

Diagrama Ti - V: una nueva propuesta de discriminación para magmas básicos en cinco ambientes tectónicos

Manuel Vasconcelos-F., Surendra P. Verma^{*}, y R. Carmen Vargas-B.

*Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México,
Priv. Xochicalco S/No., Col. Centro, Ap. Postal 34, Temixco, Mor.62580, México*

**e-mail: spv@cie.unam.mx*

RESUMEN

Se presentan diagramas de discriminación para magmas básicos (basaltos normativos en hiperstena, basaltos normativos en nefelina, y traquiandesitas basálticas normativas en nefelina), que tienen por objeto el distinguir entre cinco diferentes ambientes tectónicos: arco continental (AC); arco de isla (AI); rift (Rt); isla oceánica (IO) y basaltos de cresta mesoceánica (MOR); con base en los datos de elementos Ti y V en un gran número de muestras representativas de ambientes conocidos. Estos datos han sido extraídos de 121 artículos publicados en revistas internacionales. Shervais (1982) propuso este tipo de diagrama usando como líneas discriminantes valores iguales de la relación $(Ti/1,000)/V$, la cual se demuestra ser poco efectiva y probablemente inválida para la discriminación tectonomagmática. En esta nueva propuesta, se han creado estas líneas de acuerdo con las tendencias marcadas y los campos ocupados por los contenidos de Ti y V en un gran número de rocas de los sitios tectónicos estudiados. Se presentan las coordenadas de estas líneas para una fácil reproducción por los usuarios potenciales. Como ejemplo y con base en el número de muestras que caen en un campo determinado, se puede señalar que se espera un éxito de cerca de 99% para la identificación de los ambientes tectónicos de AC y AI en relación con los de Rt e IO. Por otra parte, los ambientes de AC, AI y MOR presentan un área significativa de traslape. Con el objeto de validar estas nuevas fronteras de discriminación, se aplicaron los nuevos diagramas a muestras de distintos lugares con ambiente tectónico previamente conocido por otros estudios. Estos nuevos diagramas se emplearon con éxito para inferir el ambiente tectónico para una serie de muestras provenientes de diversos sitios con ambiente tectónico complejo o no definido. Para usar estos nuevos diagramas, es importante que se emplee la metodología señalada en el presente trabajo; para ello, se podría solicitar el programa de CIPW con ajuste de fierro en Fortran para DOS o el programa SINCLAS en VisualBasic compatible para Windows a uno de los autores (S. P. Verma: spv@cie.unam.mx).

Palabras clave: diagramas de discriminación, ambiente tectónico, norma CIPW, rocas básicas.

ABSTRACT

We present new discrimination diagrams using Ti and V for basic magmas (hy-normative basalts, ne-normative basalts, and ne-normative basaltic trachyandesites), in which our aim was to distinguish between five different tectonic settings: continental arc (AC; arco continental); island arc (AI; arco de isla); rift (Rt), ocean island (IO; isla oceánica); y mid-ocean ridge (MOR). The database, on which this new proposal is based, was established from analytical data presented in 121 articles from international journals. Shervais (1982) proposed this kind of diagram using discrimination lines with equal values of the ratio $(Ti/1,000)/V$, but it is shown here to be inadequate for tectonomagmatic discrimination of basaltic magmas. In this new Ti - V diagram, we have proposed the discrimination lines on the basis of the tendencies and the fields occupied by the samples representing the different tectonic settings. We also present coordinates of these lines for an easy

reproduction of the new discrimination diagrams by potential users. As an example, one can observe that 99% of the samples from arcs fall in the field of AC and AI, which implies a great success in discriminating AC and AI from Rt and IO. On the other hand, there is a significant overlap between AC, AI and MOR fields. These diagrams have been validated using data for samples from several different sites with known tectonic settings. Finally, these new diagrams have been used to infer the tectonic settings of a series of rocks from tectonically complex or undefined areas. It is important to note that the use of these new diagrams requires that the proposed methodology be strictly followed, especially in calculating Fe_2O_3/FeO according to rock types before CIPW norm computations. A Fortran program for DOS or a VisualBasic program (SINCLAS) for Windows to perform this adjustment easily and correctly is available from one of the authors (S. P. Verma: spv@cie.unam.mx).

Keywords: discrimination diagrams, tectonic environment, CIPW norm, basic rocks.

INTRODUCCIÓN

En los últimos 30 años, la abundancia de elementos mayores y traza en rocas ha sido utilizada para inferir el ambiente tectónico en las que se originaron. En la geoquímica de rocas volcánicas, los pioneros en este tipo de investigación fueron Pearce y Cann (1973) al crear diagramas de discriminación tectonomagmática, basados en datos de diferentes tipos de sitios tectónicos. Después de ellos, muchos autores han creado y propuesto más diagramas de discriminación, como son: Pearce *et al.* (1977), Wood (1980), Shervais (1982), Mullen (1983), Meschede (1986), Verma (1994, 2000), Vasconcelos-F. *et al.* (1998), entre otros.

Basado en un estudio de la variación de los coeficientes de partición cristal/líquido para vanadio, Shervais (1982) creó un diagrama para discriminar ambientes tectónicos en rocas ígneas recientes y en secuencias ofiolíticas. Además del vanadio, Shervais usó el titanio para la construcción de este diagrama, debido a sus características como un elemento poco móvil en condiciones de alteración. Para proponer las fronteras de discriminación en este diagrama, Shervais (1982) se basó en los criterios de coeficientes de partición, donde la relación Ti/V fue empleada para limitar los campos de los ambientes tectónicos bajo estudio. Sin embargo, él reconoció que estas relaciones no son suficientes para definir el ambiente tectónico de una roca volcánica. En su trabajo del diagrama Ti/1000 – V, Shervais (1982) aportó datos interesantes acerca del comportamiento de Ti y V en distintos ambientes tectónicos, pero no describió si los datos de Ti deben ser recalculados al 100% antes de ser graficados; tampoco especificó la definición de distintos tipos de rocas, como son basaltos, toleitas de arco, o basaltos alcalinos. En algunos casos, cuando el contenido de hierro sea muy bajo (< 1%) y la suma de los óxidos sin los volátiles sea cerca de 100, estos ajustes no causarán una diferencia significativa. Sin embargo, en la mayoría de los casos y para el tipo de rocas que están bajo consideración (rocas básicas), las diferencias en las concentraciones de los elementos mayores, con o sin el ajuste de hierro y al 100%, serán significativas. Por lo tanto, debe-

rá ser indispensable asegurar el tipo de roca adecuadamente antes de usar este diagrama.

Generalmente, el hierro se determina como hierro total, y rara vez como Fe_2O_3 y FeO , siendo las dos formas de oxidación en las cuales este elemento se presenta en las rocas. Por lo tanto, para el manejo de datos de elementos mayores se acostumbra llevar acabo ajustes de hierro (por ejemplo, relación de Fe_2O_3/FeO según Middlemost, 1989, o según la ecuación de Le Maitre, 1976, o algún otro método) y la suma de todos los elementos mayores al 100% en base seca (o sea, sin volátiles). Uno de los elementos de la gráfica (Ti) es un elemento mayor. En consecuencia, la concentración de este elemento va a variar, dependiendo de si o no se hace el ajuste de hierro y al 100%. Esto podría causar diferencias significativas en la aplicación del diagrama de discriminación Ti–V. Los efectos sobre la norma CIPW y el tipo de rocas, utilizando diferentes programas de cómputo, han sido señalados por Middlemost (1989) y recientemente por Verma *et al.* (2002). Estos hechos hacen difícil el uso correcto del diagrama de Shervais (1982) para la discriminación tectonomagmática.

