

## Geovulcanología y morfología volcánica

### ASPECTOS MORFOMÉTRICOS DE LOS CONOS DE ESCORIA DE COSTA RICA

Uwe Martens

Centro Universitario del Norte CUNOR - Universidad de San Carlos de Guatemala  
u\_martens@yahoo.com

(Recibido 06/03/03; aceptado 14/07/03)

**ABSTRACT:** 33 pyroclastic cones in Costa Rica, were selected to study their morphometric characteristics. The regression obtained for the height and basal diameter ratio ( $H_{CO}/W_{CO}$ ) is 0.17, which is in good agreement with data obtained for cones located in other places of the world. The wide dispersion found is due to differences in the factors that control eruptions that originate pyroclastic cones: ejection velocity and angle, vent diameter, etc. The analysis of the top and basal diameter ratio ( $W_{CR}/W_{CO}$ ) and slope (S) enables the identification of several groups that broadly coincide with their position relative to the volcanic arc. Cones located in the arc constitute a heterogeneous group, in contrast to cones located as satellites in front of the arc and behind it. The former tend to have wider tops and steeper slopes than the latter. The cones in front of the arc have different sizes but a uniform  $W_{CR}/W_{CO}$  ratio. Back-arc cones possibly have been exposed to erosion for a longer period and are considered to be older.

Correlation between cone morphology and chemical composition has been found. Cones that contain more silica and less magnesium are higher. Those containing more alkaline and less ferrous materials tend to be steeper. It is proposed that the angle of repose in the growing course of the talus depends on the viscosity of the erupting material. Nevertheless, the regressions obtained indicate only a moderate correlation; the geochemistry is considered to be just one of several factors that control the final shape of scoria cones.

**Keywords:** Morphometry, scoria cones, Costa Rica, tectonics, volcanic arc, back-arc, geochemistry.

**RESUMEN:** Se seleccionaron 33 conos piroclásticos en Costa Rica, con el fin de estudiar sus características morfométricas. La regresión para el cociente entre la altura y el diámetro basal ( $H_{CO}/W_{CO}$ ) es 0,17 y coincide con los valores obtenidos para conos en otros lugares del mundo. La dispersión encontrada se explica por diferencias en la velocidad y ángulo de salida, diámetro de la apertura, etc. El análisis de la relación entre diámetros de cima y base ( $W_{CR}/W_{CO}$ ) y la pendiente (S) permiten la identificación de conjuntos que coinciden con la posición tectónica respecto al arco volcánico. Los conos del arco presentan características muy heterogéneas; los satélites al frente del arco y los conos tras el arco constituyen grupos homogéneos; los primeros tienden a tener cimas más amplias y pendientes mayores que los segundos. Los conos del tras-arco son más antiguos y han estado más tiempo expuestos a la erosión.

Se ha encontrado correlación entre la geoquímica y los parámetros morfológicos: Los conos constituidos por material más silíceo son más altos y aquellos con más álcalis y menos hierro son más empinados. Se propone que durante las fases de construcción de un cono, el ángulo de reposo depende de la viscosidad del material. No obstante, las regresiones obtenidas indican una correlación apenas moderada; la química sería solo uno de los varios factores que controlan la forma final de un cono de escoria.

**Palabras clave:** Morfometría, conos de escoria, Costa Rica, tectónica, arco volcánico, tras-arco, geoquímica.

## INTRODUCCIÓN

### Los conos de escoria

Los conos de escoria son volcanes monogenéticos formados, generalmente, por un único evento eruptivo que dura en promedio 30 días. El 90% de los conos cuya generación se ha presenciado, se formaron en menos de un año. Raramente, la erupción se extiende por unos cuantos años, como en el caso del cono Parícutín en México (Segerstrom, 1966), el Cerro Negro en Nicaragua (McKnight & Williams, 1997), o el cono de ceniza del volcán Irazú en Costa Rica (Alvarado, 1993).

Los conos de escoria son la geoforma volcánica más común sobre los continentes. Su tamaño es pequeño en comparación con volcanes en escudo y estratovolcanes. Su formación se da a partir de magmas de viscosidad relativamente baja, generalmente de composición basáltica, en erupciones de tipo estromboliano o hawaiano. La fragmentación frecuentemente es seca y se debe a la expansión y explosión de burbujas de gas dentro del magma, lo que los diferencia de otros tipos de estructuras piroclásticas, como maares y anillos de ceniza, en los que la fragmentación es freatomagmática (Vespermann & Schmincke, 2000). Los clastos siguen una trayectoria balística y se acumulan alrededor de una fuente central; de allí la forma en cono y la simetría. No obstante, hay muchos conos alargados que se han erigido en fisuras, dando paso, posteriormente, a la expulsión de material a través de un solo cráter (Breed, 1964). Es común que en la base de los conos, y subordinadamente intercalado, haya material freatomagmático. Los piroclastos que componen los conos son, en su gran mayoría, lapilli, bombas de escoria y fragmentos vesiculares de vidrio.

Si bien los conos de escoria son el producto más visible de muchas erupciones, solo representan una fracción menor del material eyectado por la fuente. La mayor parte sale como ceniza, la cual se erosiona fácilmente, y como coladas de lava, que se producen al final de la fase eruptiva (Wood, 1980a). La asociación de conos y coladas es muy común. Los conos cineríticos corrientemente se

presentan en los flancos de volcanes mayores o en conjuntos, también llamados campos, que pueden incluir hasta centenares de focos eruptivos. Los conos de un campo suelen tener tamaño y química similar (Alvarado, 1990).

### Morfometría de los conos de escoria

Uno de los trabajos pioneros en el que se estudiaron las relaciones cuantitativas entre parámetros morfométricos de conos de escoria fue el de Porter (1972). La notación de este autor se ha mantenido en trabajos subsecuentes, y también se emplea en éste. Los parámetros definidos son los siguientes (Fig. 1):

- $W_{CO}$ : Diámetro de la base; en la literatura se presenta como el promedio entre el diámetro máximo y mínimo. Datos mundiales indican que el diámetro varía entre ~0,25 y ~1,5 km, con una mediana de 0,8 km (Wood, 1980a).
- $W_{CR}$ : Diámetro del cráter; el promedio entre los diámetros máximo y mínimo.
- $H_{CO}$ : Altura del cono; diferencia entre la elevación promedio de la base y la elevación máxima.
- $S_{PROM}$ : Pendiente promedio del cono. Para conos con cráter es igual a:  $\arctan [2H_{CO}/(W_{CO} - W_{CR})]$ . Para conos sin cráter equivale simplemente a:  $\arctan [2H_{CO}/W_{CO}]$ .

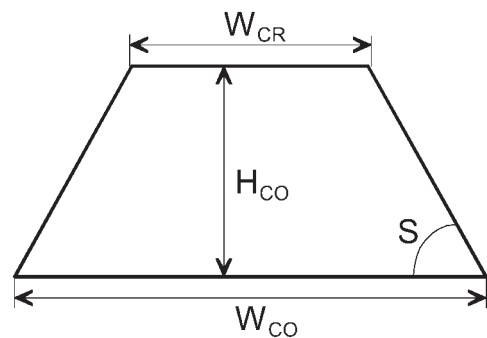


Fig. 1: Parámetros morfométricos de los conos de escoria.

