

# Protocolos de respuesta petrológica en el caso de crisis volcánica en El Salvador (Centroamérica): análisis de los recursos locales

## *Petrological tests in a scenario of volcanic crisis at El Salvador (Central America): evaluation of available local resources*

D. Gimeno<sup>1</sup>, A. Hernández de la Cruz<sup>1,2</sup> y G. Gisbert<sup>1</sup>

1 Dpt. Geoquímica, Petrología i Prospecció Geològica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona 08028 Barcelona. agushernandez@ub.edu, domingo.gimeno@ub.edu, ggisbertp@ub.edu

2 Instituto de Vulcanología de la Universidad de El Salvador, Final 25 Avda. Norte, 503 - San Salvador, El Salvador, C.A.

**Resumen:** La peligrosidad volcánica en El Salvador se asocia principalmente a la presencia de un volcanismo calcoalcalino activo que ha dado en tiempos históricos erupciones (de ámbito local) asociadas a estratovolcanes básicos de 1000-1200 m de altura, y a calderas riolíticas de menor recurrencia eruptiva pero con erupciones con mucho más explosivas y grado de afectación de escala regional. En esta contribución se analizan los recursos analíticos locales para determinar rápidamente la composición química y cristalinidad (y por tanto potencial explosividad) de los magmas implicados en una erupción.

**Palabras clave:** Erupción, El Salvador, MEB+EDS, FRX, AAS, DRX.

**Abstract:** Volcanic hazard in El Salvador is mainly related to the presence of active calc-alkaline volcanism that has produced, in historical time, local eruptions related to basic stratovolcanoes (1000-1200 m in height), and also to rhyolitic calderas of lesser eruptive recurrence but with much higher explosivity and destructive potential at regional scale. In this contribution, the local analytical facilities are evaluated in order to determine how to determine in the shorter time the chemical composition and crystallinity (and therefore the potential explosivity) of the magma involved in an eruption.

**Key words:** Eruption, El Salvador, SEM+EDS, XR, AAS, XRD.

## INTRODUCCIÓN

El Salvador es un país que presenta una geología relativamente “joven”, con un muy amplio predominio de las rocas volcánicas en su substrato. Los materiales más antiguos afloran en el extremo NO del país, principalmente volcanismo básico y sedimentos asociados de edad Cretácica. El resto del país está constituido esencialmente por volcanismo de afinidad calcoalcalina con un rango composicional amplio (desde basaltos a riolitas), y predominio de los términos básicos e intermedios, y las rocas epiclásticas asociadas. Hay que relacionar este volcanismo calcoalcalino de carácter orogénico con un borde de placa de tipo andino, extendido en toda la región centroamericana en el que una placa oceánica (Cocos) subduce hacia el NE bajo la del Caribe. Esta situación de borde de placa sobre zona de subducción se mantiene desde inicios del Mioceno, si bien en El Salvador puede distinguirse claramente la faja de volcanismo activo actual en el sur del país (actividad en los últimos 200.000 años, más de 15 volcanes activos en la actualidad).

El conocimiento geológico general del país, y en particular el del volcanismo y la petrología de los magmas asociados a la actividad eruptiva activa puede

clasificarse como relativamente superficial, hecho normal teniendo en cuenta aspectos como la densa masa forestal y la ausencia de estructuras científicas en el país específicamente dedicadas al tema. Sin embargo, la incidencia de desastres naturales, y muy especialmente terremotos, erupciones volcánicas y otros fenómenos catastróficos asociados a depósitos volcánicos (singularmente lahares fríos desatados por lluvias torrenciales) han originado el interés de las autoridades y estructuras científicas del país en su estudio. Así, el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y el Instituto de Vulcanología de la Universidad de El Salvador (IV-UES) han realizado diferentes actividades relacionadas con el monitoreo de los volcanes más activos, de cara a detectar posibles episodios eruptivos en el futuro. Entre estas actividades e investigaciones hay que destacar por parte del SNET la preparación de informes y cartas temáticas sobre el riesgo de algunos estratovolcanes (San Salvador, San Miguel, Santa Ana, San Vicente...) en colaboración con técnicos del United States Geological Survey (USGS) y de universidades centro y norteamericanas (Major et al 2001, Sofield 2004, Ferrés et al 2011) y, entre otras, actividades de monitoreo de gases por parte del IV-UES.



