

Consideraciones sobre la viscosidad de lavas y la estructura de las coladas del Volcán Arenal. Costa Rica

*Andrea Borgia
Corrado Cigolini**

RESUMEN. La aplicación estadística del método propuesto por Shaw (1972) permite calcular, conocidas las temperaturas de extrusión y las características de las lavas, el coeficiente de viscosidad teórica. La comparación de los datos teóricos con las medidas de campo, permite evaluar el comportamiento físico del magma y, en consecuencia, la influencia del mismo sobre la estructura de las coladas.

La alta viscosidad de las lavas del Volcán Arenal se debe a microdiferenciación entre los fenocristales y la matriz, y a la estructura dinámica de las coladas. En particular, la parte superior de la colada y las paredes del canal de flujo se comportarían como aislador térmico y estructura de confinamiento dinámico inhibiendo la distribución areal de las coladas. La continua efusión de magma está directamente ligada a la alta temperatura de las lavas; lo que parece estar en re-

* Miembros del Programa de Cooperación Técnica Italo-costarricense, con sede en la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional.

lación con particulares condiciones físico-estructurales en el contacto manto-placa, en subducción, en correspondencia del Volcán Arenal.

SUMMARY. The statistical application on the method proposed by Shaw (1972) allows us to calculate a theoretical viscosity for the Arenal Volcano lavas given the extrusion temperatures and the petrochemical characteristics. The comparison of the theoretical data with field measurements permits evaluation of the physical behaviour of the magma and consequently its influence upon the structure of lava flows.

The high viscosity of the Arenal Volcano lavas is due to microdifferentiation occurring between the phenocrysts and the groundmass and to the structure of lava flows. In particular the upper part of the flow and the natural levees of the channel, although producing an insulating effect, would inhibit the flowing of the inner part and therefore the areal distribution of lava flows. The continuous effusion of magma seems to be related to the high temperature of the lavas. This latter characteristic suggests the existence of particular physical and structural conditions occurring at the contact mantle-descending oceanic slab below the Arenal Volcano.

RESUME. En appliquant la méthode statistique proposée par Shaw (1972) on peut calculer, à partir de la température et des caractéristiques pétrochimiques des laves, le coefficient de viscosité théorique. En comparant les résultats théoriques, et les mesures effectuées sur place, on peut évaluer la dynamique du magma et, en conséquence, l'impact de celle-ci sur la structure des coulées de lave.

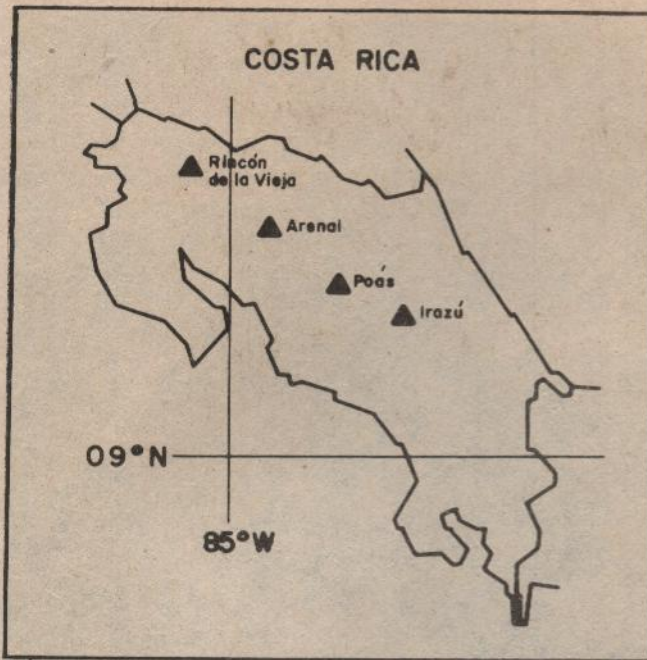
La haute viscosité relative des laves du Volcan Arenal se doit au fort pourcentage de gaz contenus tandis que l'effusion continue du magma est relationnée à leur haute température; et aussi, paraît-il, aux conditions physico-estructurales particulières de la subduction de plaque à laquelle est lié le Volcan Arenal.

