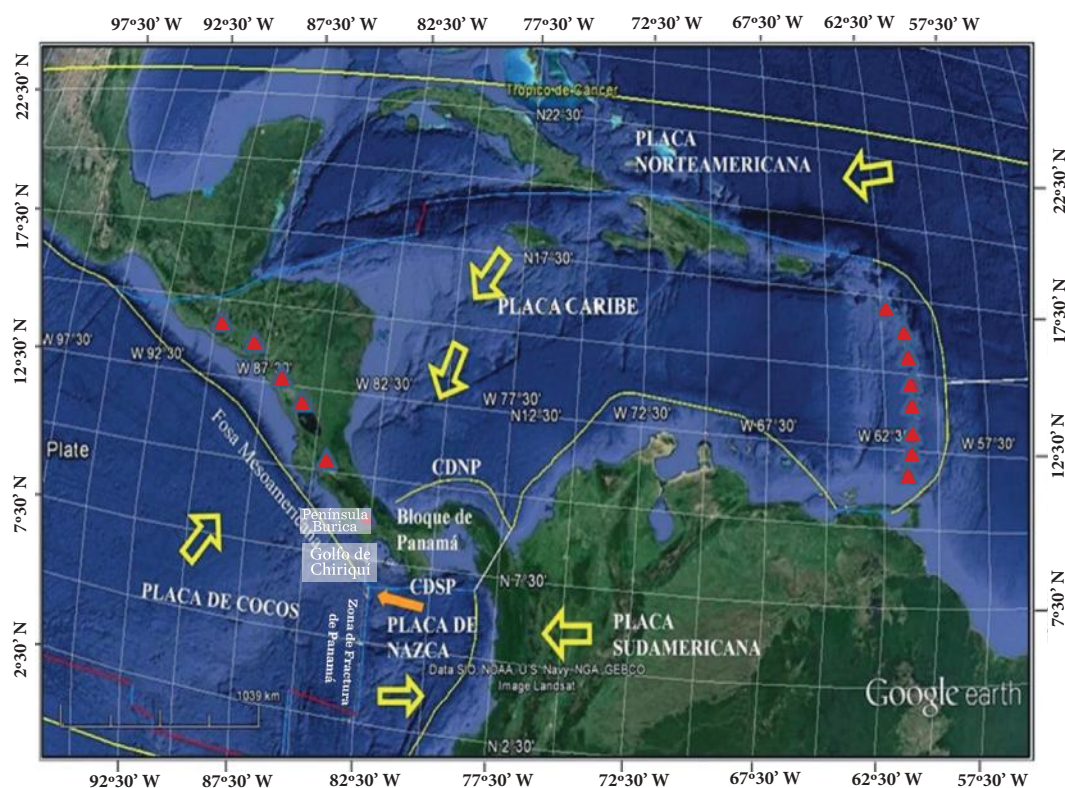
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sistema geológico

La subcuenca del río Caldera se ubica sobre el Bloque de Panamá, que está rodeado por las placas de Cocos al sur y suroeste, el Caribe al noreste, la placa Suramericana y la placa de Nazca al sur. Al sur de la península de Burica, en el suroccidente de Panamá, se encuentra el punto triple de Panamá, donde convergen las placas de Nazca, Cocos y el Bloque de Panamá (Figura 2). Al sur y suroeste de la península de Burica, el Blo-

que de Panamá es empujado por la convergencia de la boyante Dorsal del Coco (Kellog y Vega, 1995; Kobayashi y col., 2014). Al este de la península de Burica, en el Golfo de Chiriquí, la Zona de Fractura de Panamá subduce oblicuamente bajo el Bloque de Panamá (Camacho, 2003). Los límites tectónicos principales han sido descritos por Kellog y Vega (1995), Kolarsky y Mann (1995), Mann y Kolarsky (1995), Moore y Sender (1995), Morell y col. (2008), Camacho y col. (2010), entre otros. Estos límites tectónicos generan una alta actividad sísmica en el Bloque de Panamá, caracterizado por sismos superficiales

con magnitudes de hasta 5.7 M_w (Escala de Magnitud del Momento), que llegan a alcanzar intensidades de VII MM (Escala de Mercalli Modificada) a pocos kilómetros de epicentro. Sin embargo, los sismos que se originan mar afuera, en la zona de subducción, con magnitudes de 7.0 M_w o mayores, no producen intensidades superiores a VI MM en esta zona (White y Harlow, 1993) (Figura 3). La alta actividad sísmica en el Bloque de Panamá ha modificado la forma del relieve en la provincia de Chiriquí. En consecuencia, en el área de estudio se evidencian pequeñas fallas activas, principalmente alrededor



■ **Figura 2. Tectónica de placas de la región de América Central y el Caribe.**
Figure 2. Plate tectonics of the region of Central America and the Caribbean.

Nota: Las flechas amarillas indican la dirección del desplazamiento de las placas; la flecha anaranjada indica el punto de unión triple; las líneas continuas representan los límites de las placas tectónicas; los triángulos muestran la ubicación de algunos de los volcanes en América Central y el Caribe. CDNP = Cinturón Deformado del Norte de Panamá. CDSP = Cinturón Deformado del sur de Panamá.

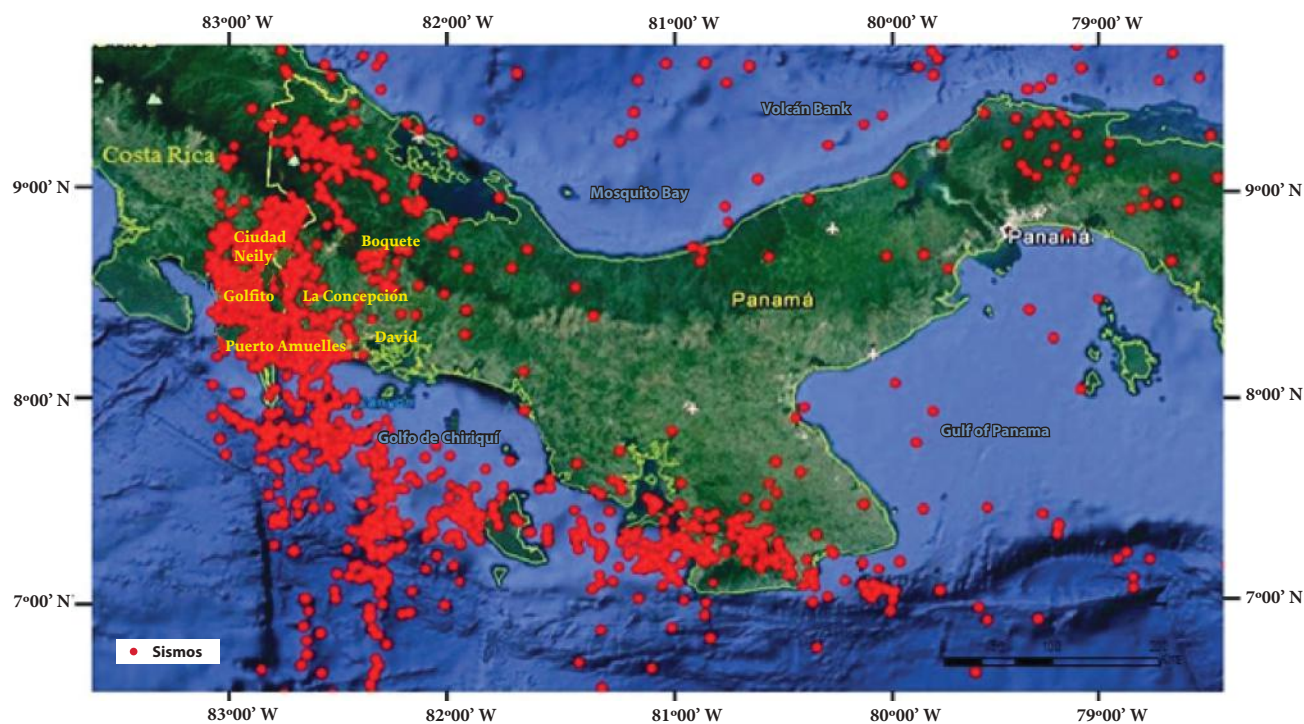
Fuente: Imagen extraída de Google Earth con base a la data de placas tectónicas de la tierra de SIO, NOAA, US Navy, NGA, GEBCO y los trabajos de Adamek y col. (1987), Adamek y col. (1988), Camacho (1991), Kellog y Vega (1995), Kolarsky y Mann (1995), Mann y Kolarsky (1995), Moore y Sender (1995), Westbrook y col. (1995), Vergara (1998), Morell y col. (2008), Camacho y col. (2010).