Porter (1972) calculó regresiones entre parámetros para conos de Mauna Kea, Hawaii, con los siguientes resultados:

$$H_{co} = 0,18 W_{co} \text{ (30 conos).}$$

$$W_{cr} = 0,40 W_{co} \text{ (62 conos; más dispersión que en la ecuación anterior).}$$

Las mismas ecuaciones funcionan bien para otros conos frescos en el mundo, como los más de 900 descritos por Wood (1980a). En conos de escoria de Guatemala, Bemis (1995) obtuvo una relación entre el diámetro de base y la altura con tendencia similar; no obstante, la regresión para el diámetro de cráter como función del diámetro basal tiene una pendiente igual a 0,34. Efectivamente, existe un amplio espectro de combinaciones  $W_{CR}$  vs.  $W_{CO}$  en conos de escoria de diferentes lugares del mundo.

Vespermann & Schmincke (2000) recopilan los siguientes factores como controles de la morfología final de un cono de escoria: (a) volumen total de la erupción, (b) velocidad de salida del material, (c) ángulo de salida, (d) velocidad y dirección del viento, (e) naturaleza y tamaño de las partículas, (f) coladas de lava, (g) geometría y espaciamiento de aberturas de salida (cráteres). Poco se encuentra en la literatura sobre la relación entre la geoquímica de los conos y su forma, aunque Wood (1979), basado en información limitada, concluye que no hay relación entre una y otra.

McGetchin *et al.* (1974) plantean un crecimiento secuencial para los conos de escoria en el que identifican cuatro etapas principales. En la primera etapa la distribución de las bombas depende únicamente de su trayectoria balística. En la segunda etapa comienza la formación de un talus, ya que la pendiente del cono supera el ángulo de reposo del material. Durante la etapa tercera, el cráter disminuye de diámetro y el ángulo de reposo del material controla la inclinación de los flancos del talus. En la etapa cuarta el cono crece, aumentando su altura y su diámetro basal en iguales proporciones. La inclinación de los flancos permanece igual; la razón  $W_{CR}/W_{CO}$  permanece casi constante, aunque puede disminuir un poco.

Simulaciones computacionales (Dehn, 1987) confirman tal crecimiento por etapas, con diferencias menores en relación a la propuesta inicial, y predicen rangos en la morfología según se varían los parámetros de la simulación. La disparidad de formas en los conos de escoria de Guatemala se puede explicar satisfactoriamente por este hecho, esencialmente, por diferencias en las variables (b), (c) y (g), antes citadas (Bemis, 1995).

Resulta igualmente conocido que la forma de un cono se modifica con el tiempo. Para Wood (1980b) el cono tiene pendiente máxima al comienzo, cuando incluso material no consolidado hace parte de éste. Una vez que comienza la erosión, una parte del material del cono se erosiona y se deposita en sus alrededores, la pendiente disminuye y el cono se torna más redondeado. La degradación erosional de un cono depende en gran medida del tiempo que ha estado expuesto a los agentes erosivos, del clima y su grado de compactación, consolidación o soldamiento.

Es posible establecer una cronología relativa de conos pertenecientes a una misma zona con base en parámetros morfométricos. Efectivamente, se han hecho trabajos de esta naturaleza que han sido verificados satisfactoriamente con edades radiométricas (véase Scott y Trask, 1971; Bloomfield, 1975; Martin del Pozzo, 1982).

### Conos de escoria de Costa Rica

En Costa Rica se han identificado al menos 48 conos piroclásticos (Alvarado *et al.*, 2000). Se obtuvo la ubicación geográfica de 41 conos en hojas topográficas a escala 1:50 000 o en campo, según se consigna en el Cuadro 1 (no presenta la ubicación de los mares). La distribución de conos en relación al arco volcánico es (Fig. 2): 19 sobre el eje del arco, 8 como satélites al frente del arco, 2 aislados al frente del arco y 12 tras el arco.

Los conos del arco corresponden con conos cuspidales en los grandes volcanes (Rincón de la Vieja, Tenorio, Botos); éstos tradicionalmente han sido considerados conos piroclásticos por su tamaño relativamente pequeño (G. Alvarado,

Cuadro 1

Ubicación geográfica con respecto al arco volcánico  
de los conos de escoria y algunos cuspidales

Nombre del conjunto		Nombre del cono	Tipo	Centroide norte <sup>(1)</sup>	Centroide este <sup>(1)</sup>
POÁS	1	Botos	A	241,410	512,025
	2	Sabana Redonda 1	A		
	3	Sabana Redonda 2	A		
	4	Sabana Redonda 3	A		
	5	Sabana Redonda 4	A		
BARVA	6	Danta	A	237,175	525,940
	7	Cerro Gongolona	A	237,345	525,485
	8	Barva 1	A	234,800	524,740
	9	Barva 2	A	234,870	525,230
	10	Barva 3	A	235,630	526,430
	11	Barva 4	A	236,330	526,180
BOSQUE ALEGRE	12	Bosque Alegre	TA	253,585	513,160
RINCÓN DE LA VIEJA	13	Von Seebach	A	312,190	388,720
	14	Rincón de la Vieja	A	311,715	391,265
	15	Santa María	A	310,065	392,160
	16	Rincón 8	A	309,650	393,750
	17	Rincón 9	A	309,430	394,135
TENORIO	18	Tenorio	A	294,610	425,475
	19	Tenorio 2	A	295,000	424,675
AGUAS ZARCAS	20	Los Chiles	TA	271,070	499,040
	21	Loma Valle Hermoso	TA	269,880	499,650
	22	Loma Vuelta de Kopper	TA	268,370	499,850
	23	Loma Pital	TA	269,400	506,300
	24	Loma Barrantes	TA	266,550	502,790
	25	Loma Barrantes 2	TA	266,800	540,700
	26	Loma Juan Murillo	TA	262,770	500,360
	27	Loma Morera	TA	260,400	501,000
	28	Loma Buenos Aires	TA	262,200	503,000
	COROBICÍ	29	Corobicí	FA	275,000
CHOPO	30	Chopo	FA	272,600	419,800
AISLADOS TRAS-ARCO	31	Tortuguero	TA	285,160	587,910
	32	Mercedes	TA	328,290	497,850
TURRIALBA	33	Cerro Tiendilla	SFA	220,970	561,050
	34	El Armado	SFA	219,960	560,565
IRAZÚ	35	Noche Buena	A	217,005	553,710
	36	Gurdián	SFA	215,185	552,780
	37	Quemados 1	SFA	214,110	552,395
	38	Quemados 2	SFA	214,080	553,005
	39	Quemados 3	SFA	213,560	552,715
	40	Cervantes	SFA	212,895	552,210
	41	Cerro Pasquí	SFA	212,630	553,305

A = Arco; TA = Tras-arco; SFA = Satélite frente al arco; FA = Frente al arco.

<sup>(1)</sup> Coordenadas Lambert Costa Rica Norte



Fig. 2: Ubicación geográfica y tectónica de los conos piroclásticos de Costa Rica.

com. esc., 2003), aunque trabajos recientes (Boudon *et al.*, 1996; Soto, 1999), e incluso los resultados que se presentarán a continuación, sugieren que se trata de pequeños estratovolcanes. Se decidió dejarlos en el análisis de este trabajo, ya que como se verá, sus razones morfométricas son semejantes a las de conos de escoria, si bien su tamaño es un poco mayor.