INTRODUCCION

El Volcán Arenal de Costa Rica (fig. 1) presenta una efusión casi continua de lava, en coladas de tipo aa que envuelven a coladas de bloques (fig. 2), desde setiembre de 1968, hasta el presente. Esta actividad se inició con una breve e intensa fase explosiva del 29 al 31 de julio de 1968.

Los datos petroquímicos existentes (Melson y Sáenz, 1973; Malavassi, 1979) evidencian la tendencia de las lavas (andesitas y andesitas basálticas) a ser relativamente menos diferenciadas en el tiempo.

La temperatura del magma en la boca del cráter, obtenida en base a medidas efectuadas por los autores, alcanza los 1.020° C (mayo 1980). Este dato permite la aplicación del método propuesto por Shaw (1972), para el cálculo teórico de la viscosidad basándose en las características petroquímicas de las rocas. La comparación de los valores teóricos con las medidas de campo permite evaluar el comportamiento físico de las lavas del Arenal y, en consecuencia, la estructura y la distribución areal de las coladas.



D/G. Hernández R. (81)

Figura 1 Localización del Volcán Arenal.

METODO APLICADO

Bottinga y Weill (1972) han determinado la contribución positiva o negativa de los óxidos componentes del líquido silicático. Entonces, conociendo la composición química de una lava, la contribución de cada componente (K_2O , Al_2O_3 , CaO , SiO_2 , TiO_2 , FeO_{tot} , MgO , Na_2O , K_2O), * puede ser computada para obtener la viscosidad de la lava según la ecuación:

$$\ln \eta(T) = \sum_i X_i D_i(T) \quad (1)$$

donde X_i representa la concentración molar de cada componente, D_i la contribución, en aumento o disminución de la viscosidad, relativa al componente, (i) a la temperatura, (T) la constante.

* La relación de Jeffreys está expresada por la ecuación:

$$\eta = \frac{9d^2 p \operatorname{sen} \alpha}{3v}$$

donde g es la aceleración de gravedad d el espesor de la colada, α el ángulo de inclinación de la misma, p la densidad de la lava y v la velocidad media de la colada.



Figura 2 Colada de lava de tipo aa del 15 de abril de 1980.
El cráter está a cerca de 200 m atrás del punto de observación.

Shaw (1972) basándose en la contribución de cada componente con respecto a E^* (energía de activación), ha reducido a cuatro el número de los coeficientes necesarios para computar la viscosidad de un líquido silicático. Además, ha calculado un quinto parámetro relativo al H_2O presente en el liquidus.

Es conocido (Shaw, 1972) que, para líquidos silicáticos, la viscosidad puede ser aproximada con la relación de Arrhenius:

$$\eta = A \exp (E^*/RT) \quad (2)$$

donde A es la constante preexponencial, E^* la energía de activación, R la constante de los gases y T la temperatura absoluta.

La ecuación (2) puede ser expresada en la forma:

$$\ln \eta = \ln A (E^*/R) (1/T) \quad (3)$$

de modo que para T tendiente a infinito $\ln \eta = \ln A$, representaría un coeficiente de viscosidad mínimo.

La ecuación (3) puede ser vista como una línea recta sobre un diagrama $\ln \eta$ vs. $1/T$, el coeficiente angular (s) de la cual es:

$$s = \frac{\Delta \ln \eta}{\Delta 1/T} \quad (4)$$

Los diagramas de Arrhenius ($\ln \eta$ vs $10^4/T$) (cfr. Shaw, 1972. Pp. 872-873) obtenidos con base en los datos sobre sistemas de líquidos silicáticos binarios determinados por Bottinga y Weill (1972), relativos a los varios óxidos en diferentes concentraciones molares de SiO_2 , permiten obtener la relación:

$$\ln \eta = s (10^4/T) - C_T s C_n \quad (5)$$

donde

$$E^* = 10^4 s R = 19.87 s \quad (\text{K cal mol}^{-1}) \quad (6)$$

$$\ln A = C_n - C_T s \quad (7)$$

C_n y C_T son respectivamente iguales a $-6,40$ y $1,50$. Estos valores representan las coordenadas del punto definido por la media de las intersecciones entre la recta de referencia de la sílice ($X_{\text{SiO}_2} = 1$) y las rectas representantes de los sistemas binarios de cada óxido en diferentes concentraciones molares de sílice.

