

Petrología Ígnea y Metamórfica

Conceptos de Geoquímica de Rocas

Elementos mayores: > 1%

SiO₂
Al₂O₃
Fe₂O₃
FeO
MgO
CaO
Na₂O
K₂O
H₂O

Elementos menores: 0.1 - 1%
(Usualmente se incluyen con los elementos mayores)

TiO₂
MnO
P₂O₅
CO₂

Elementos traza: <0.1%
Se expresan en ppm
(1% = 10,000 ppm)

Rb, Nb, Li, Be, La, Ce, Th, U,
etc.

Relaciones isotópicas

⁸⁷Sr/⁸⁶Sr
¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd
²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb
²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb
δ¹⁸O , etc.

<i>Elementos Mayores [wt %]</i>					
SiO₂	55.70	49.10	47.02	49.32	47.30
TiO₂	0.74	1.89	1.51	1.50	2.30
Al₂O₃	16.20	12.95	15.94	17.50	16.15
Fe₂O₃	2.33	3.69	3.96	2.59	7.06
FeO	3.20	4.08	5.75	6.03	4.18
MnO	0.09	0.07	0.15	0.15	0.15
MgO	4.51	12.59	10.58	5.24	6.35
CaO	6.12	10.75	9.36	8.39	9.11
Na₂O	3.80	2.40	3.66	4.12	3.97
K₂O	1.07	0.49	1.13	2.23	1.68
P₂O₅	0.17	0.03	0.42	0.52	0.62
L.O.I.	5.98	1.76	0.41	2.19	0.89
<i>[m.g.]</i>	<i>0.45</i>	<i>0.62</i>	<i>0.52</i>	<i>0.38</i>	<i>0.36</i>
TOTAL	99.91	99.80	99.89	99.78	99.76

Norma CIPW

Definición y origen

- Método para determinar “mineralogía” de una roca a partir de su análisis químico, y fue desarrollada por los petrólogos Cross, Iddings y Pirsson y el geoquímico Washington a inicios del siglo XX (1931)

Supuestos y problemas

- El método asume magmas anhídros
- No considera soluciones solidas de algunos elementos (ej Al y Ti en ferromagnesianos), y razón Fe/Mg se asume igual para todos los minerales ferromagnesianos.
- Solo considera miembros extremos de soluciones sólidas
- Asume baja presión
- Solo considera química y no otros factores como texturas.
- **LA NORMA PUEDE SER MUY DIFERENTE A LA MINERALOGÍA OBSERVADA (MODA)**

Primeros cálculos

- Se recalculan los porcentajes considerando una base anhídra

$$\frac{[\text{óxido}_i]}{\sum [\text{óxidos}] - [\text{volátiles}]} = \frac{X_i \%}{100\%}$$

- Ahora se convierten a porcentajes moleculares, dividiendo el porcentaje por el peso molecular (ver tablas)

Método

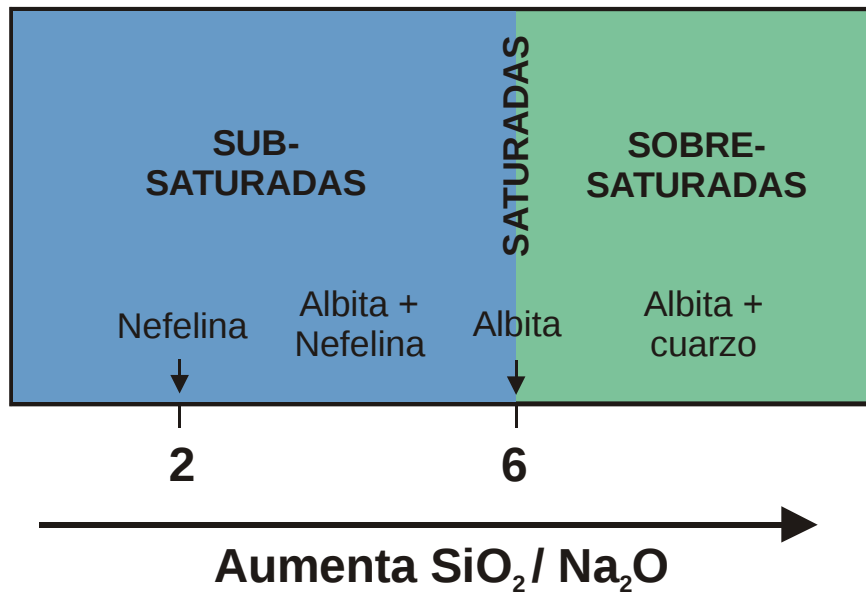
- Fórmulas siguen sintaxis de un programa de computación común (así como en java). Por ejemplo, $\text{FeO} = \text{FeO} + \text{MnO} + \text{NiO}$, significa sumar FeO, MnO and NiO, entonces reemplaza el valor de FeO con el valor calculado.
- Cálculos provisionales son denotados por P^* ; por ejemplo, $P^*\text{Albita}$ significa una cantidad provisional para albita, la que puede convertirse más tarde en nefelina. Cualquier cantidad provisional que permanece así hasta el final, pasa a ser una cantidad final.