de la zona de influencia del volcán Barú; estas estructuras han contribuido a la formación de la subcuenca del río Caldera, modificando la forma del relieve y definiendo los cauces de algunos ríos y quebradas. Los estudios de mecanismos focales, de sismos ocurridos en esta área, indican la existencia de fallamiento transcurrente, con planos nodales muy pronunciados, con rumbo ENE-OSO y corrimiento lateral izquierdo o rumbo NO-SE y corrimiento lateral derecho, similares a los de las fallas de la cadena volcánica de El Salvador y el centro de Costa Rica (Camacho y col., 2008). Algunas de estas fallas próximas al área de interés han sido cartografiadas y denominadas como Horqueta, Norte Bajo Mono, Jaramillo, así como Quebrada Cenizas, Grande y Quebrada Manuela (Figura 4) (Torales y Ho, 2006; Sherrod y col., 2008; Sánchez, 2009).

Por otra parte, la actividad volcánica en la provincia de Chiriquí se evidencia por un eje volcánico, que inicia muy cerca de la frontera con

Costa Rica, desde el complejo volcánico Colorado Tisingal, dentro de los cuales se presentan algunos aparatos volcánicos del Cuaternario, como los volcanes Colorado, Barú y Hornitos (Camacho, 2009). Por su localización en el área de estudio, se destaca la influencia del volcán Barú, que según expresan Sherrod y col. (2008: 3), es: “potencialmente activo y ha tenido cuatro episodios eruptivos durante los últimos 1 600 años, incluyendo su erupción más reciente hace aproximadamente 400 a 500 años. Desde 1930 se han reportado episodios de enjambres sísmicos, aproximadamente cada 30 años, al sureste del volcán Barú, que duran de 4 a 6 semanas, con magnitudes que no superan los 4.5 M_w , y mecanismos focales, predominantemente transcurrentes. El último enjambre importante ocurrió en mayo de 2006 y causó gran alarma en la población (Camacho, 2009).

En consecuencia, a los procesos geológicos derivados del volcán Barú y otras estructuras volcánicas más antiguas, se presentan en la sub-



■ **Figura 3. Sismicidad del Bloque de Panamá.**
Figure 3. Seismicity of the Panama Block.

Fuente: Modificado a partir de datos del Instituto de Geociencias, 2014.

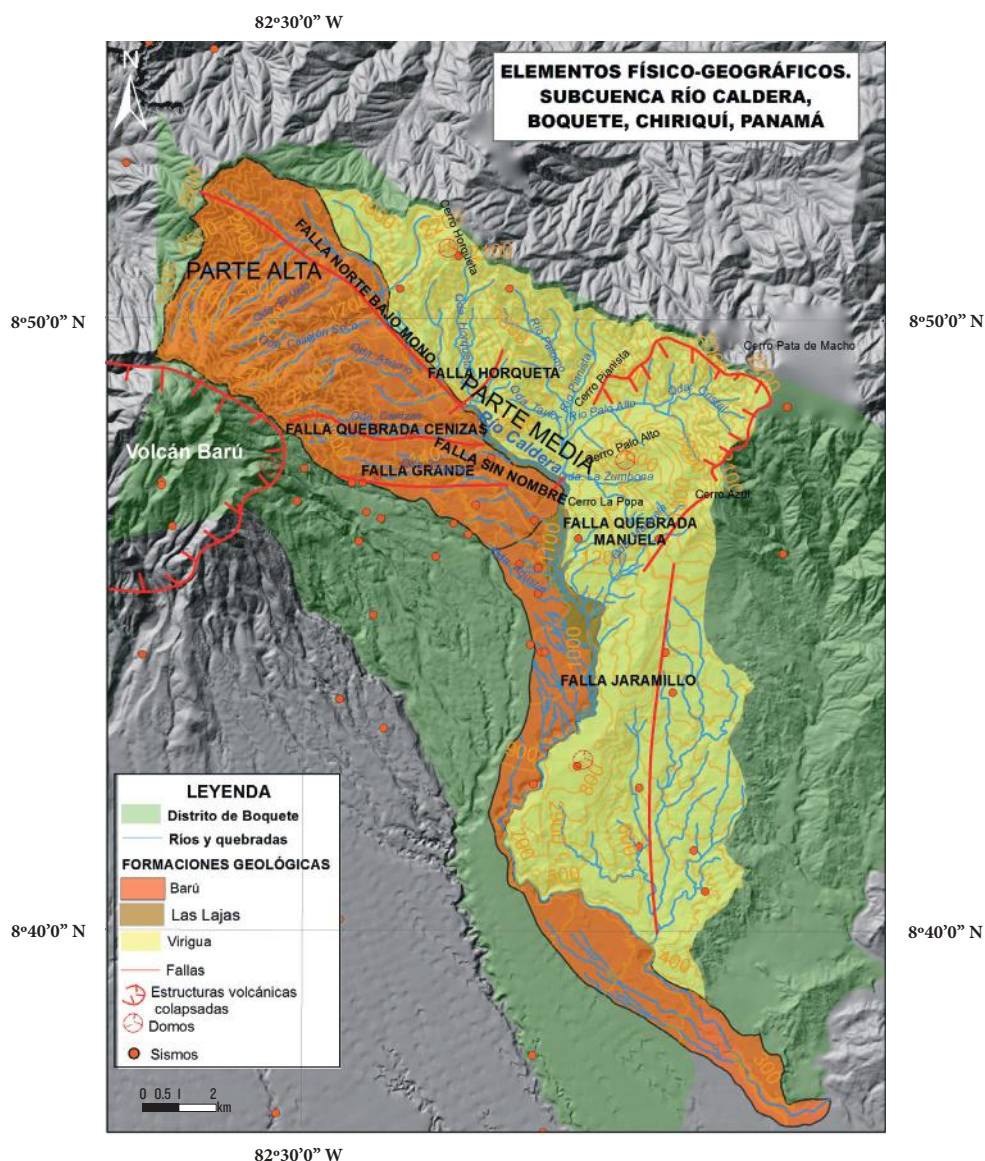


Figura 4. Elementos físico-geográficos en la subcuenca del río Caldera.