En una reseña, Wang y Glover (1992) presentaron una evaluación de los diagramas empleados más frecuentemente. Sin embargo, ni el empleo ni las evaluaciones fueron totalmente objetivos, dado que los respectivos autores no siempre mencionan haber cumplido, en sus muestras a probar, con las condiciones originales. Las dificultades para una correcta aplicación de los diagramas de discriminación se deben a que las condiciones de uso no fueron presentadas por los respectivos autores (ver por ejemplo, Verma, 1996, 1997).

La tendencia marcada por las abundancias de Ti y V en muestras de los sitios tectónicos estudiados podría ser un mejor criterio de discriminación que las líneas de equivalentes utilizados por Shervais (1982). Por lo tanto, se propone nuevamente este diagrama de discriminación, pero ahora las líneas que separan a los distintos ambientes tectónicos han sido dibujadas de acuerdo con las tendencias en los contenidos de Ti y V de las muestras en cada ambiente tectónico. Así mismo, se señala una metodología para usar adecuadamente este nuevo diagrama.

Esta propuesta de discriminación tectonomagmática se presenta no tanto por la necesidad de crear más diagramas (según algunos autores ya hay demasiados), sino porque, en muchas de las gráficas propuestas anteriormente, no se ha clarificado cómo deben ser usadas. Además, el diagrama de Shervais (1982) carece de fronteras de discriminación adecuadas, ya que las líneas de equivalores (Ti/V) no discriminan satisfactoriamente los diversos ambientes tectónicos (Verma, 2000).

En este trabajo, se presentan diagramas para aquellas rocas básicas que son representativas de los cinco ambientes bajo estudio: arco continental (AC), arco de isla (AI), *rift* (Rt), isla oceánica (IO), y basaltos de cresta mesoocéánica (MOR). Estas rocas son: los dos tipos de basaltos (uno normativo en hiperstena: B-*hy* y otro en nefelina: B-*ne*), y traquiandesitas basálticas con normatividad en nefelina (BTA-*ne*). Cabe mencionar que anteriormente se habían presentado algunos nuevos diagramas (Rodríguez-G. et al., 1996; Vasconcelos-F. et al., 1996; Verma y Vasconcelos-F., 1997), en los cuales los campos para basaltos de cuatro ambientes tectónicos eran cerrados. En esos diagramas no se incluyeron datos del ambiente de crestas oceánicas. Actualmente, los campos se presentan con líneas de discriminación y sus coordenadas son fáciles de reproducir, como se demuestra en las secciones de “Validación” y “Aplicación”.

Breve descripción de la metodología

A continuación se muestra una breve descripción de la metodología para la construcción de estos nuevos diagramas basados en los elementos Ti y V, así como las condiciones para seleccionar los análisis geoquímicos usados para establecer la base de datos correspondiente.

Para construir esta base de datos, se emplearon 121 artículos publicados en revistas internacionales. Los ambientes tectónicos que se discriminan son: arco continental (AC), arco de isla (AI), *rift* o rompimiento cortical (Rt), isla oceánica (IO), y cresta mesoocéánica (MOR). Los sitios tectónicos para representar estos ambientes son lugares con tectónica bien definida, lo cual fue una condición importante de los trabajos seleccionados para la presente compilación. Así mismo, las muestras compiladas reflejan menor participación de procesos magmáticos de diferenciación, dado que se emplearon muestras con un contenido máximo de 53% de SiO₂. Los elementos mayores fueron recalculados al 100% en base seca con ajuste de Fe (relación Fe₂O₃/FeO) según Middlemost (1989) y capturados ya ajustados para clasificar la roca de acuerdo al diagrama TAS (total de álcalis – sílice; Le Bas et al., 1986). Estos cálculos, como también el de la norma CIPW, se realizaron mediante el programa Norma CIPW (Verma y Navarro-L., 1993), el cual arroja los resultados de la normatividad de la roca en nefelina (*ne*) o hiperstena (*hy*), siendo de especial interés esta subdivisión en el presente trabajo. Cabe destacar que existen otros programas que calculan esta norma, como

el Hardrock de Till (1977), de Fears (1985; este último siendo una modificación del anterior), de Verma et al. (1986), o el paquete geoquímico Igp_{et} o Newpet. Sin embargo, ninguno de estos programas incluye la corrección de hierro recomendada por Middlemost (1989). Esta propuesta para la corrección de la relación Fe₂O₃/FeO está basada en una compilación mundial de miles de datos de rocas volcánicas, y por lo tanto, debe ser utilizada. Recomendamos el uso del programa Norma CIPW de Verma y Navarro-L. (1993) o el programa nuevo totalmente modificado, llamado SINCLAS, versión para Windows, de Verma et al. (2002). Aunque para aquellos interesados en usar estos nuevos diagramas, ambos programas están disponibles (favor de solicitar a S. P. Verma), recomendamos el uso del nuevo programa para Windows.

La Tabla 1 muestra las localidades, número total de muestras recopiladas según su normatividad, así como las referencias de los artículos correspondientes compilados en la base de datos para proponer los nuevos diagramas. La Tabla 2 contiene esta misma información para las muestras de validación y de aplicación. La Figura 1 presenta los números de localización (# Loc) de todas las muestras, tanto las que fueron utilizadas para la propuesta de los diagramas de discriminación Ti-V como para la validación y aplicación de estos nuevos diagramas. Estos números corresponden a los (# Loc) incluidos en las Tablas 1 y 2. Las referencias de la base de datos de estas tablas se encuentran en el Apéndice 1 (ver el suplemento electrónico 18-2-01, en la página web <http://satori.unicit.unam.mx/RMCG.htm>).

Comportamiento del Ti y V en procesos magmáticos

Las diferencias en la abundancia de elementos químicos en los ambientes tectónicos son la base para la discriminación tectonomagmática. Por ejemplo, el vanadio se comporta en una forma compleja, debido a sus distintos estados de oxidación (V⁺³, V⁺⁴, V⁺⁵ y en ocasiones V⁺⁶), el cual es muy dependiente de la fugacidad de O₂ y de la petrología del sistema, siendo los coeficientes de partición de V > 1 a bajas fugacidades y < 1 a altas. Aunque el V es consistentemente más incompatible, especialmente en MOR, puede presentar tendencias compatibles en ciertos ambientes tectónicos como IO, especialmente a bajos valores de #Mg (Doe, 1997). En cambio, Ti sólo existe en la forma Ti⁺⁴. Las variaciones de las concentraciones de V, relativas a las de Ti, actúan como una medida de la actividad del O₂ en un magma y de los procesos de cristalización fraccionada que puedan haber ocurrido. Estos parámetros pueden ser ligados al ambiente tectónico y ser usados como base de discriminación, aunque existen grandes discrepancias y debates en relación con el estado de oxidación del interior de la Tierra (Arculus, 1985; Christie et al., 1986; Carmichael, 1991; Rollinson, 1993). La restricción a contenidos de SiO₂ < 53% en el presente trabajo ayuda a disminuir los

Tabla 1. Localidad, número y referencias de las muestras usadas para los diagramas de discriminación.