Con base en los datos experimentales (Shaw, 1972. P. 886), se puede notar que aumentando el número de los constituyentes, disminuyen las desviaciones del comportamiento lineal en los diagramas de Arrhenius. Entonces, es posible, conociendo la composición química de una lava, aplicar este método, reduciendo el sistema a cinco componentes (Al_2O_3 , $\text{FeO} - \text{MgO}$, $\text{CaO} - \text{TiO}_2$, $\text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O} - \text{Li}_2\text{O}$, H_2O). El método es experimentalmente válido en el intervalo $0.4 X_{\text{SiO}_2} 0.8$.

Las características petroquímicas de las rocas del volcán Arenal muestran un valor de X_{SiO_2} comprendido en este intervalo, lo que permite la aplicación del método con base estadística.

Para el procedimiento de cómputo se envía nuevamente a Shaw (1972. Pp. 876-878). Ha sido calculado el valor medio del coeficiente angular de Arrhenius $S_m = 2,66$; con desviación standard = $0,06$, para nueve análisis químicos (Melson y Sáenz, 1973; Malavassi, 1979) de muestras de coladas relativas al decenio 1968-1978.

Aplicando la ecuación (5) para S_m se puede presentar la relación teórica obtenida sobre el diagrama $\ln \eta$ vs $10^4/T$ (Fig. 3).

Se nota que el comportamiento de la viscosidad teórica respecto a la temperatura, para las lavas del Arenal, entra en el campo de las andesitas basálticas. En particular, se aproxima a rocas de tipo basálticos (basalto del Columbia River).

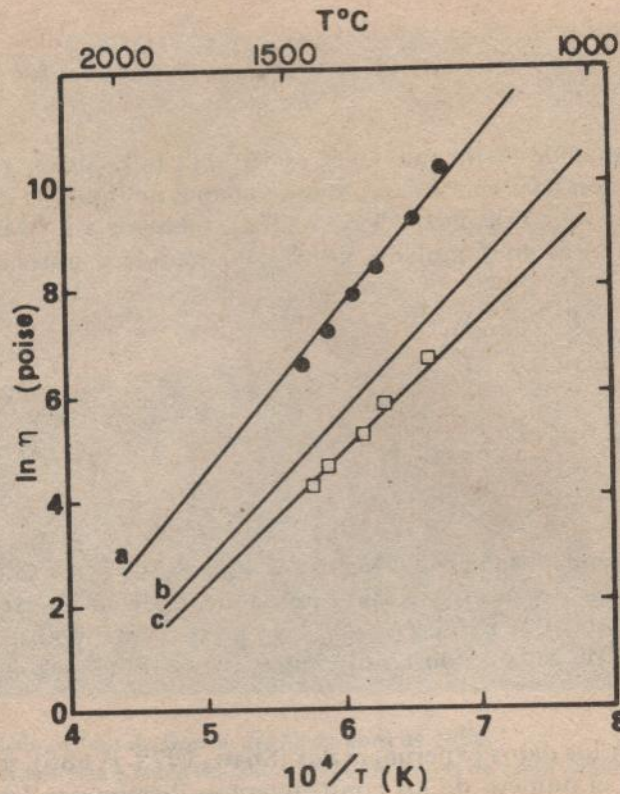


Figura 3 Línea recta que expresa el comportamiento teórico calculado (V. texto) para las lavas del Arenal (b) en el diagrama de Arrhenius ($\ln \eta$ vs. $10^4/T$) en comparación con la andesita del Monte Hood (a), y el basalto de Columbia River (c). Los puntos representan los datos experimentales (Murase y McBirney, 1970), mientras las líneas (a) y (c) han sido calculadas por Shaw (cfr. Shaw, 1972, P. 880).