Figure 4. Physico-geographical elements in the sub-basin of the Caldera River.

Fuente: Modificado a partir de datos de Sánchez, 2009; Instituto de Geociencias, 2014.

cuenca del río Caldera diferentes formaciones geológicas (Figura 4), como la formación Virigua de mayor antigüedad, en la que se encuentran estructuras volcánicas colapsadas, depósitos de rocas ígneas, como basaltos, lavas, tobas y lahares; la formación Las Lajas, compuesta por depósitos aluviales (cantos rodados), producto del proceso denudacional de la subcuenca del río Caldera. Finalmente, se encontró la formación Barú, conformada por depósitos de rocas basálticas (cenizas volcánicas y pómez), aglome-

rados basálticos, tobas, lavas y materiales laháricos; este tipo de formación domina el área de estudio (IGN, 1991; Sánchez, 2009 y ANAM, 2011).

Sistema geomorfológico

La subcuenca del río Caldera está enclavada en la región de montaña de Chiriquí, con elevaciones superiores a los 2 000 msnm (Figura 4), tal es el caso del cerro Horqueta (2 352 msnm), cerro Azul (2 310 msnm), cerro Pata de Macho (2 197 msnm) y otras elevaciones como los cerros El Pianista

(1 600 msnm) y Palo Alto (1 772 msnm). Esta región de montaña, a su vez se caracteriza por estar constituida por ambientes geomorfológicos, como el ambiente fluvial, el denudacional y el ambiente volcánico (Tabla 1). En este trabajo, se hará énfasis en el ambiente fluvial; el cual presenta rasgos de torrente de regiones de montañas. El cauce del río Caldera está conformado por diferentes patrones geomorfológicos, con unidades morfométricas, como las pendientes abruptas y escarpes, además de las morfogenéticas, con geoformas originadas por los procesos orogénicos que levantaron la Cordillera Central, y morfodinámicas, como los procesos denudacionales, caracterizado por los deslizamientos, la socavación y erosión hídrica (Tabla 2). Considerando como criterio de clasificación la altitud, se puede dividir la subcuenca del río Caldera de la siguiente manera: la parte alta y media. La primera, ubicada al oeste, presenta en el drenaje un mayor porcentaje de cañones y ríos rectilíneos, con la influencia del volcán Barú, que hace que estos sean clasificados como un drenaje radial. A medida que se distancia de la estructura volcánica, el drenaje es de menor pendiente, y el río principal y sus afluentes presentan valles en forma de “V”, con pequeñas terrazas de inundación. En la parte media de la subcuenca se presentan al menos tres terrazas fluviales (Tabla 1), las cuales son ocupadas por la escorrentía y la carga del río Caldera, cuando hay máximas precipitaciones o condiciones climáticas anormales; en esta parte del río, el cauce se hace trenzado o entrelazado, evidenciando la disminución de cambios en la energía de transporte del río, formándose unos cauces complejos convergentes y divergentes, separados por barras de arenas o isletas (Tabla 2). Estos procesos morfodinámicos indican que el río Caldera está llegando al estado de equilibrio y busca el desarrollo de un valle de fondo horizontal para discorrir; dicho en otros términos, la fuerza de arrastre de materiales, causa la erosión de las márgenes del río, así como el ensanchamiento de su lecho de inundación (Strahler y Strahler, 2005).

Por debajo de la cota 1 000 msnm, existe un cambio en la forma del drenaje, pasando de cauces en-

trelazados a otros en forma de cañón. Esto puede deberse a un cambio litológico o al grado de compactación del lahar. Este material de socavación del río Caldera y sus afluentes es trasladado aguas abajo del río y depositado en sendas planicies aluviales y de inundación (Figura 4).

Sistema edáfico

Derivado de la composición de las rocas y de los procesos geológicos ocurridos en la región, la subcuenca del río Caldera presenta suelos de orígenes volcánicos y sedimentarios. Estos se caracterizan por alta fertilidad, debido a las cenizas volcánicas recientes que lo componen. También poseen grandes espesores, alta permeabilidad y altos contenidos de materia orgánica. Los suelos de cenizas volcánicas más recientes, que se evidencian en la subcuenca del río Caldera, se formaron una vez que los productos depositados por la última erupción del volcán Barú fuesen alterados por los agentes exógenos, como la lluvia, la temperatura y el viento, entre otros. Estos datos coinciden con los estudios realizados por Sánchez (2009), que con referencia a la taxonomía de suelos Soil Survey (USDA, 1999), identifica cuatro horizontes en los suelos de la subcuenca del río Caldera. El primero se denomina epipedón Úmbrico (U), caracterizado por su acidez y su carácter Ócrico (O), que presentan poco carbono orgánico. El segundo horizonte se identifica como endopedón Cámbico (C), que es un horizonte arcilloso. El tercero, es un horizonte de tipo endopedón Cálcico (Ca), con acumulación de carbonato cálcico o carbonato de magnesio; y el cuarto es un endopedón Óxico, en el que se presentan minerales insolubles como el cuarzo. A pesar de registrarse en la subcuenca del río Caldera suelos de gran espesor y originados a partir de cenizas volcánicas, también se presentan suelos originados a partir del proceso de erosión de las rocas preexistentes, lo cual se relaciona directamente con las pendientes abruptas, el clima y la degradación del medio. Esta erosión natural también es acelerada por la acción antrópica, relacionada con la sobre explotación agrícola, turística y residencial (Cárdenas-Hernández y Gerritsen, 2015).

■ Tabla 1. Ambientes geomorfológicos. Subcuenca del río Caldera.
Table 1. Geomorphological environments. Sub-basin of the Caldera River.

Ambientes	Geoforma	Evidencia
FLUVIAL	Valle aluvial	 ●
	Terraza de inundación	
	Terraza fluvial	
	Garganta o cañón	 ●
DENUDACIONAL	Pie de monte coluvial	
	Colina residual	
VOLCÁNICO	Campos de lava	
	Campos de lahar	

● © Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC)

■ Tabla 2. Características del ambiente fluvial. Subcuenca del río Caldera.
Table 2. Fluvial environment. Sub-basin of the Caldera River.