# Loc	Localidad	Número de muestras		Referencia
		<i>hy</i>	<i>ne</i>	
ARCOS CONTINENTALES				
1	América Central	71	9	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]
2	Andes, Chile	25	6	[9, 10, 11, 12, 13]
3	Patagonia	6	10	[14]
ARCOS DE ISLA				
4	Islas Aleutianas, Alaska	82	7	[15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]
5	Las Antillas, Caribe	26	19	[23, 24, 25, 26, 27]
6	Islas South Shetland, Antártica	6		[28, 29]
7	Islas Sandwich, Antártica	48		[30]
8	Islas Eólicas, Italia	12		[31, 32]
9	Indonesia, Arco de Sunda	27	84	[33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41]
10	Tonga-Kermadec	26		[42, 43]
11	Islas Vanuatu	22	15	[44, 45]
12	Papua Nueva Guinea	10	5	[46, 47]
13	Arco de Luzon, Filipinas	60	5	[48, 49]
14	Islas Marianas	6		[50, 51]
15	Arco de Izu Bonin	17	1	[52]
16	Japón	6	3	[53, 54, 55, 56]
RIFTS				
17	New Mexico, Arizona, Cordillera, E.U.	35	28	[57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64]
18	Baja California, México	3	12	[65]
19	Macizo Central, Francia	2	26	[66]
20	Línea Camerún	2	2	[67, 68]
21	Etiopía	16	6	[69, 70]
22	Zaire	2	25	[71, 72]
23	Sudan		39	[73]
24	Kenya y Uganda	9	45	[74, 75]
25	Djibouti	21	28	[76]
26	Arabia Saudita	14	38	[77]
27	Este de China	19	66	[78, 79, 80, 81, 82, 83]
ISLAS OCEÁNICAS				
28	Hawaii	148	80	[84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92]
29	Islas Marquesas	49	24	[93]
30	Islas Galápagos	2	1	[94]
31	Islas Sociedad y Polinesia Francesa	28	151	[95, 96, 97, 98]
32	Ascensión y Santa Helena, Oc. Atlántico	10	27	[99]
33	Isla Kerguelen	8	18	[100, 101, 102]
34	Islas Samoa	14	58	[103]
35	Juan de Fuca	56		[104]
36	Cresta Gorda	3		[105]
37	Cresta del Pacífico Este (EPR)	3		[105]

Tabla 1. (Continuación)

# Loc	Localidad	Número de muestras		Referencia
		<i>hy</i>	<i>ne</i>	
MOR				
38	Triple Unión (EPR)*	4		[106]
39	EPR (6-30° S)	12		[107]
40	EPR (23°5' S)	12		[108]
41	Triple Unión (EPR) **	6		[106]
42	Cresta de Chile	23		[109]
43	Cresta de Mohs	8		[110]
44	Cresta del Atlántico (MAR)	8		[111]
45	MAR (66.51-71.33° N)	26		[111]
46	MAR (54.25-63.57° N)	41		[111]
47	MAR (52.33-52.66° N)	4		[111]
48	MAR (28.88-52.01° N)	82		[111]
49	MAR (28-34° N)	5		[105]
50	MAR (22-25° N)	29		[112]
51	MAR (10-24° N)	85		[113]
52	MAR (10-17° N)	8		[114]
53	MAR (10.62-14° N)	13		[115]
54	MAR (54.5-51° S)	38		[116]
55	Zona de Fractura Conrad	12		[117]
56	Cresta Central Índica	4		[118]
57	Triple Unión (Cresta Índica)	11		[119]
58	Cresta Sudoeste Índica	10		[120]
59	Cresta Sudeste Índica	12		[121]

Abreviaciones: # Loc = Número de localidad en la Figura 1; *hy* = normatividad en hiperstena; *ne* = normatividad en nefelina; * = Triple Unión Pacífico-Cocos-Galápagos; ** = Triple Unión Pacífico-Nazca-Galápagos; EPR = *East Pacific Rise*; MAR = *Mid-Atlantic Ridge*. Las referencias pueden ser consultadas en el suplemento electrónico 18-2-01 publicado en la página web: <http://satori.unicit.unam.mx/RMCG.htm>.

efectos de los procesos de diferenciación, como la cristalización fraccionada, en las concentraciones de los elementos Ti y V en las muestras compiladas.

Efectos de alteración en Ti y V

Después de emplazamiento de una roca, la concentración de los elementos químicos puede ser afectada por diversos factores, como intemperismo, alteración por agua marina o metamorfismo. Estos procesos tienen como consecuencia un aumento o disminución de las concentraciones de elementos en una roca. Muchos estudios se han realizado con el fin de explicar los efectos de la alteración o el metamorfismo en la distribución de Ti

y V en las rocas volcánicas.

Según Staudigel y Hart (1983), el titanio se encuentra entre los elementos poco móviles a los efectos de alteración submarina. Sin embargo, Hart (1970) encontró que el contenido de titanio puede disminuir hasta en ~50% de su concentración original durante la alteración submarina a contenidos de 5% en peso de agua. Por otra parte, Hynes (1980) concluyó que el titanio puede ser movilizadado por fluidos carbonatados. Frey *et al.* (1974) encontraron que cualquier efecto hidrotermal sobre la concentración de vanadio queda dentro de las incertidumbres analíticas, o sea, V se comporta como un elemento poco móvil. Los cambios notorios que se pueden detectar en la alteración de Ti y V, pueden ocurrir durante la palagonitización de los bordes de vidrio de

Tabla 2. Lugares, número y referencias de las muestras de validación y aplicación.

# Loc	Localidad	Número de Muestras		Referencia
		<i>hy</i>	<i>ne</i>	
VALIDACIÓN				
DSDP				
60	Cuenca Shikoku y Daito	8		[122]
61-63	Golfo de California	93		[123]
64-66	Golfo de California	186		[124]
67	Golfo de California	12		[125]
68-69	Placa del Pacífico	36		[126]
70-71	Placa de Nazca	5		[126]
72-74	Placa de Nazca	21		[127]
75	Atlántico Norte Central	53		[128]
76	Atlántico Sur	32		[129]
ARCOS DE ISLA				
77	Islas Senkaku, Japón	14		[130]
78	Nueva Hebridias		7	[131]
RIFTS				
79	Argelia		2	[132]
80	Israel		4	[133]
APLICACIÓN (AMBIENTE NO DEFINIDO)				
81	Australia	9		[134]
82	Turquía		9	[135]
83	México (SCN)	3		[136]
84	México (San)	1	1	[137]
85	México (Col)	2		[138]

Abreviaciones: # Loc = Número de localidad en la Figura 1; SCN = Sierra de Chichinautzin; San = Área Sanganguey, Nayarit; Col = Área Colima. Las referencias pueden ser consultadas en el suplemento electrónico 18-2-01 publicado en la página web: <http://satori.unicit.unam.mx/RMCG.htm>.

las lavas almohadilladas, donde las abundancias de Ti y V disminuyen hasta en ~50% comparado con las muestras frescas (Shervais, 1982; Thompson, 1973). Según Shervais (1982) en la mayoría de los casos el comportamiento del Ti y V es coherente durante la alteración y la relación Ti/V resulta ser casi la misma tanto en rocas alteradas, como en rocas frescas. Bajo estas condiciones, Shervais (1982) propuso equivalentes de Ti/V como discriminantes para distintos ambientes tectónicos. Algunos autores (por ejemplo, Nicollet y Andrianbololona, 1980; Weaver y Tarney, 1981) sugirieron que Ti y V son relativamente poco móviles en condiciones de metamorfismo en las facies de anfibolita y granulita, y que ambos parecen ser estables en un amplio intervalo de temperaturas durante el metamorfismo de piso oceánico y regional.