En el arco también se encuentran conos de escoria parásitos desarrollados sobre fisuras (conjunto del Barva, conos de Sabana Redonda). Otros conos parásitos se ubican como satélites al frente del arco (conjuntos asociados a los volcanes Irazú y Turrialba). Tras el arco se ubican conjuntos aislados de conos de escoria (campo

de Aguas Zarcas) y un cono de escoria que se formó posteriormente al paroxismo explosivo que generó un maar (cono de Bosque Alegre en el maar Hule). En la misma posición tectónica aparecen dos conos cineríticos aislados: el Mercedes, ubicado en el límite entre Costa Rica y Nicaragua, y el Tortuguero, en el litoral Caribe. Frente al arco yacen dos conos de escoria como cerros aislados en el sector Pacífico de la cordillera de Guanacaste, cerca de Cañas (Chopo y Corobicí, también denominado Chopito).

## Objetivo y metodología

En el presente trabajo se pretende caracterizar la forma de los conos y comparar sus parámetros con aquellos de otras partes del mundo. Asimismo, se quiere determinar si hay alguna correlación entre la composición química del material y su forma.

Se digitalizaron en un sistema de información geográfica los contornos de 30 conos de escoria y 3 conos cuspidales que por su tamaño y forma se distinguen con claridad en mapas a escala 1:50 000. El contorno basal de los conos se identificó delimitando el cambio de pendiente. Sólo algunos conos muestran claramente delimitado su cráter en las hojas topográficas. Para éstos se obtuvo el contorno del cráter con una técnica similar a la usada para delimitar la base. Los perímetros obtenidos en general son irregulares. En el sistema de información se calculó el área basal y de la cima y luego se determinó el diámetro equivalente de un cono con iguales áreas que fuese completamente regular (Fig. 3). Este método es diferente al que han usado otros autores (Porter, 1972; Wood, 1980a), pues éstos midieron directamente los diámetros en conos arquetípicos, descartando en su análisis conos de perímetro irregular o alargado.

Bemis (1995) estima que el error en las medidas morfológicas de los conos de escoria de Guatemala que fueron llevadas a cabo sobre mapas topográficos a escala 1:50 000 son del orden de 50 – 100 m en medidas horizontales, y 10 – 20 m en las verticales; la estimación del volumen, por ende, tiene un error aproximado de

10%. Estas valoraciones son válidas también en este trabajo, ya que la escala de los mapas usados, la equidistancia de curvas de nivel y el tamaño de los conos son análogos.

Las indicaciones de cotas permitieron calcular la pendiente promedio de los conos. También se calculó la pendiente en el flanco más inclinado, ya que los conos tienden a redondearse con el tiempo. Finalmente, se obtuvo una aproximación

del volumen, calculado con los diámetros de base, cráter y la altura. A continuación se llevaron a cabo regresiones lineales para verificar la correlación entre el diámetro basal y la altura, el diámetro de base y de cráter y se describieron estadísticamente los datos de inclinación.

Se recopiló la información geoquímica existente para los conos; lamentablemente, sólo existe información para 12 conos.

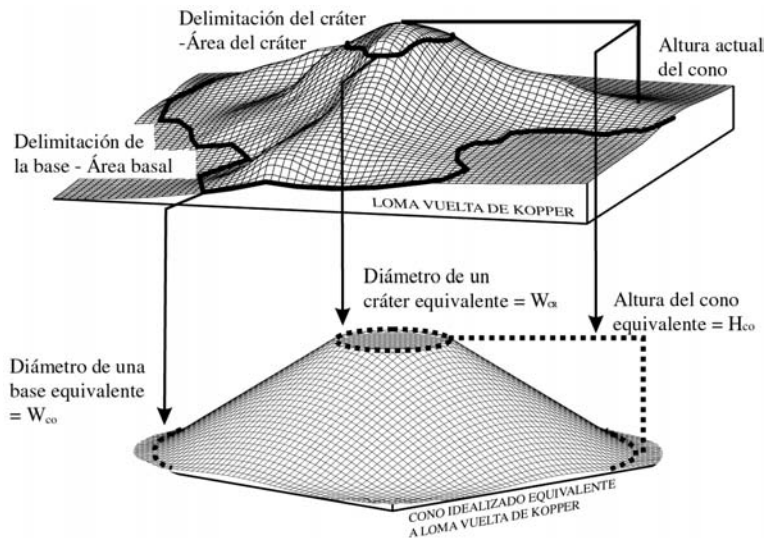


Fig. 3: Método de medidas morfométricas con base en conos de parámetros equivalentes.

## MORFOMETRÍA DE LOS CONOS DE ESCORIA DE COSTA RICA

### Correlación entre el diámetro basal y la elevación

Las medidas morfométricas obtenidas se resumen en el Cuadro 2. Su diámetro basal varía entre 285 y 1345 m, con una media de  $625 \pm 250$  m. El rango de alturas va de 45 a 215 m con un promedio igual a  $105 \pm 40$  m.

Como se esperaba, el gráfico para todos los conos (Fig. 4) muestra una tendencia general en la que aquellos de mayor diámetro son, a su vez, los más altos. Se interpoló una línea recta por el método de los mínimos cuadrados con intercepto igual a cero. Los puntos se ajustan

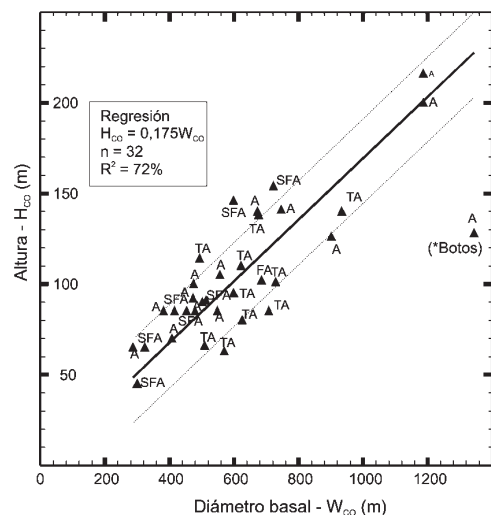


Fig. 4: Correlación entre la altura y el diámetro basal.



Cuadro 2

Medidas de los parámetros morfométricos  
de los conos de escoria y algunos cuspidales

Nombre del cono	Tipo	$W_{CO}$ (m)	$W_{CR}$ (m)	$H_{CO}$ (m)	$S_{Prom}$ (°)	Vol. ( $10^6 m^3$ )
Botos	A	1345	745	130	23	110
Danta	A	555	240	105	32	14
Cerro Gongolona	A	475	190	100	36	9,2
Barva 1	A	285	*	65	23	1,4
Barva 2	A	380	*	85	23	3,2
Barva 4	A	405	*	70	19	3,0
Bosque Alegre	TA	620	*	110	18	11
Von Seebach	A	745	265	140	29	31
Rincón de la Vieja	A	900	515	125	34	51
Santa María	A	1185	370	215	28	110
Rincón 8	A	480	210	85	31	8,3
Rincón 9	A	475	*	90	21	5,4
Tenorio	A	1185	355	200	28	100
Tenorio 2	A	550	*	85	18	6,7
Los Chiles	TA	675	265	145	22	26
Loma Valle Hermoso	TA	625	175	80	18	11
Loma Vuelta de Kopper	TA	935	240	140	19	42
Loma Barrantes	TA	560	165	95	24	12
Loma Juan Murillo	TA	570	150	65	24	7,1
Loma Morera	TA	730	180	100	28	19
Loma Buenos Aires	TA	510	*	65	22	4,0
Cerro Chopo	FA	685	155	100	26	16
Tortuguero	TA	495	105	115	37	9,1
Mercedes	TA	710	*	85	14	11
Cerro Tiendilla	SFA	515	*	90	22	6,3
El Armado	SFA	500	220	90	29	9,7
Noche Buena	A	675	200	140	27	23
Gurdián	SFA	600	*	145	28	14
Quemados 1	SFA	415	*	85	23	3,8
Quemados 2	SFA	300	*	45	17	1,1
Quemados 3	SFA	455	195	85	24	7,3
Cervantes	SFA	325	115	65	30	2,7
Cerro Pasquí	SFA	720	315	155	34	34