Patrones	Evidencias	Descripción
Unidades morfométricas		Las líneas rojas señalan los dos niveles de escarpes que ha dejado la corriente del río Caldera en las inundaciones pasadas.
Unidades morfogenéticas		Afloramiento de basaltos en la ribera este del río Caldera.
Unidades morfodinámicas		Socavación hídrica de la corriente del río Caldera en la ribera oeste del río.
Río trenzado o entrelazado		Al fondo de la imagen: vista panorámica de la ciudad de Boquete. La línea negra representa los diversos niveles de terraza dentro del área urbana; en azul se define el cauce del río Caldera y canales alternos. Qr indica material cuaternario; 3 es el más antiguo y 1 el más reciente.
Bloques y material detrítico colapsado		El material colapsado obstruye parte del cauce de la Quebrada Manuela.
Obstrucción del cauce por bloques y material detrítico colapsado		Material detrítico, bloques y cantos rodados que obstruyeron el cauce del río Caldera en la inundación del 22 de agosto de 2008.
Deslizamiento activo		Se observan deslizamientos en el río Palo Alto y Quebrada La Zumbona.
Cambio en la coloración de los sedimentos transportados		En el río Palo Alto se observó una coloración rojiza en los materiales transportados por el río.

Sistema climático

La clasificación climática, de la subcuenca del río Caldera, sobre la base de Köppen-Geiger (Peel y col., 2007), se caracteriza por un clima templado muy húmedo con precipitaciones todo el año, aunque con una marcada disminución en la época seca (Cf). Los datos de la estación meteorológica Los Naranjos (ETESA, 2014), indican una temperatura promedio de 20.5 °C (con variaciones de ± 2.5 °C), determinada básicamente por la topografía montañosa, tal y como se señaló en apartados anteriores. Las temperaturas promedio registradas en la época seca, entre los meses de enero hasta abril, presentan una máxima de 31 °C, y una mínima de 2.8 °C durante la época lluviosa, en el mes de septiembre.

Por otra parte, según la clasificación de Martonne, señalada por McKay (2000), la subcuenca del río Caldera presenta un clima tropical de montaña en el sector cercano a la Cordillera Central, entre los 900 msnm a 1 100 msnm, y un clima tropical de montaña media y alta, ya que muestra elevaciones superiores a 1 600 msnm. Esto es un indicativo de que las variaciones de temperaturas están determinadas por el sistema montañoso, especialmente la Cordillera Central, que también determina la precipitación de la subcuenca, sobre todo en la época seca, por la lluvia orográfica que se registra.

En cuanto a la precipitación, la subcuenca del río Caldera presenta, según los datos de la estación meteorológica Los Naranjos, una media anual de 3 466 mm/a (ETESA, 2014); el mes más lluvioso es octubre y el mes con menor precipitación es febrero, lo cual coincide con las dos épocas climáticas que se desarrollan en Panamá: la época lluviosa y la época seca (UNESCO, 2008). La escorrentía es de 2 433 mm/a según las estimaciones de Van-der-Weert (2009); la evapotranspiración es de aproximadamente 986.81 mm/a (Sánchez, 2009) y la humedad relativa tiene un promedio anual de 85 % (ETESA, 2014).

En cuanto a los fenómenos atmosféricos, como los ciclones tropicales que se forman cercanos al área de estudio, no ejercen influencia directa en

la subcuenca del río Caldera, sino que la afectan indirectamente.

Sistema hidrográfico

El curso del cauce del río Caldera está determinado en gran medida por la geología, sobre todo por las fallas existentes, tanto en la Quebrada Horqueta, como en la confluencia del río Caldera, Palo Alto y la Quebrada la Zumbona (UP, 1990; Herrera, 2003; Toral y Ho, 2006; Sherrod y col., 2008; Sánchez, 2009) (Figura 4).

La subcuenca del río Caldera tiene un sistema de drenaje con una sola salida, conectada a la cuenca del río Chiriquí (Figura 1), siendo esta de tipo exorreica; a su vez, su patrón de drenaje es radial, con afluentes que discurren por la ladera norte de la estructura volcánica del Barú, los cuales aportan gran caudal al río Caldera. Dentro de esos afluentes se destacan principalmente los ríos Palo Alto, Palomo y Pianista; así como las quebradas: Horqueta, Taylor, Cristal, La Zumbona, Jaramillo, El Velo, Callejón Seco, Cenizas, Aserrió, Grande, y Agustín. El patrón de drenaje tiene forma dendrítica y subparalela en la parte media y sur de la subcuenca del río Caldera.

Con relación al caudal, la subcuenca del río Caldera tiene un promedio de 10.3 m³/s (ETESA, 2009), correspondiente a la escorrentía de 2 433 mm/a (Van-der-Weert, 2009). Los caudales máximos del río Caldera se presentan en los meses de la época lluviosa, desde el mes de agosto, y continúan con un aporte significativo en la época seca, hasta el mes de enero. Existen factores meteorológicos del sistema climático que determinan los caudales de los ríos en Panamá y que también influyen directamente en la subcuenca del río Caldera, tales como la temporada de huracanes en el Atlántico, que no afecta directamente el área, pero si propicia lluvias intensas, los frentes fríos que activan la Zona de Convergencia Intertropical y los sistemas de baja presión, además de las ondas activas del este (ETESA, 2009). Aunado a estos factores, en la época seca, como ya se mencionó, se registra la lluvia orográfica o bajareque, influenciada por

los vientos alisios del nordeste la cual, provoca la acumulación de agua subterránea, aumentando la escurrentía y con ello la carga a la subcuenca, contribuyendo al aumento del caudal.

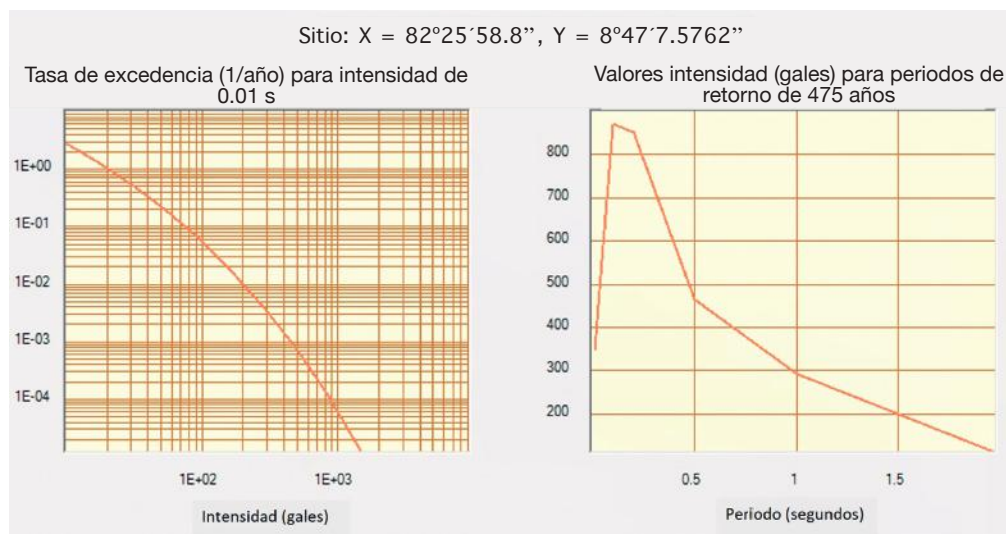
Multiamenazas

La subcuenca del río Caldera presenta más de una amenaza asociada a eventos de origen físico-geográfico. Una de las amenazas es la actividad sísmica, generada por el tectonismo que origina las fallas activas en esta subcuenca. Los resultados de la curva de amenaza sísmica y el espectro de amenaza uniforme para el centro de la ciudad de Boquete (Figura 5), indicaron que la aceleración máxima del terreno esperada para esta localidad, con un 90 % de no excedencia en 50 años, es de 350 cm/s^2 o gales, evidenciando que la amenaza sísmica para esta región del país es moderada, en comparación con otros centros urbanos de la zona fronteriza Panamá-Costa Rica, como las ciudades de David, Concepción y Puerto Armuelles en Panamá; Ciudad Neily y Golfito en Costa Rica (Figura 3).