FIGURA 1. Áreas de posible peligro volcánico asociado a erupciones volcánicas: 1.Relacionadas con los estratovolcanes básicos principales: Santa Ana, San Salvador, San Vicente, San Miguel; 2 con erupciones hidromagmáticas silícicas producidas en calderas que albergan lagos, comparables a las más recientes, en verde relacionadas con la caldera de Coatepeque y en rojo relacionadas con la caldera de Ilopango

## ESTRUCTURA TECTOVOLCÁNICA, TIPOS DE ERUPCIONES Y PELIGROSIDAD

La práctica totalidad de las previsiones de riesgo se han desarrollado sobre los estratovolcanes (de unos 1000-1300 m de altura sobre su substrato relativo) citados más arriba, que presentan composiciones en el rango basalto-andesita basáltica-andesita, y que por este motivo principalmente desarrollan actividades eruptivas de moderada explosividad (estrombolianas o a lo sumo vulcanianas) y muy frecuentemente simplemente emisión de coladas lávicas, de potencial destructivo relativamente menor. La situación de algunos núcleos urbanos, y singularmente la capital San Salvador sobre las faldas del volcán homónimo incrementan enormemente la vulnerabilidad de la población y hacen que incluso una erupción de pequeñas dimensiones pueda llegar a generar grandes problemas, daños a las infraestructuras y pérdida de vidas humanas (58 vidas en la última erupción del volcán San Salvador en 1917, unas 500 en un lahar inducido por lluvias torrenciales en 1981).

Estos estratovolcanes son efectivamente los que han desarrollado una mayor actividad en tiempos históricos, pero no los que presentan un mayor potencial destructivo. Visto desde el punto de vista regional, en el sur de Guatemala y El Salvador aparecen frecuentemente asociados especialmente (o ligeramente desplazados hacia el norte) otro tipo de volcanes, camuflados bajo la apariencia de lagos de planta circular. Se trata de calderas de colapso de considerables dimensiones (hasta un total de al menos 5, alineadas aproximadamente paralelas a la traza de la

fosa de subducción a lo largo del margen pacífico centroamericano, separadas entre sí distancias del orden de 50-60 km (Atitlán, Amatitlán y Ayarza en Guatemala, Coatepeque e Ilopango en El Salvador), que han producido en el pasado reciente (los últimos 200.000 años) reiteradas erupciones plinianas, subplinianas y ultraplínianas, todas ellas de carácter altamente explosivo y caracterizadas por la emisión de flujos piroclásticos de dispersión radial (decenas de kms de desplazamiento radial) y altas velocidades), así como depósitos de caída plinianos (Rose et al. 1999). Los espacios entre calderas aparecen ocupados por diferentes estratovolcanes, en algunos casos anidados en el margen de las calderas (p.e. volcán de Santa Ana en la caldera de Coatepeque). Curiosamente, la cronología e importancia de algunas de estas erupciones se conoce en gran medida a partir del interés surgido a partir de estudios arqueológicos (Dull et al. 2001). La última de estas erupciones en El Salvador partió de la caldera Ilopango (al este de San Salvador) hace unos 1600 años; un fenómeno semejante hoy en día podría tener efectos devastadores en la capital San Salvador, base administrativa y económica del país, y afectar de manera más o menos directa a más de cinco millones de personas.

## CRISIS ERUPTIVA Y PROTOCOLOS DE RESPUESTA PETROLÓGICA

Si atendemos a las erupciones registradas en los últimos 1600 años podemos encontrar una amplia variedad de peligros originados por los volcanes: desde actividad explosiva freatomagmática de horas o días de duración y columnas eruptivas de hasta 10 km y flujos

piroclásticos y lahares asociados (p.e. volcán Santa Ana, 2005), coladas y domos lávicos emitidos durante semanas o meses (domos intracaldéricos de Islas Quemadas en la caldera de Ilopango, 1880, coladas del San Salvador, 1917), o incluso erupciones hidromagmáticas plinianas o ultraplinianas relacionadas con las calderas riolíticas (la última de ellas tan próxima como la producida en la caldera de Ilopango alrededor del 420, un periodo que en Europa sería plenamente histórico). La composición de los productos emitidos por estos episodios varía desde basalto hasta riolita, incluyendo episodios caracterizados por la mezcla de magma de diferentes composiciones.

En este contexto se comprenderá que debería prestarse una gran atención incluso a los eventos eruptivos más pequeños que se han ido reproduciendo en los últimos decenios, teniendo en cuenta que el grado potencial de explosividad de los magmas crece con su diferenciación hacia el polo riolítico, que la mezcla de magma de diferentes composiciones en cámaras magmáticas someras puede desencadenar una erupción importante de tipo pliniano, y que la presencia de evidencias de interacción con agua (determinable mediante estudio morfoscópico de las cenizas emitidas en un evento explosivo) puede ser de gran ayuda para comprender el potencial explosivo de un volcán.