\* No es posible inferir un adecuado contorno del cráter

bien a una regresión lineal. No se tuvo en cuenta el punto correspondiente a la laguna Botos, ya que su forma dista considerablemente de la de otros. Este cono es muy particular ya que es notoriamente menos elevado y más ancho en su base.

La ecuación obtenida es  $H_{CO} = 0,175 * W_{CO}$ , que coincide satisfactoriamente con los cálculos de autores que estudiaron conos en otros lugares del mundo. Las regresiones de Porter (1972) y Wood (1980a) tienen pendiente igual a 0,18, en tanto que la de Bemis (1995) en

conos de Guatemala tiene pendiente 0,175 que es igual a la obtenida en Costa Rica. Las bandas de error corresponden al error estándar en la estimación de la altura que es igual a 21 m. El coeficiente de determinación  $R^2$  es 72%, indicando una correlación moderadamente buena entre las variables. No obstante, de la figura es claro que otro tipo de regresión no ayudaría a un mejor ajuste de los datos. Éstos simplemente presentan una alta dispersión indicando que el modelo lineal explica las observaciones de modo muy general.

### Correlación entre el diámetro basal y el diámetro del cráter

El diámetro del cráter de los conos varía entre 105 y 745 m y su promedio es  $255 \pm 145$  m. Este amplio rango se debe a que el cono Botos presenta un dato extremo en el conjunto, siendo su cráter mucho más ancho que el de los demás. El gráfico en el que se relacionan los diámetros basal y de cráter se presenta en la figura 5. No se pudo establecer adecuadamente el diámetro de algunos conos piroclásticos, y por ello sólo hay 21 puntos.

En la figura 5 se distinguen tres poblaciones: una conformada por dos conos cuspidales del arco (Botos y Rincón de la Vieja) cuyo diámetro de cráter es notoriamente mayor a los otros. Otro grupo lo conforman principalmente unos conos del arco y los satélites al frente de éste. El tercer conjunto está formado por los conos tras el arco, algunos del arco y uno al frente del arco. Teniendo en cuenta lo anterior, se interpolaron regresiones lineales por el método de mínimos cuadrados para el segundo y tercer grupo.

La regresión para el segundo conjunto se llevó a efecto con intercepto igual a cero. La ecuación resultante es  $W_{CR} = 0,41 * W_{CO}$ , que es similar a la obtenida por Wood (1980a) y Porter

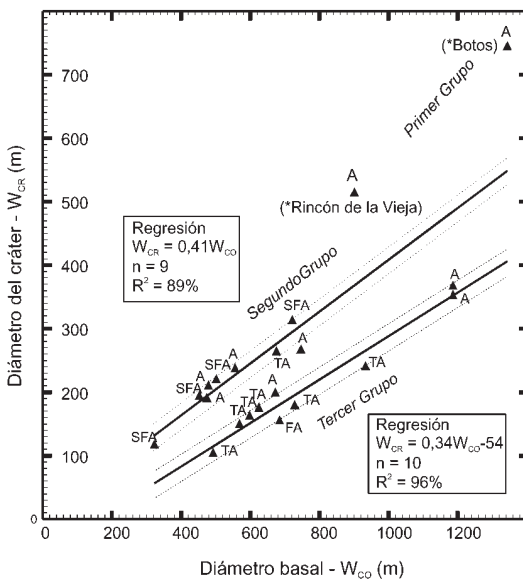


Fig. 5: Correlación entre el diámetro del cráter y el diámetro basal.

(1972) en conos de otros sitios del mundo. Para éstos, la pendiente de la regresión es 0,40. El ajuste de los puntos es muy bueno; el coeficiente de determinación  $R^2$  es 89%; el error estándar de la estimación del diámetro del cráter es apenas 20 m, lo cual se expresa gráficamente con las bandas de error punteadas.

Para el tercer conjunto se calculó una regresión lineal con término independiente distinto a cero, ya que es la mejor solución para un ajuste adecuado a las observaciones. La ecuación resultante es  $W_{CR} = 0,34 * W_{CO} - 54$ . El error estándar en la estimación del diámetro de los cráteres en esta regresión es 19 m, resultando en bandas de error muy semejantes a las obtenidas para el segundo grupo. El coeficiente de determinación  $R^2$  para este grupo es 96%, indicando una muy buena correlación entre los diámetros de base y de cráter.

### La pendiente de los conos

En la figura 6 se compendia un análisis de estadística descriptiva de la pendiente de los conos. En ésta se representan los valores máximo y mínimo con las líneas de los extremos, una estimación del intervalo de confianza del 67% (media  $\pm$  desviación estándar) centrado en la media con el rectángulo, y la mediana con una línea punteada.

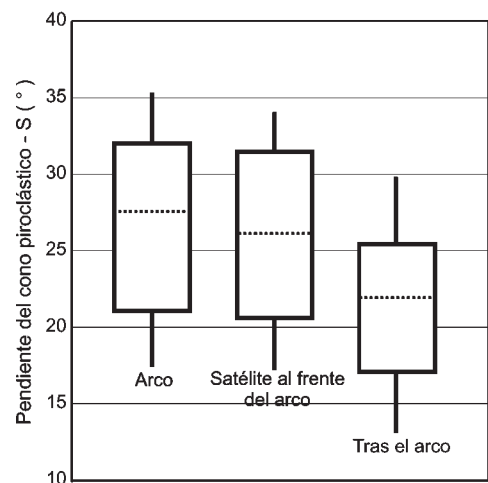


Fig. 6: Parámetros de estadística descriptiva de la pendiente de los conos de escoria según su posición tectónica.



La pendiente de los conos del arco varía entre 18 y 36°; su promedio es  $26 \pm 6^\circ$ ; la mediana igual a  $27,5^\circ$ , es un poco mayor que la media, indicando un leve sesgo en la distribución. Los conos satélite al frente del arco tienen un rango de pendientes entre 17 y 34°, con media  $26 \pm 5,5^\circ$  y mediana igual a  $26^\circ$ . En el análisis de la pendiente de los conos tras el arco se ha dejado de lado el Tortuguero, ya que éste presenta pendientes muy fuertes, cercanas a  $37^\circ$ , resultado del aprovechamiento de material que fue extraído en un tajo que funcionaba allí (G. Alvarado, com. esc., 2003). Así, el valor mínimo de los conos de tras-arco es  $15^\circ$ , el máximo  $28^\circ$ , la media  $21 \pm 7^\circ$  y la mediana  $22^\circ$ .