Otra amenaza, es la actividad eruptiva del volcán Barú. Los enjambres sísmicos que se presentan

y el periodo eruptivo, indicaron el alto riesgo volcánico al que se expone el sistema social. Las erupciones pasadas del Barú incidieron en la tipología de las rocas presentes en la subcuenca y la conformación de los afluentes que nacen en las faldas de este volcán, constituyendo canales capaces de encauzar los lahares y la lava, en caso de materializarse la amenaza volcánica.

Una amenaza más, que presenta el área de estudio, es la alta susceptibilidad por inestabilidad de ladera. En el trabajo de campo, realizado en enero de 2012, se observaron deslizamientos activos, de los cuales se obtuvo evidencia de escombros y masas de tierra, desprendidas de los cerros y escarpes que están en las márgenes de los afluentes de la subcuenca del río Caldera y que obstruyeron el libre cauce del sistema fluvial. Esto se comprobó fundamentalmente en la Quebrada La Zumbona y en el río Palo Alto, donde se observó más de 18 deslizamientos activos. Algunos de estos procesos de remoción en masa, han dejado cambios significativos en los diferentes ambientes geomorfológicos de la zona, como la deposición en forma de abanico aluvial, grandes cicatrices de corona en algunos



■ **Figura 5. Curva de amenaza y espectro de amenaza uniforme. Ciudad de Boquete.**

Figure 5. Hazard curve and uniform hazard spectra. City of Boquete.

Nota: Esta curva se generó para el centro de la ciudad de Boquete, con un tiempo de retorno de 475 años (10 % de excedencia en 50 años). Obsérvese que esto corresponde a una aceleración máxima o PGA de 350 cm/s^2 .

Fuente: Modificado a partir de Benito y col. (2012).

de los cerros de la región, cambios en los patrones de drenaje del río Caldera, y procesos de socavación lateral en los ríos y quebradas de la zona; incluso, se identificaron cambios en la coloración de los sedimentos transportados (Tabla 2). En consecuencia, se determinó el nivel de peligro de los principales eventos por deslizamientos que se han registrado en la subcuenca del río Caldera. Se establecieron parámetros como la pendiente del terreno, la localización del evento, la precipitación y los sismos, debido a la inexistencia de otros datos paramétricos, como el escurrimiento potencial acumulado, formaciones superficiales, uso y cobertura del suelo, que permiten la evaluación de la amenaza y su correspondiente categorización (Tabla 3). Así mismo, los datos evidenciaron que los deslizamientos ocurren por la presencia de rocas meteorizadas y fracturadas; suelos de poco espesor o suelos de gran espesor, susceptibles a la erosión y lixiviación, relacionada a su vez a la elevada escorrentía y la abundante precipitación en la época lluviosa; además de suelos aluviales poco cementados; también influyen las pendientes abruptas de 45° que se presentan desde la cota 3 300 msnm a 1 400 msnm y las fallas existentes.

Otra de las amenazas relacionadas con las anteriores, son las inundaciones. Estas constituyen, por su magnitud y frecuencia, una de las principales amenazas que se presentan en la región estudiada y es el fenómeno que ha generado más daños y pérdidas (Rogelis y col., 2014). Las inundaciones se originan por la abundante precipitación pluvial y escorrentía que presenta la subcuenca, tanto en la época seca, como en la lluviosa. Se destaca la elevada escorrentía en la época seca, periodo que comprende los meses que van de diciembre a abril y que según Van-der-Weert (2009), es producto del agua subterránea almacenada durante la época lluviosa que discurre en los meses de época seca, relacionado a su vez con la evapotranspiración real muy baja. Además, se suma la lluvia orográfica que producen los fuertes vientos alisios —conocida por los lugareños como “bajareque o norte”— y que azotan el área desde el mes de diciembre hasta marzo, y a su vez el aumento de la humedad relativa arriba

de 97 %, según muestran los datos de la estación Los Naranjos (ETESA, 2014), lo que hace aún más lenta la evapotranspiración (Tabla 4).

CONCLUSIONES

La caracterización del sistema físico-geográfico realizada en la subcuenca del río Caldera permitió establecer la existencia de multiamenazas en el área de estudio, así como los factores y elementos naturales que determinan su origen. El tectonismo de la Zona de Fractura de Panamá es uno de los principales agentes detonantes de la sismicidad moderada que se presenta en el área de estudio. El volcán Barú, por ser un volcán activo, es un factor de riesgo que requiere no sólo un monitoreo sísmico, sino también, monitoreos geoquímicos, hidroquímicos, de deformaciones y observación visual. Los elementos del sistema climático, como la precipitación y la escorrentía, combinados con los ambientes geomorfológicos de la subcuenca del río Caldera son los principales determinantes que causan los deslizamientos, aumentan el caudal del sistema fluvial y originan las inundaciones. Estas determinantes identificadas, así como la acción antrópica desarrollada en la localidad, deben ser consideradas al momento de establecer estrategias para reducir el riesgo de desastres, y crear planes de ordenamiento territorial. Los resultados obtenidos pueden ser de particular importancia para el Municipio de Boquete, del cual la subcuenca del río Caldera forma parte integral, en especial al considerar que en 2016, en la República de Panamá, se establecieron acciones de descentralización, otorgando a los municipios más recursos para la gestión local del riesgo a desastres.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al gobierno de México a través de la Secretaría de Relaciones Exteriores; al gobierno de Panamá a través de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación, y al Instituto para la Formación y Aprovechamiento de Recursos Humanos, por la beca doctoral otorgada a la M.G. Espinosa-Vega. Al Dr. Juan Carlos Arriaga-Rodríguez, por la dirección de la tesis doctoral.

■ Tabla 3. Inventario de las principales inestabilidades de laderas en la subcuenca del río Caldera, 1970 a 2014.

Table 3. Inventory of the main slope instabilities in the basin of the Caldera river, 1970 to 2014.