RESULTADOS

De acuerdo con la base de datos compilados (Figura 1, Tabla 1), se han propuesto dos diagramas para basaltos (normativos en *hy* y *ne* respectivamente) y uno

para BTA (normativas en *ne*), para la discriminación tectonomagmática de cinco ambientes.

Diagrama para basaltos

El diagrama Ti/1,000 – V para basaltos con normatividad en *hy* (B-*hy*) se ha dividido en cinco partes (Figuras 2 a 4), con el objeto de contar con una mejor visualización de las muestras y de los campos de los distintos ambientes tectónicos. En la Figura 2a, se puede observar la totalidad de las muestras usadas en el diagrama. Dado el gran número de muestras de basaltos en este diagrama, no se presentan las fronteras de discriminación propuestas en este trabajo, sino que se reproducen aquí las líneas de equivalentes de Shervais (1982), las cuales obedecen las relaciones de $(Ti/1,000)/V = 10, 20, 50, \text{ y } 100$. Estas líneas fueron propuestas por Shervais (1982) para discriminar entre magmas de distintos ambientes tectónicos, empleando la relación de 20 como límite para toleitas de arco, de 20 a 50 para las crestas oceánicas, y de 50 a 100 para basaltos de islas oceánicas y basaltos alcalinos.

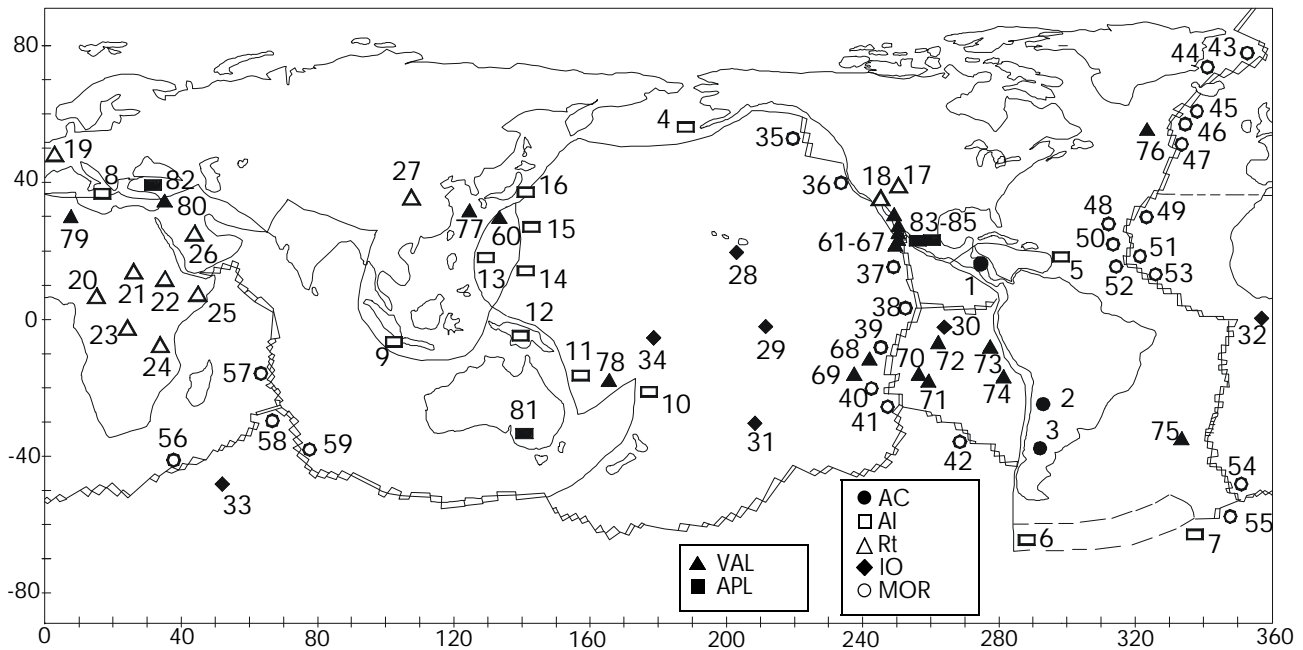


Figura 1. Mapa tectónico con la localización de los lugares donde se tomaron los datos de las muestras compiladas en este trabajo. Las abreviaciones son: AC = Arco Continental; AI = Arco de Isla; Rt = *Rift*; IO = Isla Oceánica; MOR = Cresta mesoceánica; VAL = Muestras de Validación y APL = Muestras de Aplicación. La explicación de las numeraciones de los sitios se presenta en la Tabla 1, y las de VAL y APL en la Tabla 2.

Como se puede observar en la Figura 2a, estas líneas equivalentes no llegan a discriminar los ambientes mencionados.

Las líneas de discriminación que se proponen en este trabajo y que separan los ambientes de AC y AI de Rt e IO (Figura 2b), abarcan casi la totalidad de las muestras de estos ambientes, con la excepción de tres muestras (que representan escasamente el 0.66% de los datos compilados, lo cual significa un éxito de cerca de 99% para la identificación de los ambientes tectónicos de AC y AI en relación con Rt e IO). Sin embargo, este campo (AC y AI) tiene un traslape con el ambiente de MOR en la parte central del área (Figura 3a). Aunque la razón fundamental de este traslape no es totalmente conocida, se puede asumir que las fuentes de MOR representan un componente de las fuentes de los arcos (tanto continentales como de islas), siendo estas últimas seguramente más complejas. Por otra parte, un mayor traslape entre el campo de MOR y AC que entre el MOR y AI puede deberse a los efectos de interacción de la corteza continental para los magmas de AC sobrepuestos a los magmas primarios.

Las crestas oceánicas ocupan un campo amplio en este diagrama (Figura 3a). Se proponen nuevas líneas de discriminación para este ambiente a partir del campo en que caen la mayoría de las muestras, dado que solamente 12 muestras (aproximadamente 2.3% del total) están fuera del campo señalado, 9 de ellas en el campo de Rt e IO y 3 en el de AC y AI. Sin embargo, se observa un marcado traslape entre AC y AI con MOR, donde se propone

un campo de traslape para estos tres ambientes, dejando solamente la parte superior derecha de MOR libre de un traslape con otros ambientes, en la cual se presentan 18.8% de las muestras de este ambiente. De esta manera, se define un campo combinado de AC, AI y MOR, y otro exclusivo de AC y AI.

Las concentraciones de Ti en los basaltos de Rt e IO son en general más altas que para los otros ambientes, y por lo tanto, estas rocas ocupan la parte derecha del diagrama (Figura 3b). Dado que ambos ambientes (Rt e IO) son de fuentes similares (al igual que AC y AI lo son entre sí), no es posible evitar un marcado traslape entre ellos. Por otra parte, solamente tres muestras (0.75% del total) de Rt quedan fuera, aunque muy cerca, de la línea propuesta para estos ambientes (Figura 3b). Las líneas de discriminación para los cinco ambientes se presentan en la Figura 4, junto con las coordenadas de todas las líneas de discriminación para su fácil reproducción. Se puede señalar que la discriminación de AC y AI con respecto a Rt e IO es casi perfecta con cerca de 99% de probabilidad de éxito.

En general, la discriminación en este diagrama es buena, principalmente entre los AC y AI de los Rt e IO, mientras el ambiente de MOR mantiene un campo libre de traslape en la parte superior del diagrama. La eficiente discriminación entre el ambiente de AC y los ambientes de Rt e IO (Figura 4) es importante, como se verá en la aplicación de este diagrama para algunos basaltos (Mioceno tardío - Reciente) del Cinturón Volcánico Mexicano.