Es notable la similitud de la distribución de las inclinaciones para los conos del arco y sus satélites al frente. Resulta claro también que aquellos ubicados detrás del arco son menos empinados, salvo el caso particular del cono Tortuguero, cuya alta pendiente se debe a actividades antrópicas, como se explicó antes. Complementariamente se elaboró un gráfico de pendiente de los conos como función del diámetro basal (Fig. 7). Este gráfico no muestra tendencia alguna, sino una nube de puntos. Se descarta que exista correlación entre la pendiente de los conos y el diámetro de su base.

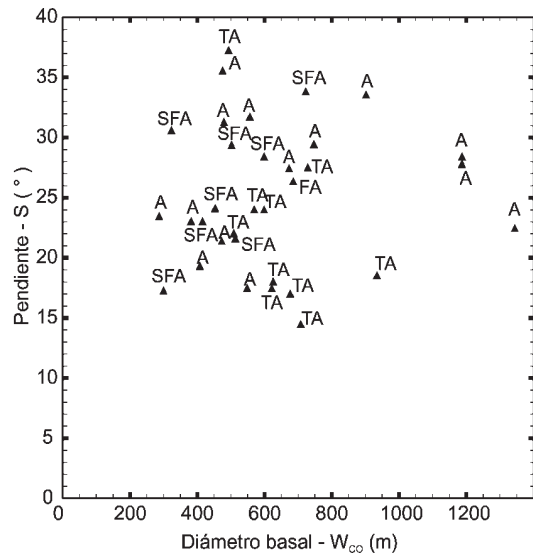


Fig. 7: Diagrama diámetro basal vs. pendiente.

### Correlación entre la geoquímica y la morfología

Con los 12 datos geoquímicos que se encontraron para conos piroclásticos de Costa Rica (Cuadro 3) se elaboró un diagrama TAS de clasificación de rocas volcánicas (Fig. 8) siguiendo a

Cuadro 3

Composición química de elementos mayores de roca total obtenidas en conos piroclásticos y algunos cuspidales

Nombre	Tipo	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>Tot</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total
Botos	A	51,63	0,83	18,70	10,09	0,17	5,45	9,85	2,29	0,97	0,18	100,17
Danta	A	57,78	0,79	16,51	6,68	0,12	4,34	6,96	3,21	2,31	0,28	98,98
Rincón de la Vieja	A	61,10	0,66	16,28	6,90	0,00	3,01	6,31	3,07	2,30	0,11	99,73
Tenorio	A	57,11	0,71	17,94	8,27	0,17	3,88	8,04	2,71	1,02	0,18	100,00
Los Chiles	TA	49,73	1,31	16,33	9,54	0,14	8,64	10,29	2,60	0,98	0,43	99,99
Loma Barrantes	TA	47,01	0,88	14,74	10,32	0,17	11,09	11,78	1,66	1,70	0,65	100,00
Loma Juan Murillo	TA	47,62	1,59	15,01	10,95	0,17	10,73	10,50	2,10	0,92	0,42	100,01
Loma Morera	TA	47,10	1,37	15,09	10,50	0,16	11,87	10,21	2,02	1,18	0,50	100,00
Loma Buenos Aires	TA	45,04	0,79	13,26	10,08	0,17	15,20	12,63	1,16	1,30	0,35	99,98
Chopo	FA	50,15	0,80	17,60	9,88	0,09	7,90	10,78	2,03	0,66	0,12	99,99
Tortuguero	TA	46,78	1,36	17,07	9,66	0,08	11,69	7,80	2,76	1,10	0,00	98,30
Cerro Pasquí	SFA	53,60	0,94	15,89	7,35	0,13	6,69	8,34	3,15	1,88	0,39	98,35

Fuentes: Alvarado, 1993; Alvarado & Carr, 1993; Carr *et al.*, 1989; Cigolini & Chaves, 1986; Gillot *et al.*, 1994; Kemper, 1997; Malavassi, 1991; Tourmon, 1972 y 1984

Le Maitre *et al.* (1989). Las rocas de los conos de escoria en la mayoría (7) son basaltos, una es una andesita basáltica y otra es una andesita. Dos conos cuspidales son andesíticos y uno es basáltico. Con los datos se construyeron gráficos que relacionan el contenido de elementos mayores con diferentes parámetros morfométricos:  $W_{CO}$ ,  $H_{CO}$ ,  $W_{CR}$ ,  $S$ ,  $H_{CO}/W_{CO}$ ,  $W_{CR}/W_{CO}$ . Debe anotarse que la información geoquímica es limitada y que los análisis químicos fueron realizados en diferentes laboratorios (véase la lista de referencias en el Cuadro 3). Un prototipo de los gráficos elaborados se presenta en la figura 9, donde se usa  $SiO_2$  como el componente químico.

De la figura 9 se denota que no existe correlación entre la geoquímica y la mayoría de parámetros morfométricos, salvo la altura y pendiente de los conos. En general, se obtienen nubes de puntos en las que no tiene sentido intentar una regresión matemática. Distribuciones de datos de este tipo se obtuvieron también con otros elementos, por ejemplo:  $MgO$ ,  $\#Mg$ ,  $Fe_{Total}$ ,  $Na_2O+K_2O$ ,  $MgO+Fe_{Total}$ .

También se verificó si existía relación entre la concentración de los elementos traza y los datos morfológicos. En ningún caso se notó correlación. Incluso la altura y la pendiente de los

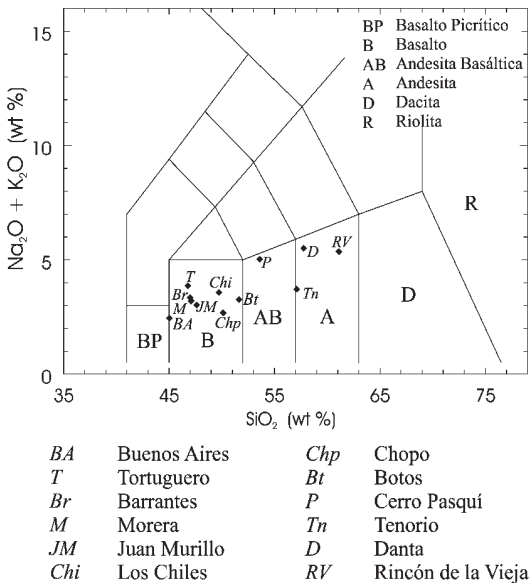


Fig. 8: Diagrama TAS de clasificación química de rocas volcánicas.