Fecha	Sitio de deslizamiento	Descripción de daños	Nivel de peligro
09-11/04/1970	Cauce del río Caldera	Embalses en la cabecera del río. Detonantes de la mayor inundación en la subcuenca del río Caldera	Alto
18/10/1986	San Ramón y Horqueta	Las vías fueron obstruidas por las masas de tierra	Bajo
19/10/1986	Carretera El Salto-Alto Quiel	Las vías fueron obstruidas por las masas de tierra	Bajo
19-20/06/1995	Jaramillo Centro, El Salto y Los Naranjos	Deslizamientos sobre la Quebrada Aserrió. Detonantes para la inundación de esa fecha	Alto
02/10/1996	Avenida Buenos Aires	Obstrucción de la carretera	Bajo
04/10/1996	Avenida Buenos Aires	Deslizamientos que afectaron a cinco viviendas	Bajo
07/07/1998	Río Caldera	Deslizamiento ocasionado por la crecida del Río Caldera. Originó derrumbes en la carretera en varios sectores	Medio
20/09/2002	Norte Bajo Mono	La carretera que conduce hacia la comunidad de Alto Quiel se obstruyó parcialmente	Medio
03/11/2009	Los Jaramillos, Arco Iris, Cerro La Popa, Valle Escondido, Quebrada Aserrió y Quebrada La Zumbona	Flujos de lodo en el cauce de los ríos, que causó embalses y provocó el aumento de caudal de las quebradas señaladas	Alto
22/08/2010	Los Cabezos; en la intersección Norte Bajo Mono-Horqueta; en la ruta hacia Horqueta; en Norte Bajo Mono; en la ruta hacia Volcancito (flujo de deslizamiento en la Quebrada Grande); ruta hacia Pueblo Nuevo-El Salto, ruta Alto Quiel-Callejón Seco; Los Jaramillos; Palmira y Los Ladrillos, parte alta de la microcuenca del río Palo Alto	Flujos de deslizamientos en Quebrada Grande. Socavación y deslizamientos activos en las laderas a orillas de la Quebrada La Zumbona	Alto
03/10/2011	Quebrada La Zumbona	Socavación de laderas a orillas de la Quebrada La Zumbona y río Palo Alto. La masa removida quedó en caudal	Medio
18/9/2013	Jaramillo Centro y Bajo Boquete	Movimientos de masas de suelos en el Cerro La Popa	Bajo

Fuente: Modificado a partir de Solís y Cuevas, 1995; Espinosa, 2009; Espinosa y col. (2010); Desinventar, 2014.

■ Tabla 4. Inundaciones registradas. Subcuenca del río Caldera, 1938 a 2014.
Table 4. Floods registered. Basin of the Calder river, 1938 to 2014.

Núm.	Fecha	Río/afluente	Factor físico detonante	Época climática
1	--/--/1938	Río Caldera	Lluvias	---
2	12/08/1969	Quebrada Horqueta	Lluvias	Lluviosa
3	---/01/1970	Río Caldera	Lluvias	Seca
4	6/04/1970	Río Caldera	Convergencia desde el oeste de Cartagena Colombia, que avanzó en dirección este de Panamá; y se produjo otra masa de aire frío y seco desde el suroeste hacia el este, sobre Costa Rica y el occidente de Panamá. Se produce 367 mm de precipitación en 24 horas.	Seca
5	09-11/04/1970	Río Caldera	Lluvias torrenciales por 3 d, 3 m de altura	Seca
6	--/10/1973	Río Caldera	Lluvias	Lluviosa
7	--/12/1975	Río Caldera	Lluvias	Lluviosa
8	01/10/1981	Río Caldera	Lluvias	Lluviosa
9	--/08/1984	Río Caldera	Lluvias	Lluviosa
10	--/--/1986	Río Caldera	Lluvias	---
11	--/08/1988	Río Caldera	Lluvias	Lluviosa
12	--/10/1989	Río Caldera	Lluvias	Lluviosa
13	4-6/11/1990	Quebradas Callejón Seco, Aserrío y Grande	Alta precipitación: 48 h Lluvias intensas. Registro de precipitación: Los Naranjos 205.4 mm y 98.9 mm Finca Lérica	Lluviosa
14	9-12/10/1991	Río Caldera	4 d de lluvias, el día 11 se registró 269 mm, el 65 % del total. En 1 h, 83 mm (4:00 p.m. a 5:00 p.m.)	Lluviosa
15	13/12/1993	Río Caldera	Lluvias	Seca
16	08/10/1994	Río Caldera	Lluvias	Lluviosa
17	19-20/06/1995	Quebrada Aserrío	Lluvias torrenciales. Caídas después de mediodía, hasta altas horas de la noche	Lluviosa
18	19/06/1996	Río Caldera	Lluvias	Lluviosa
19	29/10/1999	Río Caldera	Lluvias	Lluviosa
20	21/05/2002	Río Caldera	Lluvias	Lluviosa
21	09/01/2005	Río Caldera	Lluvias	Seca
22	22/11/2008	Río Caldera	Sistema de baja presión al este de la frontera de Panamá y Costa Rica, que se desplazó hacia el oeste 242 mm (4 d anteriores 175 mm)	Lluviosa
23	3-4/02/2009	Río Caldera	Precipitaciones	Seca
24	3-5/11/2009	Quebradas La Tusa, Grande y Arce	Lluvias	Lluviosa
25	22/08/2010	Río Caldera, Palo Alto, Quebrada La Tusa y Taylor	Lluvias	Lluviosa
26	26/09/2011	Quebrada Zumbona	Lluvias	Lluviosa
27	11/10/2011	Río Caldera	Lluvias	Lluviosa
28	15/01/2012	Río Caldera	Lluvias	Seca
29	05/03/2012	Río Caldera	Lluvias	Seca
30	22-23/07/2012	Río Caldera	Lluvias	Lluviosa
31	18/09/2013	Río Caldera	Lluvias	Lluviosa

Fuente: Modificado a partir de UP, 1990; Solís y Cuevas, 1995; base de datos Redhum, 2008 y Desinventar, 2013.