Para la parte superior de la colada ($T = 1.020^\circ \text{C}$) se obtiene el siguiente coeficiente de viscosidad teórico:

$$\eta = (2,65 \pm 1,19) \times 10^4 \text{ poises} \quad (2)$$

De hecho, es muy probable que la parte interna de la colada tenga una temperatura bastante próxima a aquella del liquidus, o sea, aproximadamente, 1.150°C . Aplicando la ecuación (1) para esta misma temperatura se obtiene:

$$\eta = (4,04 \pm 1,59) \times 10^3 \text{ poises} \quad (3)$$

En la figura 4 se representan las variaciones de la viscosidad teórica, respecto a la concentración en sílice. Las rectas interpoladas, han sido obtenidas correlacionando los valores resultantes de la aplicación del método de Shaw para cada análisis a las temperaturas $T = 1.020^\circ \text{C}$ (Fig. 4B) y $T = 1.150^\circ \text{C}$ (Fig. 4A).

Es obvio que los coeficientes de viscosidad más altos, respectivamente,

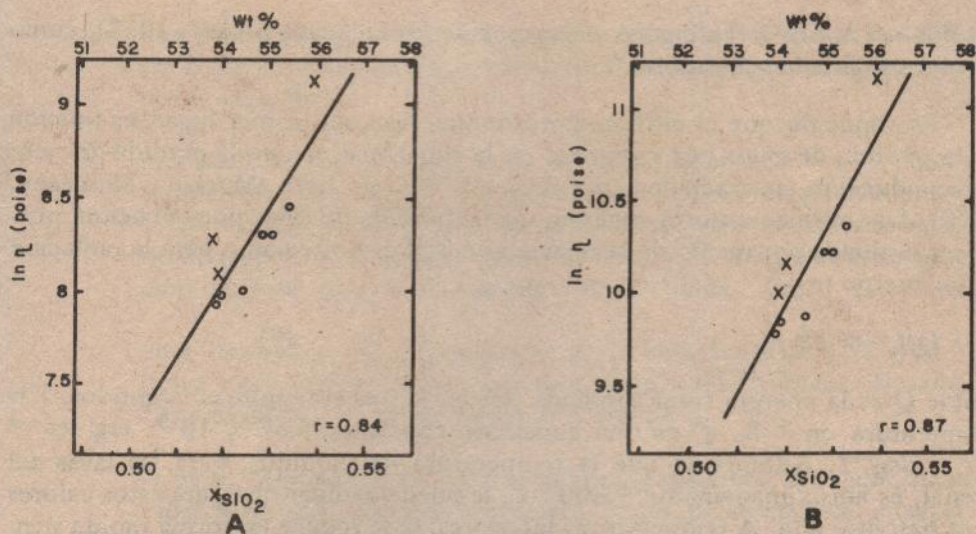


Figura 4 Variaciones de la viscosidad de las lavas del Volcán Arenal, calculada para cada análisis con el método propuesto por Shaw (1972) respectivamente a la temperatura $T=1.150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fig. 4A) y $T=1.020\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fig. 4B).
 Cruces: análisis 2-4, Melson y Sáenz. (1973). P. 433.
 Puntos: análisis E-J, Malavassi. (1979). P. 49.
 r = coeficiente de correlación.

$\ln \eta = 11,15$ y $\ln \eta = 9,16$, acompañados de un elevado contenido en sílice ($X_{\text{SiO}_2} = 0.54$), han sido obtenidos para una muestra de la colada de noviembre 1968 (Melson y Sáenz. 1973. Análisis 2. P. 433), o sea en el período inmediatamente posterior a la fase explosiva.

DISCUSION DE LOS DATOS

Por lo antes expuesto, las lavas del volcán Arenal muestran un comportamiento físico, relativo a la variación teórica de la viscosidad, en función de la temperatura, muy similar a aquellos de tipo basáltico de los márgenes continentales asociados a un magmatismo calcálico.

No obstante, las medidas de campo obtenidas cerca de 50 m del cráter, aplicando la relación de Jeffreys, determinan un coeficiente de viscosidad con un orden de magnitud de 10^4 y 10^5 , respectivamente, más altos que los valores teóricos obtenidos para la parte superior y la parte interna de la colada*.