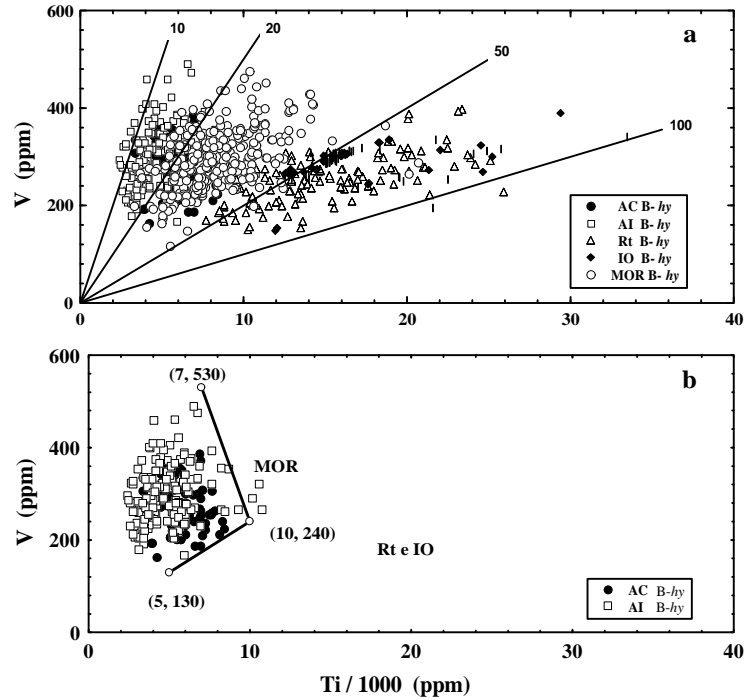


Figura 2. Diagrama de discriminación Ti/1000 – V para basaltos normativos en hiperstena (B-hy). a) Total de muestras usadas para crear este nuevo diagrama; las líneas trazadas son las de equivalentes usadas por Shervais (1982) para discriminar entre toleitas de arco, basaltos de crestas oceánicas (MOR), basaltos de islas oceánicas (IO) y basaltos alcalinos. b) Muestras de basaltos normativos en *hy* de los ambientes de AC y AI; las líneas trazadas, con sus respectivas coordenadas, representan los límites de los campos de discriminación para estos basaltos en conjunto con otros ambientes (MOR, Rt e IO).

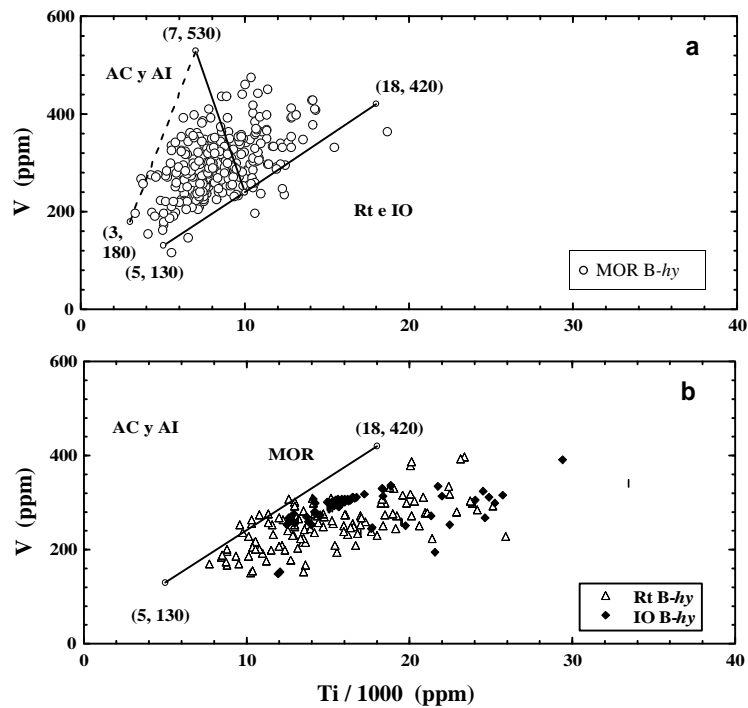


Figura 3. Diagrama de discriminación Ti/1000 – V para basaltos normativos en hiperstena (B-hy). a) Muestras de MOR; solamente una parte del área trazada para los MOR es libre de traslape con AC y AI; la parte derecha de la línea punteada representa el área de traslape entre AC, AI y MOR, estando la parte izquierda de esta línea el campo de AC y AI; b) Muestras de Rt e IO, la línea de discriminación separa estos dos ambientes (a la derecha de la línea) y los de AC, AI y MOR (a la izquierda de la línea).

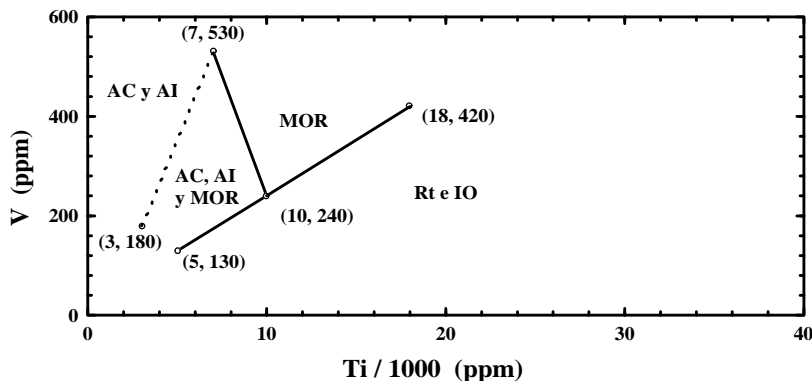


Figura 4. Diagrama de discriminación Ti/1000 – V para basaltos normativos en hiperstena (B-*hy*), señalando las líneas de discriminación propuestas en el presente trabajo junto con sus coordenadas. Las abreviaciones de los ambientes se encuentran en la explicación de la Figura 1.

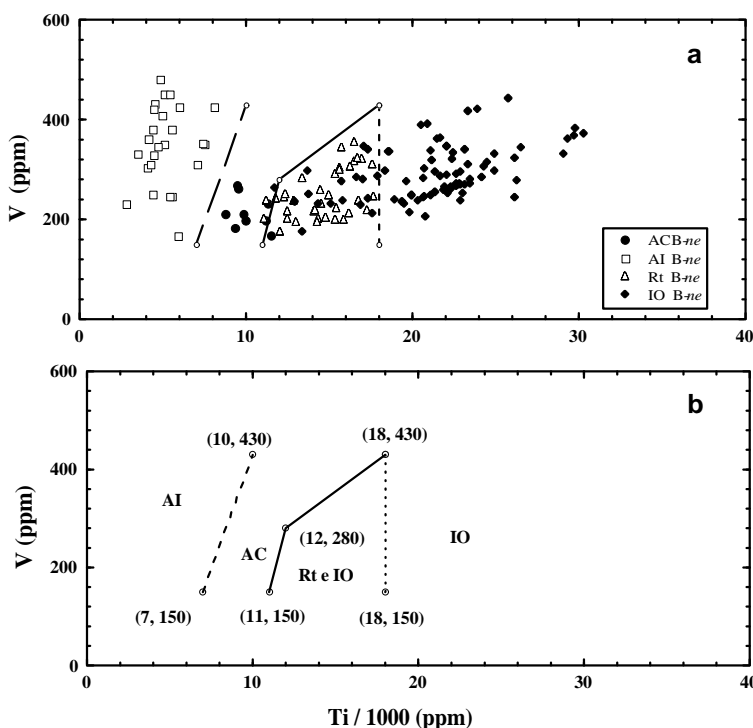


Figura 5. Diagramas de discriminación Ti/1000 – V para basaltos normativos en nefelina (B-*ne*). a) Muestras de basaltos de cuatro ambientes tectónicos (AC, AI, Rt, e IO), a partir de los cuales se desarrollaron las líneas y campos de discriminación para cada uno. b) Las líneas y campos de discriminación trazados para cada ambiente, así como las coordenadas correspondientes.