REFERENCIAS

- Adamek, S., H., Tajima, F., and Wiens, D. (1987). Seismic rupture associated with subduction of the Cocos Ridge. *Tectonics*. 6(6): 757-774.
- Adamek, S. H., Frohlich, C., and Pennington, W. D. (1988). Seismicity of the Caribbean Nazca boundary: constraints on microplate tectonics of the Panama Region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 93(B3): 2053-2075.
- ANAM, Autoridad Nacional del Ambiente (2011). Atlas ambiental de la República de Panamá 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.miambiente.gob.pa/images/stories/BibliotecaVirtualImg/AtlasAmbiental.pdf>. Fecha de consulta: 29 de abril de 2014.
- Benito, B. M., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, A., Marroquín, G., Molina, ..., and Torres, Y. (2012). A new evaluation of seismic hazard for the Central America Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 102(2): 504-523.
- Camacho, E. (1991). The Puerto Armuelles earthquake of July 18, 1934, en *Revista Geológica de América Central*. [En línea]. Disponible en: <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/13058/12326>. Fecha de consulta: 28 de marzo de 2014.
- Camacho, E. (2003). Sismotectónica del extremo norte de la Zona de Fractura de Panamá. *Tecnociencia*. 5(2): 139-152.
- Camacho, E. (2009). Sismicidad de las Tierras Altas de Chiriquí. *Tecnociencia*. 11(1): 119-130.
- Camacho, E., Novelo-Casanova, D., Tapia, A., and Rodríguez, A. (2008). Seismicity at Baru Volcano, Western Panama, Panama, in *AGU Fall Meeting in Abstracts. 1: 2051*. [En línea]. Disponible en: https://www.agu.org/meetings/fm10/pdf/AGU_FM10_Scientific_Program.pdf. Fecha de consulta: 25 de julio de 2015.
- Camacho, E., Hutton, W., and Pacheco, J. (2010). A new look at evidence for a Wadatti Benioff Zone and active convergence at the North Panama deformed belt, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 100(1): 343-348.
- Cárdenas-Hernández, O. G. y Gerritsen, P. R. (2015). Dinámica paisajística y cambio de cobertura en la comunidad indígena de Cuzalapa, Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (1972 a 2000). *CienciaUAT*. 9(2): 30-40.
- Castellanos, A. and Van-Westen, C. J. (2007). Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. *Landslides*. 4(4): 311-325.
- DESINVENTAR, Sistema de inventario de efectos de desastres (2013). Corporación OSSO. Colombia. [En línea]. Disponible en: <http://www.desinventar.org/es/>. Fecha de consulta: 22 de mayo de 2014.
- DESINVENTAR, Sistema de inventario de efectos de desastres (2014). Corporación OSSO. Colombia. [En línea]. Disponible en: <http://www.desinventar.org/es/>. Fecha de consulta: 31 de julio de 2015.
- ETESA, Empresa de Transmisión Eléctrica (2009). Régimen hidrológico de Panamá. [En línea]. Disponible en: http://www.hidromet.com.pa/regimen_hidrologico.php. Fecha de consulta: 6 de marzo de 2014.
- ETESA, Empresa de Transmisión Eléctrica (2014). Datos históricos de temperatura (°C). [En línea]. Disponible en: http://www.hidromet.com.pa/clima_historicos.php. Fecha de consulta: 6 de marzo de 2014.
- Espinosa, C. (2009). *Informe técnico de deslizamientos ocurridos el 3-4 de noviembre de 2009*. [Informe inédito], Laboratorio de Sistema de Información Geográfica. Universidad Autónoma de Chiriquí e Instituto de Geociencias de la Universidad de Panamá. 10 Pp.
- Espinosa, C. E. y Arriaga-Hurtado, I. (2014). Enfoque Sistemático de la gestión local del riesgo por inundación. El caso de la subcuenca del río Caldera en el Distrito de Boquete, Panamá. *Investigaciones Geográficas*. Chile. 48: 53-72.
- Espinosa, C., Tapia, A. y Barría, W. (2010). *Estrategias para la prevención de amenazas por la actividad del Volcán Barú, apoyados con un Sistema de Información Geográfica, en la Provincia de Chiriquí, República de Panamá*. [Informe inédito], Laboratorio de Sistema de Información Geográfica de la Universidad Autónoma de Chiriquí e Instituto de Geociencias de la Universidad de Panamá. 6 Pp.
- Fuchs, S., Keiler, M., and Zischg, A. (2015). A spatio temporal multi-hazard exposure assessment based on property data. *Natural Hazards Earth System Sciences*. 15(9): 2127-2142.
- Gill, J. and Malamud, B. (2014). Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards. *Reviews of Geophysics*. 52(4): 680-722.
- Herrera, L. (2003). El río Caldera y las inundaciones del 9 de abril de 1970 en el Oeste de Chiriquí. Una interpretación desde el punto de vista Geográfico. En L. Lozano (Ed.), *El país que somos. 30 años de Geografía Humana en Panamá* (pp. 59-68). Universidad de Panamá: Instituto de Estudios Nacionales (IDEN).
- IGN, Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" (1991). República de Panamá, mapa geológico, 1: 250 000. Ed. 1, Panamá.
- IGN, Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" (1993). Hoja topográfica de Boquete, 1: 50 000, serie E762. Panamá.

- IGN, Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia” (2004). Panamá provincia. [Shapefile Feature Class]. Panamá.
- Instituto de Geociencias (2014). Red Sismológica Nacional. Hoja de cálculo de Microsoft Excel. Panamá.
- INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censo de Panamá (2010). Censos de Población y Vivienda de 1990 a 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.contraloria.gob.pa/inec/>. Fecha de consulta: 14 de marzo de 2014.
- IRIS, Seismic Monitor (2014). Interactive map of global seismic activity. [En línea]. Disponible en: <http://www.iris.washington.edu/ieb/index.html?format=text&nodata=404&starttime=19700101&endtime=20250101&orderby=timedesc&limit=1000&maxlat=12.98&minlat=-11.35&maxlon=-52.29&minlon=-103.23&zm=5&mt=ter>. Fecha de consulta: 1 de mayo de 2014.
- Johnson, J. and Gheorghe, A. (2013). Antifragility analysis and measurement framework for systems of systems. *International Journal of Disaster Risk Science*. 4(4): 159-168.
- Kappes, M., Keiler, M., and Glade, T. (2010). From single to multi-hazard risk analyses: a concept emerging challenges. En J. P. Malet, T. Glade, and N. Casagli (Eds.), *Mountain risks: bringing science to society* (pp. 351-356). Proceedings of the international conference, Florence: CERIG Editions, Strasbourg.
- Kappes, M., Keiler, M., Von-Elverfeldt, K., and Glade, T. (2012). Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. *Natural Hazards*. 64(2): 1925-1958.
- Kellog, J. and Vega, V. (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity. En P. Mann (Ed.), *Geological and tectonic development of the caribbean plate boundary in Southern Central America* (pp. 75-86). Colorado, USA: The Geological Society of America, Inc.
- Kobayashi, D., LaFemina, P., Geirsson, H., Chichaco E., Abrego, A. A., Mora, H., and Camacho, E. (2014). Kinematics of the western Caribbean: Collision of the Cocos Ridge and upper plate deformation, in *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/261720423_Kinematics_of_the_Western_Caribbean_Collision_of_the_Cocos_Ridge_and_upperplate_deformation#pag:4:mrect:\(309.32,493.70,73.65,8.27\)](https://www.researchgate.net/publication/261720423_Kinematics_of_the_Western_Caribbean_Collision_of_the_Cocos_Ridge_and_upperplate_deformation#pag:4:mrect:(309.32,493.70,73.65,8.27)). Fecha de consulta: 3 de noviembre de 2014.
- Kolarsky, R. and Mann, P. (1995). Structure and neotectonics of an oblique-subduction margin, southwestern Panama. En P. Mann (Ed.), *Geological and tectonic development of the caribbean plate boundary in Southern Central America* (pp. 131-158). Colorado, USA: The Geological Society of America, Inc.
- Komendantova, N., Mrzyglocki R., Mignan, A., Khazai, B., Friedemann, W., Patt, A., and Fleming, K. (2014). Multi-hazard and multi-risk decision-support tools as a part of participatory risk governance: Feedback from civil protection stakeholders. *International Journal of disaster risk reduction*. 8: 50-57.
- Mann, P. and Kolarsky, R. (1995). East Panama deformed belt: Structure, age, and neotectonic significance. En P. Mann (Ed.), *Geological and tectonic development of the caribbean plate boundary in Southern Central America* (pp. 111-130). Colorado, USA: The Geological Society of America, Inc.
- Marzocchi, W., Garcia-Aristizabal, Gasparini, A. P., Mastellone, M. L., and Di-Ruocco, A. (2012). Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy. *Natural Hazards*. 62(2): 551-573.
- McKay, A. (2000). Clima y biodiversidad: una nueva clasificación de los climas de Panamá. *Rev. Cultural Lotería*. 431: 47-61.
- Miklin, Z., Jurak, V., Sliskovic, I., and Dolic, M. (2009). Heuristic approach by geotechnical hazard evaluation of the Medvednica Nature Park, in *The Mining-Geological-Petroleum Engineering Bulletin*. [En línea]. Disponible en: <http://hrcak.srce.hr/47245>. Fecha de consulta: 6 de noviembre de 2011.
- Moore, G. and Sender, K. (1995). Fracture zone collision along the South Panama margin. En P. Mann (Ed.), *Geological and tectonic development of the caribbean plate boundary in Southern Central America* (pp. 201-212). Colorado, USA: The Geological Society of America, Inc.
- Morell, K., Fisher, D., and Gardner, T. (2008). Inner forearc response to subduction of the Panama Fracture Zone, southern Central America. *Earth and Planetary Science Letters*. 265 (1-2): 82-95.
- National Hurricane Center (2014). Tropical cyclone advisory archive. National Weather Service. [En línea]. Disponible en: <http://www.nhc.noaa.gov/>. Fecha de consulta: 23 de mayo de 2014.
- Natural Earth (2016). Natural Earth vector. 10 m cultural. [En línea]. Disponible en: <http://www.naturalearthdata.com/>. Fecha de consulta: 9 de marzo de 2016.
- Peel, M. C., Finlayson, B., and McMahon, T. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. 4(2): 439-473.
- Redhum, Red de Información Humanitaria para América Latina y el Caribe (2008). Emergencias en la Región. [En línea]. Disponible en: <http://www.redhum.org/emergencia/>. Fecha de consulta: 19 de diciembre de 2015.
- Rogelis, M., Lam, J., and Ramírez-Cortés, F. (2014). Advances in flood risk assessments for data-limited changing environments. 6th International Conference on Flood Management, Sao Paulo, Brazil. [En línea]. Disponible en: <http://>