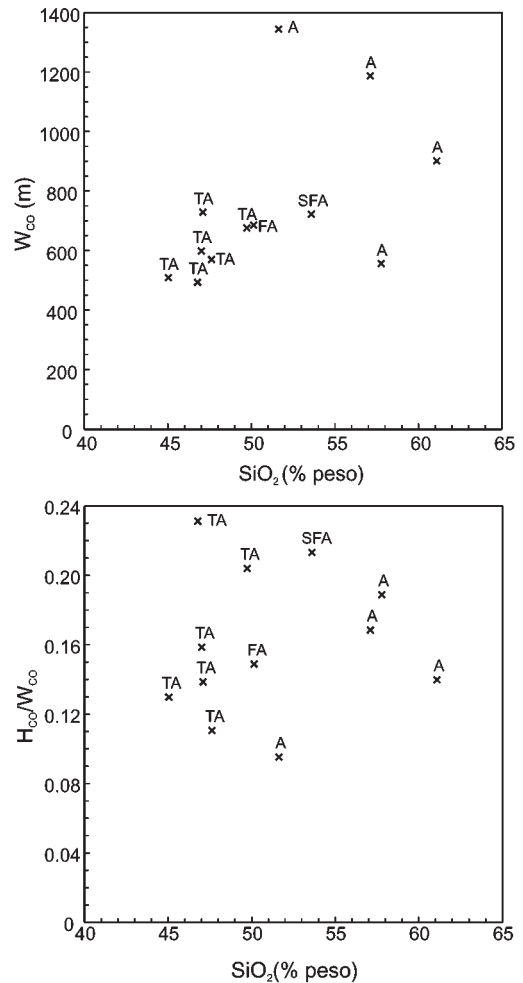


Fig. 9: Prototipos de gráficos elaborados para analizar la correlación entre la composición química y la morfometría de los conos.

conos, que muestran alguna tendencia en relación con algunos elementos mayores, no denotan correlación alguna con los elementos traza.

En las figuras 10 y 11 se presentan los únicos gráficos en donde se pudo advertir relación medianamente buena entre componentes químicos mayores y parámetros morfométricos. En efecto, los conos tienden a ser más altos en tanto más silíceos. Además, se nota que los conos más bajos son, a su vez, los que más  $MgO$  contienen. Por su parte los conos más empinados corresponden con los más alcalinos y pobres en hierro.

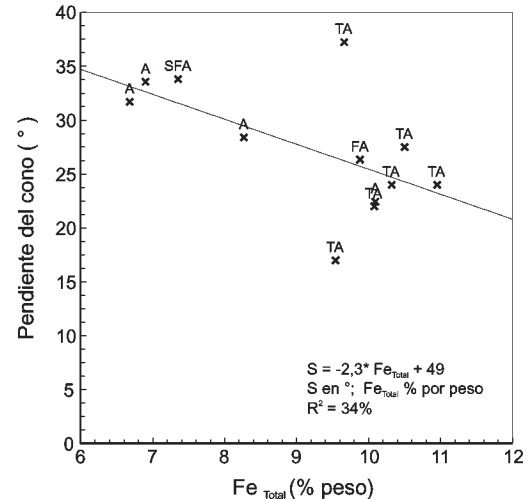
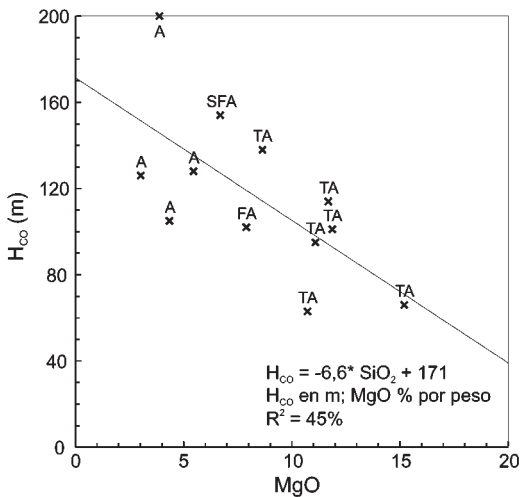
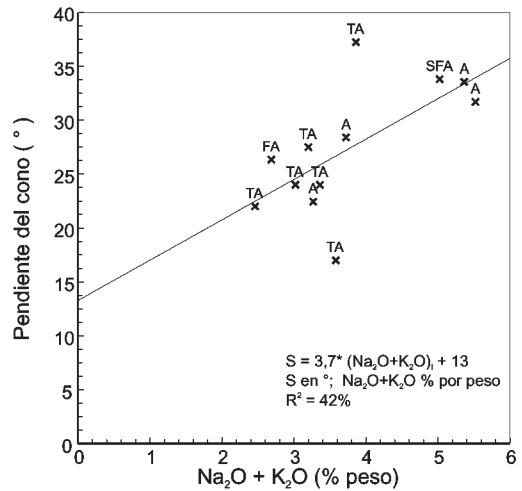
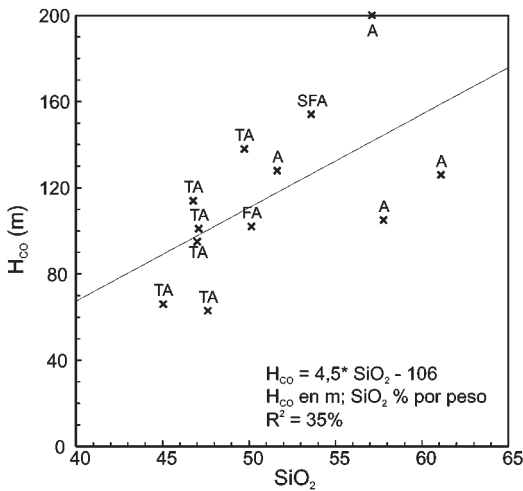


Fig. 10: Correlación entre la química de elementos mayores y la altura de los conos.

Fig. 11: Correlación entre la química de elementos mayores y la pendiente de los conos.

La ecuación obtenida en la regresión altura vs. sílice es  $H_{CO} = 4,5 * SiO_2 - 106$ , con un coeficiente de determinación pobre de 35%. Ello se debe a que los datos están dispersos alrededor de la línea de regresión y además están muy concentrados; nótese que el eje de  $SiO_2$  en la figura no comienza en cero. La regresión para  $MgO$  tiene ecuación igual a  $H_{CO} = -6,6 * SiO_2 + 171$ , con coeficiente de determinación  $R^2$  igual a 45%, un poco mejor que en el caso anterior.

La regresión para la pendiente en función de los álcalis es  $S = 3,7 * (Na_2O + K_2O) + 13$ , y el coeficiente de determinación es igual a 42%. El

ajuste de los datos es pobre. Para la regresión con correlación inversa entre el hierro y la pendiente se obtiene  $S = -2,3 * Fe_{Total} + 49$  y coeficiente de determinación igual a 34%. Las regresiones obtenidas tienen mucha dispersión y los ajustes son, a lo sumo, regulares.

## DISCUSIÓN

Se obtuvieron regresiones  $H_{CO}$  vs.  $W_{CO}$  muy semejantes a las calculadas en conos ubicados en otros lugares del mundo, con cocientes

$H_{CO}/W_{CO}$  entre 0,17 y 0,18. La alta dispersión en los datos implica la inexistencia de un cono cuya relación base – altura sea ideal o única. Hay un rango amplio de valores  $H_{CO}/W_{CO}$  que se pueden explicar, siguiendo la síntesis de Vespermann & Schmincke (2000), por diferencias en el estilo eruptivo: velocidad de salida de las partículas, diámetro de la apertura, volumen total de la erupción, etc. También cambios moderados en la composición geoquímica del material inciden en la forma final de los conos.

Otro factor que controla el rango de valores de altura y diámetro basal es la erosión. La propuesta de Wood (1980b), según la cual material de la cima se transporta a la base, explica en parte los conos por debajo de la línea de regresión  $H_{CO}$  vs.  $W_{CO}$ , ya que implica la disminución de la altura del cono y la ampliación de la base con el tiempo. Aquí es importante notar que el clima tropical húmedo que predomina en Costa Rica propicia esta erosión, a diferencia de los conos ubicados en zonas desérticas y que han sido motivo de algunos de los estudios previos (p.ej. Breed, 1964; Porter, 1972).