En las Figuras 5a y 5b se presentan el diagrama Ti/1000 – V para basaltos con normatividad en *ne* (B-*ne*). Sin embargo, no se reporta el ambiente de MOR por no contar con basaltos con esta normatividad compilados en nuestra base de datos. La discriminación para este tipo de roca es muy buena, ya que las muestras de AC (Figura 5a) se encuentran separadas de las de AI. Estas últimas (AC) se ubican en la parte izquierda del diagrama. Las muestras de Rt e IO en esta base de datos son más numerosas que los otros ambientes (AC y AI) y se discriminan efectivamente (Figura 5a). Las coordenadas de cada línea de discriminación (Figura 5b) permitirán

un fácil uso de este diagrama para la discriminación de los ambientes Rt e IO de los de AC y AI, para los basaltos normativos en nefelina.

Diagramas para traquiandesitas basálticas

Otro tipo de roca para el cual se propone un diagrama de discriminación es la traquiandesita basáltica (BTA-*ne*). A pesar de que la cantidad de datos para este tipo de rocas es considerablemente menor que la de los basaltos, las concentraciones de Ti y V sirven para dis-

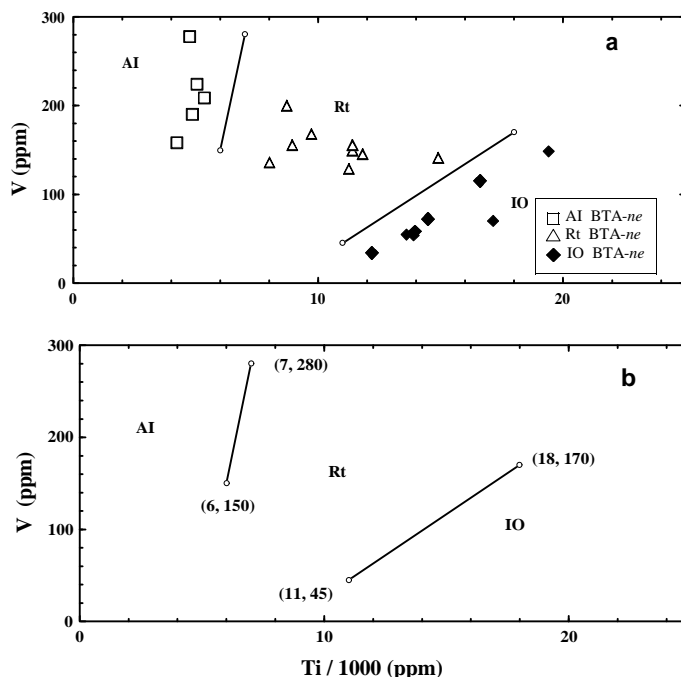


Figura 6. Diagrama de discriminación para las traquandesitas basálticas normativas en nefelina (BTA-*ne*). a) Muestras de BTA de tres ambientes tectónicos (AI, Rt, e IO), así como las líneas propuestas que están trazadas según las tendencias de las muestras. b) Líneas de discriminación para los tres ambientes y sus respectivas coordenadas.

criminar entre los ambientes de AI, Rt, e IO (Figura 6). No se presentan datos de AC (Figura 6a), debido a que no se cuenta con muestras de BTA para este ambiente en nuestra base de datos, a pesar de que esta base es bastante representativa del mundo (Figura 1 y Tabla 1). En la Figura 6a, se observa una buena discriminación entre los tres ambientes, los cuales se encuentran completamente separados. En la Figura 6b, se presentan las líneas de discriminación trazadas de acuerdo con las tendencias marcadas por las muestras.

VALIDACIÓN

Para comprobar que los diagramas de discriminación propuestos en este artículo son válidos, se capturaron nuevos datos geoquímicos de basaltos de diferentes sitios no incluidos en la base original (ver sitios VAL en la Figura 1; Tabla 2). Estos sitios incluyen muestras de dos ambientes bien definidos: cresta oceánica alterada, DSDP (*Deep Sea Drilling Project*) como una forma de validar el campo para MOR, AI, y Rt (para estos últimos con muestras de edad Cenozoica).

En la Figura 7, para la validación con muestras de DSDP, se observa que la mayoría de las muestras compiladas cae en el área de traslape de MOR con AC y AI, así como en el área exclusiva de MOR, aunque unas cuantas (aproximadamente el 2.9% del total) se ubican en el campo de Rt e IO. En la Figura 8a, se presenta el

diagrama de validación para basaltos con normatividad en *hy*. La mayoría de las muestras de Japón (AI) se sitúa en el campo de traslape entre AC, AI y MOR, lo cual es consistente con su ambiente de AI previamente definido, aunque no es distinguible de los ambientes de AC y MOR. La Figura 8b presenta el diagrama para basaltos con normatividad en *ne*, donde las muestras caen en los campos esperados, tanto las de Nueva Hébrides (AI), como las de Israel en el campo de Rt e IO. Las muestras de Argelia se ubican en el campo de IO, lo cual es consistente con su ambiente de Rt, dado que las fuentes para estos dos ambientes son muy parecidas.

APLICACIÓN

Con el objeto de demostrar la fácil aplicación de estos nuevos diagramas, se compilaron datos de basaltos del Terciario tardío (Mioceno tardío al Reciente) de sitios con ambiente complejo o no definido (Australia; Turquía, y tres distintos sitios del Cinturón Volcánico Mexicano; ver Figura 1 y Tabla 2).

En el diagrama para B-*hy* (Figura 9a) se observa que las muestras de Australia representan los ambientes de Rt e IO, aunque los autores de este trabajo (Price *et al.*, 1997) no definieron el ambiente tectónico de este sitio. Los basaltos normativos en *ne* (Figura 9b) de Turquía caen en el campo de Rt e IO, y también en el de AC, cerca de la frontera con Rt e IO. Por lo tanto,

únicamente con base en este diagrama de discriminación no se define claramente su ambiente tectónico, dado que probablemente representa contribución de fuentes más complejas.

Tanto las muestras correspondientes a la Sierra de Chichinautzin (Figura 9a) como las del área vecina al Volcán Sanganguey (una en la Figura 9a y otra en la

Figura 9b) caen en el campo designado para Rt e IO, mientras que las muestras del área vecina al Volcán de Colima (Figura 9a) en el campo de trasape de AC, AI y MOR, demostrando, de esta manera, la complejidad de la tectónica responsable del origen del Cinturón Volcánico Mexicano.