Estos datos parecen confirmar, en parte, las consideraciones de Raccichini y Bennet (1977) que definieron las lavas del Arenal con base en observaciones

* Existen todavía perplejidades respecto al comportamiento de los iones Fe (Casertano y Luongo, 1968). Con base en observaciones cualitativas, los mismos autores sugieren que Fe 0 tiende a aumentar la viscosidad mientras Fe a disminuirla.

cualitativas sobre la extensión y espesor de las coladas (Walker, 1973), como "extraordinariamente viscosas".

Es conocido que el enfriamiento de una lava, en primer lugar, es función de la pérdida de calor por radiación en la superficie, siendo la pérdida de calor por conducción aproximadamente de 1 a 2° C cada hora (Murase y McBirney, 1970). Los mismos autores sugieren que la pérdida de calor por radiación, puede ser evaluada por medio de la relación de Stefan-Boltzmann, para la radiación de un cuerpo negro

$$Q/t = \sigma T^4 \quad (9)$$

donde Q es la energía total irradiada por cm², t es el tiempo en segundos, T la temperatura en ° K, σ es una constante con valor $5,67 \times 10^{-5}$ erg sec⁻¹ cm⁻² deg⁻⁴. Asumiendo que la temperatura del liquidus, para las lavas del Arenal, es aproximadamente 1.200° C, se puede deducir que para estos valores Q es bastante alta. A temperaturas inferiores, Q se reduce en forma rápida siendo el parámetro T elevado a la cuarta potencia.

Entonces, si se tiene una efusión de una colada a una temperatura próxima a aquella del liquidus, la pérdida de calor por radiación es muy elevada, determinando la formación de una costra sólida y conservando el interior fluido. Este mecanismo, está de acuerdo con el modelo propuesto por Raccichini y Bennett (1977), basado en observaciones cualitativas de la morfología y estructura de las coladas.

Además, parece justificar, en parte, el diferente valor de viscosidad obtenido con la relación de Jeffreys, porque ha sido medida la velocidad media aparente (parte superior de la colada) y no aquella efectiva (parte interior).

Esta todavía, no permitiría el aceptar los valores teóricos determinados con el método de Shaw, los cuales parecen demasiado bajos. En realidad, la cercanía de las dos líneas rectas b y c, en el diagrama de la figura 3, representan respectivamente las lavas del Arenal y el basalto del Columbia River, está relacionada únicamente con las características petroquímicas de las dos rocas. Las observaciones de campo contradicen comportamientos físicos similares; en el caso de los basaltos del Columbia River, existen coladas laminares que se extienden aproximadamente hasta los doscientos kilómetros con inclinaciones de 1 a 2 grados.

CONCLUSIONES

Con base en las consideraciones hechas parece lógico pensar que la explicación de las diferencias, ligadas al diverso comportamiento físico de los tipos de lava antes citados, deban ser investigados tomando en cuenta la estructura de las coladas y los caracteres petrológicos de las rocas.

La observación de coladas actuales y prehistóricas, nos permite definir un modelo cualitativo de sus estructuras. Nos parece que, en general, en una colada se pueden distinguir cuatro capas con diferentes propiedades reológicas:

- a. una costra superior muy fracturada e irregular de espesor variable entre 0,5-1 m. Este elemento estructural está transportado pasivamente por la capa B;
- b. una parte medio-superior (capa B) con espesor de 2 – 4 m y con una temperatura que, cerca del cráter, varía aproximadamente entre los 1.000–1.100° C. Este nivel estructural muestra una elevada vesicularidad (superior al 20 por ciento modal), que indicaría la concentración de fases gaseosas en esta parte de la colada.