Los tres grupos identificados en el gráfico que relaciona el diámetro de base con el de la cima (o cráter) indican diferencias notables entre los conos de arco que, como conjunto, son muy heterogéneos. Por el contrario, los satélites al frente del arco y los del tras-arco forman grupos homogéneos distinguibles. Esta misma identificación es válida para el análisis de las pendientes. Efectivamente, hay diferencias en la morfología según la posición tectónica.

Dos conos de arco, el Botos y el Rincón de la Vieja, tienen cráteres muy amplios. Éstos, junto al Tenorio, parecen ser más bien pequeños conos compuestos (G.J. Soto, com. esc., 2003) con una cobertura posterior de piroclastos originados en cráteres actualmente activos y más recientes. Además, la geoquímica indica que los conos cuspidales Tenorio y Rincón de la Vieja son de composición andesítica, en tanto que la gran mayoría de conos de escoria son de composición basáltica. Estos factores explican parcialmente la heterogeneidad en el conjunto del arco. Además, debería determinarse qué mecanismo generó la gran amplitud del cono Botos, cuya

forma es diferente incluso a la de los otros dos conos cuspidales que aquí se tuvieron en cuenta.

El segundo grupo en el que  $W_{CR}/W_{CO} = 0,41$  y que coincide bien con los resultados de Wood (1980a) y Porter (1972), difiere de éstos por su baja dispersión. El tercer grupo, en el que la regresión obtenida es  $W_{CR} = 0,34*W_{CO} - 54$  contiene conos algo más amplios con cimas más pequeñas. Se propone que los dos grupos de conos han sido afectados distintamente por la erosión; obviamente el tercer grupo más que el segundo.

La etapa 4 que proponen McGetchin *et al.* (1974) durante el crecimiento de conos de escoria se caracteriza por la formación de un talus. Para esta etapa la razón  $W_{CR}/W_{CO}$  es casi constante o disminuye levemente a medida que aumentan  $W_{CO}$  y  $H_{CO}$  en proporciones semejantes. Ello se esboza en la figura 12a. Se plantea entonces que el grupo 2, en el que están la mayoría de conos satélite al frente del arco, está conformado por conos construidos durante erupciones en las que trascurrieron todas las etapas identificadas en su crecimiento (hay conos que sólo crecen hasta la etapa 2 ó 3, por ejemplo). Estos conos están relativamente frescos.

Como se denota en la figura 12b, el retroceso erosivo implica que llegue un momento en el que la cima tenga un área despreciable con relación a la base. Ello explica satisfactoriamente el término independiente en la ecuación obtenida para el grupo 3, ya que éste indica, al menos teóricamente, la existencia de conos con área de cráter igual a cero, cuando la base tiene un diámetro de ~160 m. Este grupo está conformado principalmente por conos del tras-arco y se interpreta como el conjunto más erodado. El análisis de pendientes confirma este resultado, ya que claramente los conos del tras-arco son menos inclinados. Así también, es muy factible que este conjunto sea el más antiguo, aunque es difícil decir qué tanto. El clima en Costa Rica propicia la meteorización y la erosión; la degradación de los conos piroclásticos puede ser mucho más rápida que en otros sitios.

Existe una correlación entre los parámetros morfométricos de un cono y la geoquímica del material que lo compone. La sílice y el contenido de MgO se correlacionan moderadamente

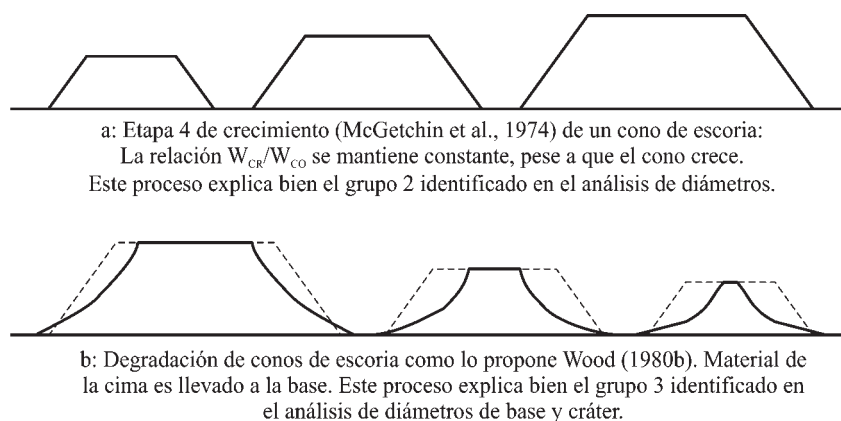


Fig. 12: Modelos de construcción y degradación de conos de escoria.

bien con la altura de los conos. Así también los álcalis y el  $Fe_{Total}$  con la pendiente. Si bien los conos de escoria en general son de composición basáltica, aquellos que tienden a ser más intermedios (más sílice y álcalis, menos ferromagnesianos) son más altos y empinados. No obstante, este resultado debe tomarse con cuidado ya que se fundamenta en pocos datos obtenidos en laboratorios diversos.

El modelo de McGetchin *et al.* (1974), y en general las simulaciones que se han hecho del crecimiento de un cono (Dehn, 1987; Bemis, 1995), suponen que el ángulo de reposo del material expulsado que sale del cráter de un cono piroclástico es  $33^\circ$ . La correlación entre la química y la forma podría indicar que el ángulo de reposo no es invariable, sino que es función de la viscosidad del material eyectado, la cual a su vez es controlada por el quimismo; la sílice y los álcalis son los que más contribuyen a que aumente la viscosidad (Shaw, 1969; Philpotts, 1990). Así, materiales un poco más ácidos y alcalinos podrían apilarse formando talus más empinados y determinando que, a un mismo volumen, un cono tenga mayor altura.

## CONCLUSIÓN

En este trabajo se han agrupado los conos cineríticos según su posición tectónica en relación al arco volcánico actual. Se distinguen diferencias

por grupo: (a) los conos del arco tienen morfología y química heterogéneas y posiblemente se formaron por procesos disímiles ya que algunos podrían ser pequeños estratovolcanes; (b) los conos satélite al frente del arco constituyen un grupo cuya morfología se explica bien por modelos de crecimiento de conos de escoria; (c) los conos del tras-arco son menos inclinados y más bajos; posiblemente se trate de conos más básicos o más erodados y antiguos.

En los conos de Costa Rica se encuentra buena correspondencia entre los diferentes parámetros morfométricos; las regresiones arrojan resultados semejantes a aquellos obtenidos en otras latitudes:  $H_{CO} = 0,175 W_{CO}$  para la gran mayoría de conos;  $W_{CR} = 0,41 W_{CO}$  y  $W_{CR} = 0,34 W_{CO} - 54$ , según los grupos identificados en el análisis. Las relaciones encontradas parecen funcionar a nivel mundial y no depender de factores endémicos del volcanismo de una región particular.