Finalmente, a pesar de estas exitosas aplicaciones,

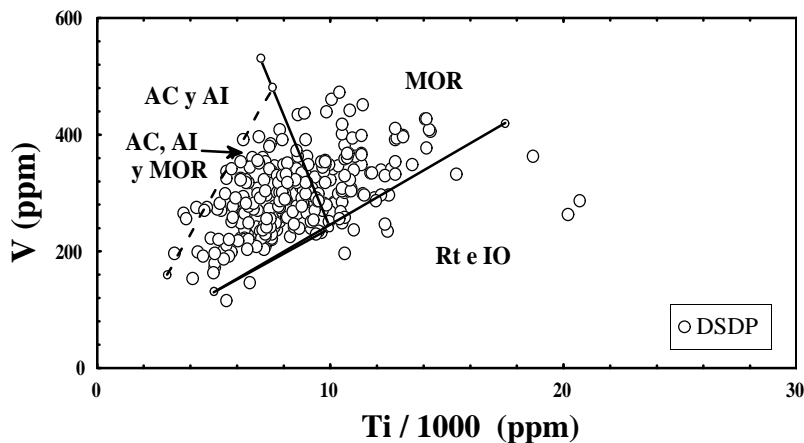


Figura 7. Validación del diagrama de discriminación Ti/1000 – V para basaltos normativos en hiperstena (B-*hy*) para el ambiente de MOR, empleando para ello las muestras de DSDP (Tabla 2). Se puede observar que la mayoría de las muestras cae en el área para MOR y del trasape con AC y AI.

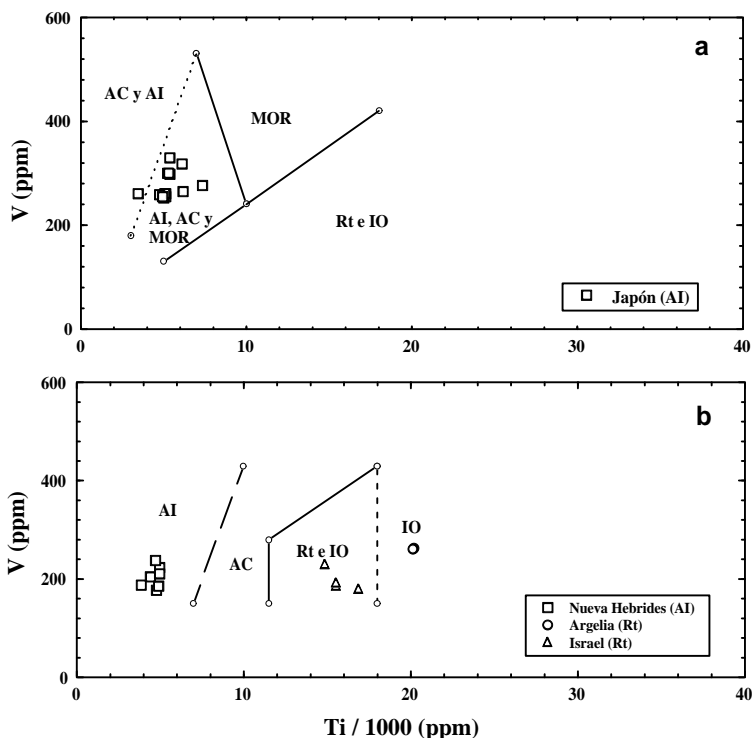


Figura 8. Validación del diagrama de discriminación Ti/1000 – V para basaltos para los ambientes de AI y Rt (Tabla 2). a) Validación para los B-*hy*, donde se puede observar que las muestras de Japón son consistentes con el campo de AI aunque éste se encuentra en trasape con otros ambientes, b) Validación para B-*ne*, usando las muestras de Nueva Hébrides (AI), Argelia (Rt) e Israel (Rt); se observa una buena concordancia de los ambientes inferidos a partir del diagrama con los esperados de acuerdo con los respectivos autores (Tabla 2).

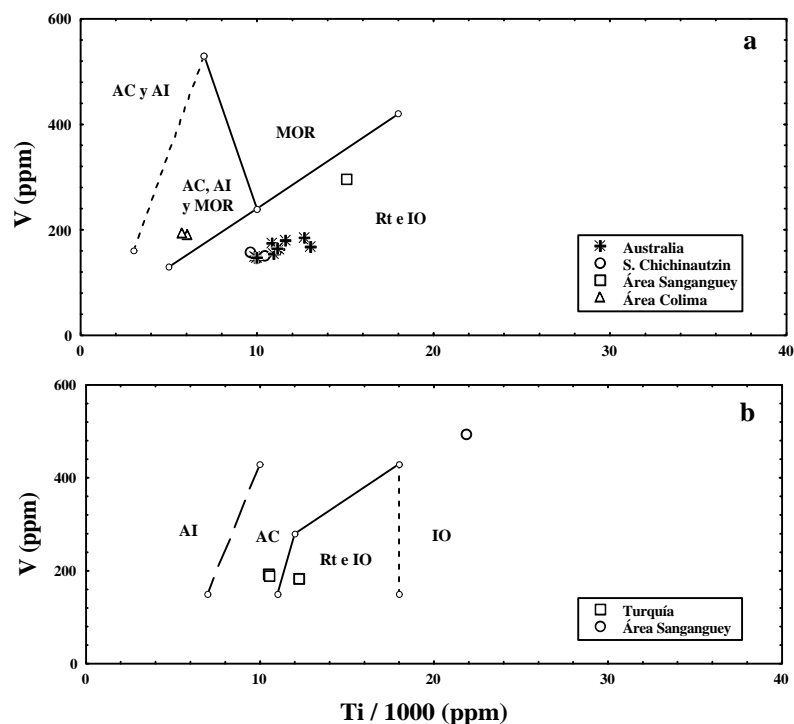


Figura 9. Aplicación de los diagramas con muestras de ambientes tectónicos no definidos o ambientes complejos. a) Uso del diagrama de B-*hy*; se observa que tanto las muestras de Australia como las de la Sierra de Chichinautzin y la del área vecina al Volcán Sanganguey, caen en el área designada para Rt e IO, mientras que las muestras del área vecina al Volcán de Colima se ubican en el campo de traslape de AC, AI y MOR. b) Uso del diagrama de B-*ne*; las muestras de Turquía se grafican tanto en el campo de Rt como en el de AC muy cerca de la línea límite entre ambos ambientes, mientras que una muestra del área vecina al Volcán Sanganguey cae en la prolongación del área de IO.

debemos de mencionar que el diagrama Ti/1,000 – V probablemente no permita discriminar entre diferentes ambientes, sobre todo cuando se estudien secuencias deformadas en cinturones orogénicos en donde, con frecuencia, rocas de diferentes ambientes se encuentran yuxtapuestas tectónicamente.

CONCLUSIONES

El diagrama propuesto por Shervais (1982) con líneas discriminantes representadas por valores iguales de la relación (Ti/1,000)/V, no funciona adecuadamente para la discriminación tectonomagmática. La nueva propuesta, con estas líneas de acuerdo con las tendencias marcadas y los campos ocupados por los contenidos de Ti y V en un gran número de rocas de los sitios tectónicos estudiados, representa una mejor opción para esta discriminación.

Se puede concluir, por lo tanto, que los diagramas de titanio – vanadio propuestos en este trabajo pueden funcionar como buenos discriminadores tectonomagmáticos. Para ello, se recomienda seguir la metodología presentada aquí para la aplicación de estos nuevos diagramas, en especial clasificar las muestras de acuerdo con el diagrama de Total Álcalis – Sílice y el ajuste de Fe₂O₃/

FeO según tipo de roca. Se ha demostrado también que este tipo de diagramas puede funcionar para muestras alteradas como son los basaltos de DSDP. Las coordenadas de las fronteras de discriminación presentadas junto con los diagramas facilitan la aplicación de estos diagramas para ambientes complejos con tectónica no definida. Finalmente, debemos de señalar las limitaciones para este nuevo diagrama (Ti/1,000)/V para discriminar entre ambientes cuando se estudien secuencias deformadas en cinturones orogénicos.