En vista de todo ello, y previa una evaluación de la respuesta inmediata deseable (caracterización de la morfología y composición de cenizas mediante microscopía electrónica dotada de microanalizador, composición mineralógica mediante microscopio petrográfico y/o difracción de rayos X, composición química mediante espectroscopia de fluorescencia de rayos X o método similar) basada en la respuesta en episodios semejantes (y especialmente en las respuestas a las erupciones del Eyjafjallajökull en Islandia, 2010; y Puyehue-Cordón Caulle 2011 en Chile, afectando principalmente a Argentina) se procedió a un estudio sobre el terreno (agosto-septiembre de 2011) de la disponibilidad de recursos analíticos locales en caso de emergencia nacional en el curso de una hipotética erupción, cuyos resultados se exponen en esta nota.

A tal efecto se visitaron las instalaciones de diferentes empresas y centros de investigación públicos: SNET (estudios territoriales), La Geo (geotermia, exploración y explotación industrial) (San Salvador), Anda (aguas para el consumo humano), Procafé (investigación agrícola), Universidad Nacional de El Salvador (educación e investigación, San Salvador y Santa Ana), Holcim (cementos, Metapán). Igualmente se tomó en consideración las áreas de posibles afectaciones, en especial por productos piroclásticos (en todo el país) y por emisiones lávicas (en las áreas circundantes a los principales estratovolcanes activos: la capital San Salvador por lo

que se refiere al volcán homónimo; Santa Ana, San Vicente y San Miguel).

El principal problema en el caso de una erupción explosiva importante se manifestaría en el sector de San Salvador, donde se concentra no sólo la mayor parte del tejido administrativo y económico del país sino también buena parte de las infraestructuras analíticas que pueden resultar afectadas por una erupción. Hay que tener presente que incluso una erupción lávica relativamente poco peligrosa como la desarrollada en 1917 en el flanco norte de El Salvador ocasionaría en la actualidad un impacto mucho mayor y, probablemente más víctimas, ya que la densidad de población dispersa en la falda del volcán es mucho mayor, y el incremento de medios de evacuación difícilmente compensaría el de población, dado su carácter disperso.

Disponibilidades analíticas detectadas. Sin duda, la mejor capacidad de respuesta analítica se encuentra en la empresa privada Holcim de Metapán. Se dispone de moderna FRX y laboratorios completos de preparación de muestras, y analizan rutinariamente este tipo de materiales por formar parte de la materia prima (concretamente pozzolanas) que emplea la cementera. Se ha establecido un acuerdo para realizar un ensayo de comparación entre resultados obtenidos de rocas volcánicas salvadoreñas en la UB y en Holcim. La ubicación de la instalación, en el extremo NO del país y relativamente alejada de la banda de volcanismo activo, al igual que la tendencia conocida de expansión de los productos piroclásticos originados en la caldera de Coatepeque (Ignimbrita Congo, principalmente hacia el SO) hace igualmente interesante esta instalación. El único inconveniente posible a considerar es el posible cierre de la carretera de acceso en caso de importante erupción tanto en el área de Santa Ana como en San Salvador.

Universidad de El Salvador en San Salvador (UES). La instalación de microscopía electrónica de barrido (MEB) del CENSALUD, instalada en su día por la cooperación internacional española, permitiría un reconocimiento rápido de la morfología de cenizas, y por lo tanto podría servir para estudiar el potencial hidromagmático de las erupciones en el estadio inicial de éstas, siempre que se estableciera correctamente un protocolo de aviso y recogida rápida de ésta en los principales estratovolcanes (Santa Ana, El Salvador, San Miguel, San Vicente) cosa que no se ha hecho en el caso de las erupciones más recientes. El hándicap principal de esta instalación es que carece de un microanalizador asociado dotado de sonda de espectroscopia de energías dispersadas (EDS). Por lo tanto, la más rápida caracterización de una ceniza en términos de su composición química con una aproximación semicuantitativa fiable no está disponible por lo que sabemos en todo el país. Existen otros equipos de MEB (según parece al menos dos, uno en

policía científica y el otro en un hospital público) pero no hemos tenido acceso a ellos aún, y según informan fuentes locales carecerían igualmente del EDS. El resto de laboratorios químicos de la UES en San Salvador visitados no podrían colaborar en gran cosa en la caracterización química rápida de piroclastos o lavas en el curso de una erupción. El Laboratorio químico del Instituto del Agua de la UES en Santa Ana consta de una antigua instalación de espectroscopía de absorción atómica (AAS) admirablemente mantenida en correcto funcionamiento, pero ni por la necesaria preparación de la muestra de roca (de hecho el laboratorio se ocupa principalmente de análisis de aguas) ni por la velocidad intrínseca del instrumento analítico parecen adecuados para la respuesta rápida en caso de erupción. Además hay que añadir que en el caso de erupción en Santa Ana este laboratorio está ubicado en el área de probable incidencia directa y/o incomunicación por carretera.