La morfología actual de un cono piroclástico es el resultado de las condiciones que controlaron su crecimiento (estilo eruptivo), los factores que han determinado su erosión y la química del magma. Se conoce bien la manera en que el estilo eruptivo controla la formación de un cono de escoria, al punto de poderse simular su crecimiento con herramientas informáticas. El tiempo transcurrido desde su formación y el clima tropical húmedo propician la erosión de los conos cineríticos. Por ello en Costa Rica su forma difiere notablemente de la forma corriente de "cono". Se

encontró una correlación moderada entre componentes químicos mayores y la morfología de los conos. Se propone que el ángulo de fricción interna del material eyectado es mayor en materiales más viscosos, es decir, más silíceos, alcalinos y menos ferromagnésicos; ello determina diferencias en la inclinación y la altura final de los conos de escoria. Sería muy provechoso examinar esta hipótesis en otras regiones donde los conos estén más frescos y realizando los análisis químicos homogéneamente en un mismo laboratorio.

### AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su gratitud a Guillermo E. Alvarado, quien propuso inicialmente este trabajo y lo asesoró en todas sus etapas. A Gerardo Soto por la fructífera discusión y la revisión del texto original. Se agradece la colaboración de Joanna Méndez y Marco Barahona en la recopilación de la información morfométrica y geoquímica. Asimismo se aprecian los comentarios que sobre el manuscrito hicieron José Ferretti, Sergio Morán, Juliana Estrada y Pedro Suárez.

### REFERENCIAS

- ALVARADO, G.E., 1990: Los relieves de las rocas ígneas: Génesis, clasificación y aplicabilidad. - 167 págs. Ed. Tecnológica de Costa Rica, Cartago.
- ALVARADO, G.E., 1993: Volcanology and petrology of Irazú volcano, Costa Rica. - 261 págs. Univ. Kiel, Alemania [Tesis Ph.D].
- ALVARADO, G.E., 2000: Volcanes de Costa Rica: geología, historia y riqueza natural. - 269 págs. EUNED, San José.
- ALVARADO, G.E. & CARR, M.J., 1993: The Platanar - Aguas Zarcas volcanic centers, Costa Rica: spatial - temporal association of Quaternary calc-alkaline and alkaline volcanism. - Bull. Volcanol. 55: 443 - 453
- ALVARADO, G.E., SIGARÁN, C. & PÉREZ, W., 2000: Vulcanismo, sus productos y geoformas. - En: DENYER, P. & KUSSMAUL, S. (comp.): Geología de Costa Rica. - Ed. Tecnológica de Costa Rica, Cartago: 133 - 154.
- BEMIS, K., 1995: A morphometric study of volcanoes in Guatemala, Iceland, the Snake river plain and the South Pacific. - 253 págs. State Univ. New Jersey [Tesis Ph.D].
- BLOOMFIELD, K., 1975: A late-Quaternary monogenetic volcano field in central México. - Geol. Rundsch. 64: 476-497.
- BOUDON, G., RANÇON, J.-P., KIEFFER, G., SOTO, G.J., TRAINÉAU, H. & ROSSIGNOL, J.-C., 1996: Les éruptions de 1966-70 et 1991-92 du volcan Rincón de la Vieja, Costa Rica: exemple d'activité récurrente d'un système hydromagmatique. - C. R. Acad. Sci. Paris, 322, IIa: 101-108.
- BREED, W.J., 1964: Morphology and lineation of cinder cones in the San Francisco Volcanic Field. - Mus. North. Ariz. Bull. 40: 65-71.
- CARR, M.J., FEIGENSON, M.D. & BENNETT, E.A., 1989: Incompatible element and isotopic evidence for the tectonic control of source mixing and melt extraction along the Central American volcanic belt. - 36 págs. [inédito].
- CIGOLINI, C. & CHAVES, R., 1986: Geological, petrochemical and metallogenic characteristics of the Costa Rican gold belt: contribution to new explorations. - Geol. Rundsch. 75(3): 737 - 754.
- DEHN, J., 1987: Model of cinder cone formation. - 118 págs. Arizona State Univ. [Tesis M.S.].
- GILLOT, P.-Y., CHIESA, S. & ALVARADO, G.E., 1994: Chronostratigraphy of upper Miocene-Quaternary volcanism in northern Costa Rica. - Rev. Geol. Amér. Central, 17: 45-53.
- KEMPTER, K., 1997: Geologic evolution of the Rincón de la Vieja volcanic complex, northwestern Costa Rica. - 159 págs., Univ. Texas at Austin [Tesis Ph.D].
- Le MAITRE, R.W., BATEMAN, P., DUDEK, A., KELLER, J., LAMEYRE Le BAS, M.J., SABINE, P.A., SCHMID, R., SORENSEN, H., STRECKEISEN, A., WOOLLEY, A.R. & ZANETTIN, B., 1989: A classification of igneous rocks and glossary of terms. - 193 págs., Blackwell, Oxford.
- MALAVASSI, E., 1991: Magma sources and crustal processes at the southern terminus of the Central American volcanic arc. - 435 págs. Univ. of California, [Tesis Ph.D].
- MARTIN DEL POZZO, A.L., 1982: Monogenetic volcanism in Sierra Chichináutzin, México. - Bull. Volcanol. 45: 9-24.



- McGETCHIN, T.R., SETTLE, M. & CHOUET, B.A., 1974: Cinder cone growth modeled after Northeast Crater, Mount Etna, Sicily. - *J. Geophys. Res.* 79: 3257 - 3272.
- McKNIGHT, S.B. & WILLIAMS, S.N., 1997: Old cinder cone or young composite volcano? The nature of Cerro Negro, Nicaragua. - *Geology*, 25(4): 339 - 342.
- PHILPOTTS, A.R., 1990: Principles of igneous and metamorphic petrology. - 498 págs., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- PORTER, S.C., 1972: Distribution, morphology and size frequency of cinder cones on Mauna Kea volcano, Hawaii. - *Geol. Soc. Am. Bull.* 83: 3607-3612.
- SEGERSTROM, K., 1966: Paricutin, 1965-Aftermath eruption. - *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 550-C: 93-101.
- SHAW, H.R., 1969: Rheology of basalt in the melting range. - *J. Petrol.* 10: 510-535.
- SCOTT, D.H. & TRASK, N.J., 1971: Geology of the Lunar Crater volcanic field, Nye County, NV. - *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 599-I: 1-22.
- SOTO, G.J., 1999: Mapa geológico de la hoja Poás, 1:50 000. - Instituto Costarricense de Electricidad: 1 hoja.
- TOURNON, J., 1972: Présence de basaltes alcalins récents au Costa Rica (Amérique Centrale). - *Bull. Volcanol.* 36 (1): 140-147.
- TOURNON, J., 1984: Magmatismes du Mésozoïque à l'actuel en Amérique Centrale. L'exemple de Costa Rica, des ophiolites aux andésites. - 335 págs. Univ. Pierre et Marie Curie, Paris [Tesis Ph.D].
- VESPERMANN, D. & SCHMINCKE, H.-U., 2000: Scoria cones and tuff rings. En: SIGURDSSON, H. (ed.): *Encyclopedia of volcanoes*. - Academic Press: 683 - 694.
- WOOD, C.A., 1979: Monogenetic volcanoes of the terrestrial planets. - *Proc. Lunar Sci. Conf.* 10th: 2815 - 2840.
- WOOD, C. A., 1980a: Morphometric evolution of cinder cones. - *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 7: 387-413.
- WOOD, C.A., 1980b: Morphometric analysis of cinder cone degradation. - *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 8: 137-160.