AGRADECIMIENTOS

El primer y la tercera autores agradecen al Sistema Nacional de Investigadores por el apoyo como Ayudante de Investigador Nacional nivel III. Esta investigación fue financiada parcialmente por CONACyT (proyecto 0196P-T) y DGAPA-UNAM (proyecto ES-100596 y IN-106199). Agradecemos de manera muy especial al Dr. Lance Forsythe y Dr. Dante Morán por sus sugerencias sobre una versión anterior de este trabajo, mismas que ayudaron a mejorar sustancialmente nuestra presentación. Así mismo, expresamos nuestro agradecimiento a la Dra. Teresa Orozco por haber contribuido para mejorar nuestro trabajo previo a su publicación.

REFERENCIAS

- Arculus, R.J., 1985, Oxidation status of the mantle: past and present: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 13, 75-95.
- Carmichael, I.S.E., 1991, The redox states of basic and silicic magmas: a reflection of their source regions?: Contributions to Mineralogy and Petrology, 106, 129-141.
- Christie, D. M., Carmichael, I.S.E., Langmuir, C.H., 1986, Oxidation states of mid-ocean ridge basalt glasses: Earth and Planetary Science Letters, 79, 397-411.
- Doe, B.R., 1997, Geochemistry of oceanic igneous rocks-ridges, islands and arcs-with emphasis on manganese, scandium and vanadium: International Geology Review, 39, 1,053-1,112.
- Fears, D., 1985, A correct CIPW program for interactive use: Computers & Geosciences, 11, 787-797.
- Frey, F.A., Bryan, W.B., Thompson, G., 1974, Atlantic ocean floor: geochemistry and petrology of basalts from Legs 2 and 3 of the Deep Sea Drilling Project: Journal of Geophysical Research, 79, 5,507-5,527.
- Hart, R.A., 1970, Chemical exchange between sea water and deep-ocean basalts: Earth and Planetary Science Letters, 9, 269-279.
- Hynes, A., 1980, Carbonatization and mobility of Ti, Y and Zr in Ascot Formation metabasalts, SE Quebec: Contributions to Mineralogy and Petrology, 75, 79-87.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram: Journal of Petrology, 27, 745-750.
- Le Maitre, R.W., 1976, Some problems of the projection of chemical data into mineralogical classifications: Contributions to Mineralogy and Petrology, 56, 181-189.
- Meschede, M., 1986, A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram: Chemical Geology, 56, 207-218.
- Middlemost, E.A.K., 1989, Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks: Chemical Geology, 77, 19-26.
- Mullen, E.D., 1983, MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis: Earth and Planetary Science Letters, 62, 53-62.
- Nicollet, C., Andrianbololona, D.R., 1980, Distribution of transition metals in crustal metabasic igneous rocks: Chemical Geology, 28, 79-90.
- Pearce, J.A., Cann, J.R., 1973, Tectonics setting of basic volcanic rocks determined using trace elements analyses: Earth and Planetary Science Letters, 19, 290-300.
- Pearce, J.A., Gorman, B.E., Birkett, T.C., 1977, The relationship between major element geochemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks: Earth and Planetary Science Letters, 36, 121-131.
- Price, R.C., Gray, C.M., Frey, F.A., 1997, Strontium isotopic and trace element heterogeneity in the plains basalts of the Newer Volcanic Province, Victoria, Australia: Geochimica et Cosmochimica Acta, 61, 171-192.
- Rodríguez-G., J.F., Verma, S., Vasconcelos-F., M., 1996, Basaltos normativos en hiperstena: nuevos diagramas de discriminación para los ambientes de arcos, rifts e islas oceánicas: Actas INAGEQ, 2, 33-38.
- Rollinson, H.R., 1993, Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation, discriminating between tectonic environments using geochemical data: Essex, Longman Scientific and Technical, 352
- Shervais, J. W., 1982, Ti-V plots and petrogenesis of modern and ophiolitic lavas: Earth and Planetary Science Letters, 59, 101-118.
- Staudigel, H., Hart, S.R., 1983, Alteration of basaltic glass: mechanisms and significance for the oceanic crust-seawater budget: Geochimica et Cosmochimica Acta, 47, 337-350.
- Thompson, G., 1973, A geochemical study of the low temperature interaction of sea-water and oceanic igneous rocks: Eos, Transactions, American Geophysical Union, 54, 1,015-1,019.
- Till, R., 1977, The hardrock package, a series of Fortran IV computer programs for performing and plotting petrochemical calculations: Computers & Geosciences, 3, 185-243.
- Vasconcelos-F., M., Verma, S., Rodríguez-G., J.F., 1996, Basaltos normativos en nefelina: nuevos diagramas de discriminación para los ambientes de arcos, rifts e islas oceánicas: Actas INAGEQ, 2, 27-32.
- Vasconcelos-F., M., Verma, S., Rodríguez-G., J.F., 1998, Discriminación tectónica: nuevo diagrama Nb-Ba para arcos continentales, arcos insulares, "rifts" e islas oceánicas en rocas máficas: Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía, 21, 129-146.
- Verma, M., Aguilar-y-Vargas, H., Verma, S., 1986, A program package for major element data handling and CIPW norm calculation: Computers & Geosciences, 12, 381-399.
- Verma, S., 1994, Origen de los basaltos y las andesitas traquibasálticas de la Sierra de Chichinautzin, Mor.-D.F.-Edo. de México, in 4º Congreso Nacional de Geoquímica, Memorias: Jiutepec, Mor., Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 5-9.
- Verma, S., 1996, Uso y abuso de los diagramas de discriminación: Actas INAGEQ, 2, 17-22.
- Verma, S., 1997, Estado actual de los diagramas de clasificación magmática y de discriminación tectonomagmática: Actas INAGEQ, 3, 49-78.
- Verma, S., 2000, Geochemistry of subducting Cocos plate and the origin of subduction-unrelated mafic volcanism at the volcanic front of the central Mexican Volcanic Belt, in Delgado Granados, H., Aguirre-Díaz, G. J., Stock, J.M. (eds.) Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico: Boulder, Co., Geological Society of America, Special Paper, 334, 195-222.
- Verma, S., y Navarro-de-L., I., 1993, Norma CIPW: nuevo programa de cómputo: 3º Congreso Nacional de Geoquímica, Memorias: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, 117-119.
- Verma, S., Vasconcelos-F., M., 1997, Corrección de "basaltos normativos en nefelina: nuevos diagramas de discriminación para los ambientes de arcos, rifts, e islas oceánicas" y de "basaltos normativos en hiperstena: nuevos diagramas de discriminación para los ambientes de arcos, rifts, e islas oceánicas": Actas INAGEQ, 3, 381-382.
- Verma, S., Torres-Alvarado, I.S., Sotelo-Rodríguez, Z.T., 2002, SINCLAS; Standard Igneous Norm and Volcanic Rock Classification System: Computers & Geosciences (en prensa).
- Wang, P., Glover, L. III, 1992, A tectonic test of the most commonly used geochemical discrimination diagrams and patterns: Earth-Science Reviews, 33, 111-131.
- Wood, D.A., 1980, The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems or tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province: Earth and Planetary Science Letters, 50, 11-30.
- Weaver, B.L., Tarney, J., 1981, Chemical changes during dyke metamorphism in high grade basement terrains: Nature, 289, 47-49.

Manuscrito recibido: Junio 11, 2000

Manuscrito corregido recibido: Diciembre 12, 2000

Manuscrito aceptado: Septiembre 12, 2001