www.abrh.org.br/icfm6/proceedings/papers/PAP014415.pdf. Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2015.

Sánchez, Y. (2009). *Reporte de susceptibilidad por inestabilidad de laderas en la subcuenca del río Caldera (potencial área de influencia por Amenaza Volcánica del Volcán Barú)*. Panamá: SENACYT, Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación. 68 Pp.

Sherrod, D., Vallance, J., Tapia, A., and McGeehin, J. (2008). Volcan Baru; eruptive history and volcano-hazards assessment: U.S., in *Geological Survey Open-File Report 2007-1401*. [En línea]. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/of/2007/1401/>. Fecha de consulta: 28 de marzo de 2014.

Soeters, R. and Van-Westen, C. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. En A. K. Turner and R. Schuster (Ed.), *Landslides investigation and mitigation* (pp. 129-177). Washington, DC: National academy press.

Solís, H. y Cuevas, J. (1995). Modelización hidrológica e hidráulica en la cuenca del río Caldera. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y el Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación (IRHE). Panamá. [En línea]. Disponible en: <http://www.sidalc.net/repdoc/A6550E/A6550E.pdf>. Fecha de consulta: 3 de noviembre de 2014.

Strahler, A. and Strahler, A. (2005). *Physical Geography: Science and Systems of the Human Environment*. New York: John Wiley & Sons, Incorporated. 794 Pp.

Toral, J. y Ho, C. (2006). Monitoreo y análisis preliminar de la sismicidad alrededor de Boquete (Informe técnico). Universidad Tecnológica de Panamá. Centro Experimental de Ingeniería. Laboratorio de Ingeniería Aplicada. Sección de sismología. [En línea]. Disponible en: <http://www.cei.utp.ac.pa/documentos/2010/pdf/InfoBolquete2.pdf>. Fecha de consulta: 26 de marzo de 2014.

UNESCO, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2008). Balance hídrico superficial de Panamá, Periodo 1971-2002, en *Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 9*. [En línea]. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001591/159103s.pdf>. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2014.

UNISDR, Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres y CEPREDENAC, Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en Centroamérica (2014). Informe regional del estado de la vulnerabilidad y riesgos de desastres en Centroamérica. [En línea]. Disponible en: <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/40079>. Fecha de consulta: 12 de junio de 2014.

UP, Universidad de Panamá (1990). *Desastres Naturales y Zonas de riesgo en Centroamérica: condiciones y opciones de*

prevención y mitigación. Ciudad de Panamá: Panamá. Instituto de Estudios Nacionales. 118 Pp.

USDA, United States Department of Agriculture (1999). Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. [En línea]. Disponible en: http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051232.pdf. Fecha de consulta: 14 de mayo de 2014.

USGS, United States Geological Survey (2014). Earthquake Hazards Program. [En línea]. Disponible en: <http://earthquake.usgs.gov/monitoring/?source=sitenav>. Fecha de consulta: 23 de mayo de 2014.

Van-der-Weert, R. (2009). *Flooding of the Caldera river*. Report PUM mission to Panama. Boquete. 38 Pp.

Van-Westen, C., Alkema, D., Damen, M., Kerle, N., and Kingma, N. (2011). Multi-hazard risk assessment. Distance education course. Guide book. United Nations University – ITC School on Disaster Geoinformation Management (UNU-ITC DGIM). [En línea]. Disponible en: ftp://ftp.itc.nl/pub/vanwesten/Multi_hazardrisk_course/Guidebook/Guidebook%20MHRA.pdf. Fecha de consulta: 25 de julio de 2015.

Van-Westen, C., Damen, M., and Feringa, W. (2013). National scale multihazard risk assessment. University Twente, Faculty of Geo Information Science and Earth Observation (ITC). Enschede, The Netherlands. [En línea]. Disponible en: http://www.itc.nl/library/papers_2013/general/vanwesten_pprd_theory_2013.pdf. Fecha de consulta: 25 de julio de 2015.

Vergara, A. (1998). Tectonic pattern of the Panama Block deduced from seismicity, gravitational data and earthquake mechanism: Implications to the seismic hazard. *Tectonics*. 154: 253-267.

Verstappen, H., Van-Zuidam, R., Meijerink, A., and Nossin, J. (1991). *The ITC system of geomorphologic survey: a basis for the evaluation of natural resources and hazards*. Enschede: ITC. 89 Pp.

Westbrook, G., Hardy, N., and Heath, R. (1995). Structure and tectonics of the Panama-Nazca plate boundary. *Geological Society of America Special Papers*. 295: 91-110.

White, R. and Harlow, D. (1993). Destructive upper crustal earthquake in Central America since 1900. *Bull. Seism. Soc. Am.* 83(4): 1115-1142.

Zinck, J. (1988). *Physiography and soils, ITC Lecture Note SOL.4.1*. Enschede: ITC. 156 Pp.

Zinck, J. (2012). Geopedología. *Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. ITC Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation Enschede: The Netherlands. 123 Pp.