La Gea (San Salvador) dispone de laboratorios para la preparación de láminas delgadas (poco mecanizado pero eficiente y de calidad correcta) y servicio de microscopía petrográfica, así como difractor de rayos X (DRX), que funcionan rutinariamente sin interrupciones. Puede ser útil en caso de carecer de una caracterización química rápida, siempre que los productos de la erupción sean al menos moderadamente cristalinos. Igualmente la DRX puede ayudar en el caso de la erupción de un magma evolucionado (dacítico o riolítico) en la detección precoz de fases minerales finas peligrosas por inhalación (p.e. cristobalita). Además, aunque ubicado en San Salvador este laboratorio está emplazado en el área de teórica menor recurrencia de erupciones volcánicas (especialmente lávicas) del volcán de San Salvador.

El laboratorio de ANDA (empresa de suministro de agua de consumo humano en el área metropolitana de San Salvador) dispone de laboratorios modernos y en perfecto estado de funcionamiento de AAS, pero carece del adecuado servicio para solubilización de muestras de roca silicatada.

El laboratorio de PROCAFE dispone de un laboratorio de AAS antiguo pero que funciona correctamente con una cierta regularidad para el análisis de los cationes predominantes en suelos y productos vegetales, pero carece del sistema necesario de preparación y solubilización de rocas silicatadas.

Algunos de estos laboratorios (principalmente ANDA y HOLCIM, pero también UES-Santa Ana y también PROCAFÉ) podrían ser utilizados llegado el caso para una evaluación precoz de los elementos traza potencialmente tóxicos lixiviables en cenizas procedentes de una erupción (Ruggieri et al 2011). Tanto ANDA como PROCAFÉ por su ubicación en la falda meridional del volcán de San Salvador podrían presentar problemas de acceso o funcionamiento tanto

en el caso de erupción lávica como por emisión de productos de caída a partir de este volcán.

No queremos concluir esta nota sin indicar que la evaluación realizada no es exhaustiva de la potencialidad analítica de El Salvador (y de hecho se proseguirá en el futuro inmediato), y sin recordar que no toca elementos que pueden ser fundamentales en la determinación de la peligrosidad inminente de una erupción como la existencia de una red geofísica bien preparada para el análisis de tremor volcánico, o el análisis de gases que la UES y otras instituciones están ya realizando de manera bastante sistemática en los principales estratovolcanes activos.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha financiado por la Universitat de Barcelona (Cooperació Internacional, convocatoria 2011) y por la Universidad Nacional de El Salvador. La Dra Erlinda Haendel (MINED) lo propuso en 2010 y ha sido posible gracias a la hospitalidad y cooperación de las empresas y entes citados en el texto.

## REFERENCIAS

- Dull, R., Southon, J.R. y Sheets, P. (2001): Volcanism, ecology and culture: a reassessment of the Volcan Ilopango TBJ eruption in the southern Maya realm. *Latin American Antiquity*, 12 (1): 25-44.
- Ferrés, D., Delgado Granados, H., Hernandez, W., Pullinger, C., Chavez, H., Castillo Taracena, C.R. y Cañas-Dinarte, C.. (2011): Three thousand years of flank and central vent eruptions of the San Salvador volcanic complex (El Salvador) and their effects on El Cambio archeological site: a review based on tephrostratigraphy. *Bulletin of Volcanology*, 73(7), 833-850.
- Major, J.J., Schilling, S.P., Sofield, D.J., Escobar, C.D. y Pullinger, C.R. (2001): *Riesgos volcánicos en la Región de San Salvador, El Salvador*. Tesis Doctoral, Univ. de Barcelona, 203 p. U.S. Geological Survey, Open File 01-366, Vancouver, Washington, 21 pp.
- Sofield, D. (2004): Eruptive history and volcanic hazards of Volcán San Salvador. En: *Natural hazards in El Salvador* (W.I. Rose, J.J. Bommer, D.L. López, M.J. Carr y J.J. Major eds.) Geological Society of America Special Paper 375, Boulder, Colorado, 147-158.
- Rose, W.I., Conway, F.M., Pullinger, C.R., Deino, A. y McIntosh, W.C. (1999): An improved age framework for late Quaternary silicic eruptions in northern Central America. *Bulletin of Volcanology*, 61: 106-120.
- Ruggieri, F., Fernandez-Turiel J.L., Saavedra, J., Gimeno D., Polanco, E. Naranjo, J.A. (2011): Environmental geochemistry of recent volcanic ashes from Southern Andes. *Environmental Chemistry*, 8: 236-247.