Este fenómeno sería responsable de la baja densidad (2,2 g/cm³) y, junto a la variación de la temperatura, de la relativamente elevada viscosidad de la capa B con respecto a la capa C;

- c. la parte medio-inferior o parte interna (capa C) de la colada, tiene un espesor de 6-8 m y una temperatura que, posiblemente, alcanza los 1.150 ° C. En esta capa la densidad es mayor (2,7 g/cm³) por la ausencia de vesicularidad, mientras la viscosidad es menor, debido a una temperatura más alta. Estos dos factores, contribuyen a determinar una velocidad de flujo, relativamente más elevada; y
- d. la parte inferior o base de la colada tiene un espesor aproximado de 1 m y está generada por la caída del material de las partes superiores (capa A y B), a lo largo del frente de colada, según el mecanismo descrito por McDonald (1972. P. 86).

Esta unidad estructural, puede estar ausente o muy reducida en proximidad del cráter.

Parece muy interesante notar que, a la salida del cráter, las velocidades de las capas B y C, son las mismas y que se diferencian a lo largo de la pendiente. Este fenómeno, se debe a las variaciones en el tiempo de los parámetros de temperatura, viscosidad, densidad y espesor en las dos.

En particular, el estrato vesicular se comportaría como aislador térmico, manteniendo la parte interna a temperatura y velocidad de flujo más elevadas. En consecuencia, la capa B presentaría un movimiento propio, debido a la gravedad, y uno inducido por el flujo interior de la capa C.

Por lo tanto, las paredes laterales del canal de flujo, y en parte la capa B, se comportarían como estructuras de confinamiento dinámico, inhibiendo la distribución areal de las coladas.

Además, los análisis con microsonda electrónica de las lavas del Arenal muestran la existencia de una paragénesis, cuyas fases mineralógicas presentan un fenómeno de microdiferenciación entre los fenocristales (plagioclasa labradorítica-bitownítica, hipersteno, augita-olivino) y la matriz, que está constituida por microcristales de plagioclasa, piroxeno y un vidrio intersticial con quimismo riolítico (J. Tournon. Comunicación personal. 1980). Entonces, esta-

mos en presencia de un magma cuyas propiedades reológicas son muy diferentes con respecto al liquidus primario. De hecho, tenemos una lava constituida por una parte sólida (fenocristales) y una parte líquida con una cantidad de SiO₂ bastante elevada, lo que produciría un incremento muy marcado de la viscosidad.

Agradecemos al M. Sc. Eduardo Malavassi por habernos facilitado la consulta de sus datos patroquímicos de las lavas del Arenal; J. L. Cheminée por la instrumentación necesaria para las medidas de los datos de temperatura; L. Casertano; R. Chaves por la discusión crítica y sus valiosos consejos.

El presente trabajo se inserta en el proyecto de estudio de las características físico-químicas de los magmas de Costa Rica en el marco del Programa de Cooperación Técnica Italo-costarricense.

BIBLIOGRAFIA

- BOTTINGA, Y. y WEILL, D.F. (1972). *The viscosity of magmatic silicate liquids: a model for calculation. Am. Jour. Sci.* **272**. 438-475.
- CASERTANO, L. (1963). *Actividad del Volcán Villarica en el curso de este siglo*. Separada Bol. Univ. Chile. **40-41**. 1-16.
- CASERTANO, L. y LUONGO, G. (1968). *Coefficiente di viscosita del magma del vulcano Villarica*. Rel. XVIII Conv. Ass. Geof. It. publ. Atti Ass. Geof. It. 7-8-9 marzo.
- MALAVASSI, Eduardo. (1979). *Geology and Petrology of the Arenal Volcano*. Tesis (no publicada). Dept. Geology and Geophysics. Univ. of Hawaii. E.E. U.U.
- Mc DONALD, G.A. (1972). *Volcanoes*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, N.J. P. 510.
- MELSON, W.G. y SAENZ, R. (1973). *Volume, Energy and Cyclicity of Eruptions of Arenal Volcano, Costa Rica*. Bull. Vol. XXXVII-3. 416-437.
- MURASE, T. y Mc BIRNEY, A.R. (1970). *Viscosity of lunar lavas. Science* **167**. 1491-1493.
- SHAW, H.R. (1972). *Viscosities of magmatic silicates liquids an empirical method of prediction. Am. Jour. Sci.* **272**. 870-893.
- WALKER, G.P. (1973). *Lengths of lava flows*. Phil. Trans. Royal Soc. London. A **274**. 107-118.