Minerales normativos típicos

- Qz: Cuarzo
- Feldespatos:
 - Or: Ortoclasa
 - Ab: Albita
 - An: Anortita
- Feldespatoides:
 - Lc: Leucita
 - Ne: Nefelina
- Piroxenos
 - Ac: Acmita (Na-Fe)
 - Di: Diópsido
 - Hy: Hiperstena
 - Wo: Wollastonita
- Ol: Olivino
- C: Corindón
- Magnetita
- Pirita

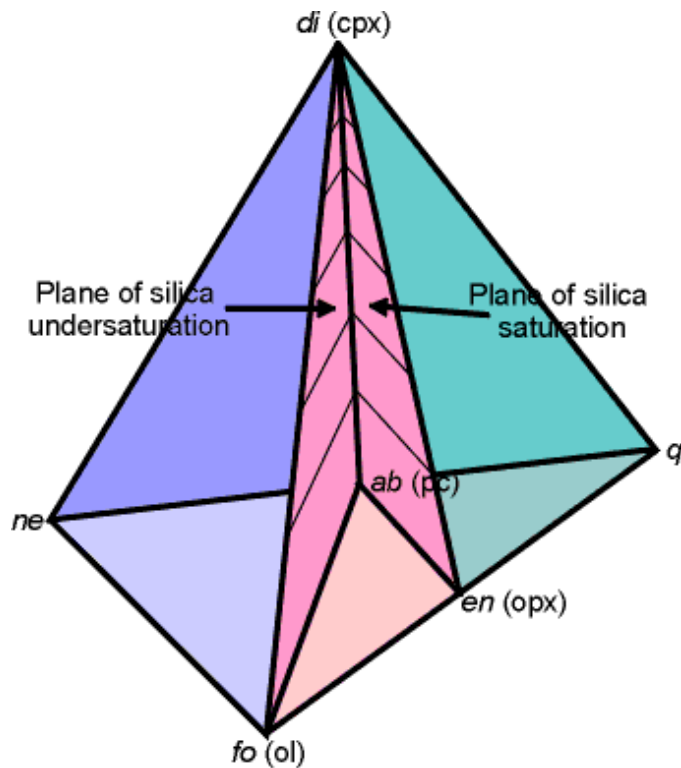
Clasificación

Clasificaciones en base a CIPW

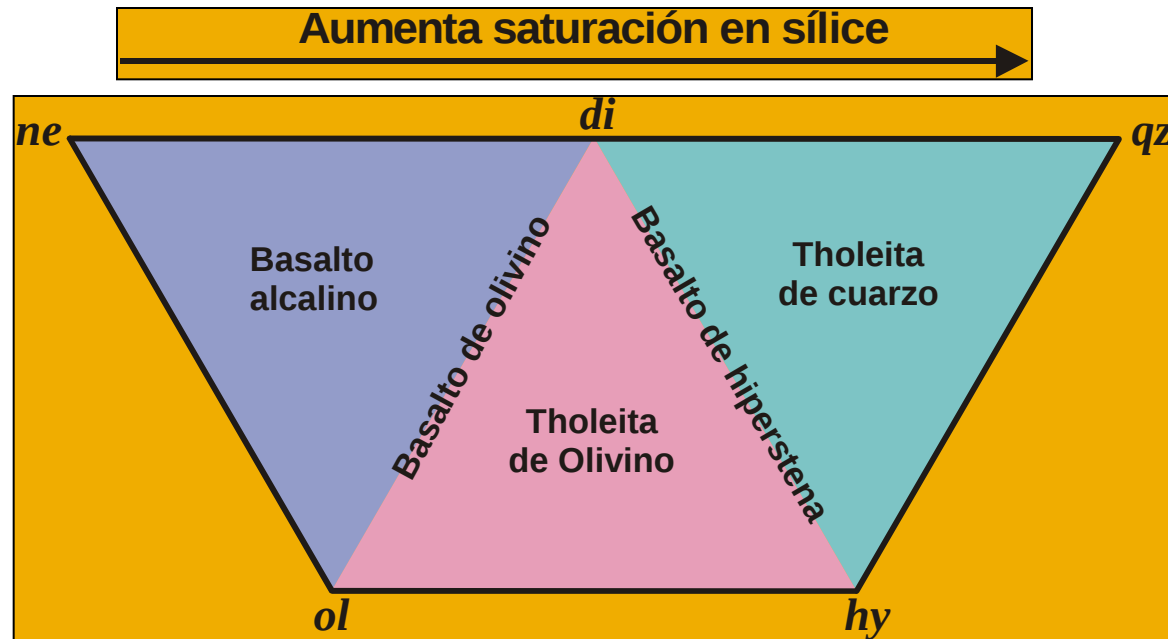


- Subsaturadas
 - Nefelina normativa
- Sobresaturadas
 - Cuarzo normativo

Clasificaciones en base a CIPW

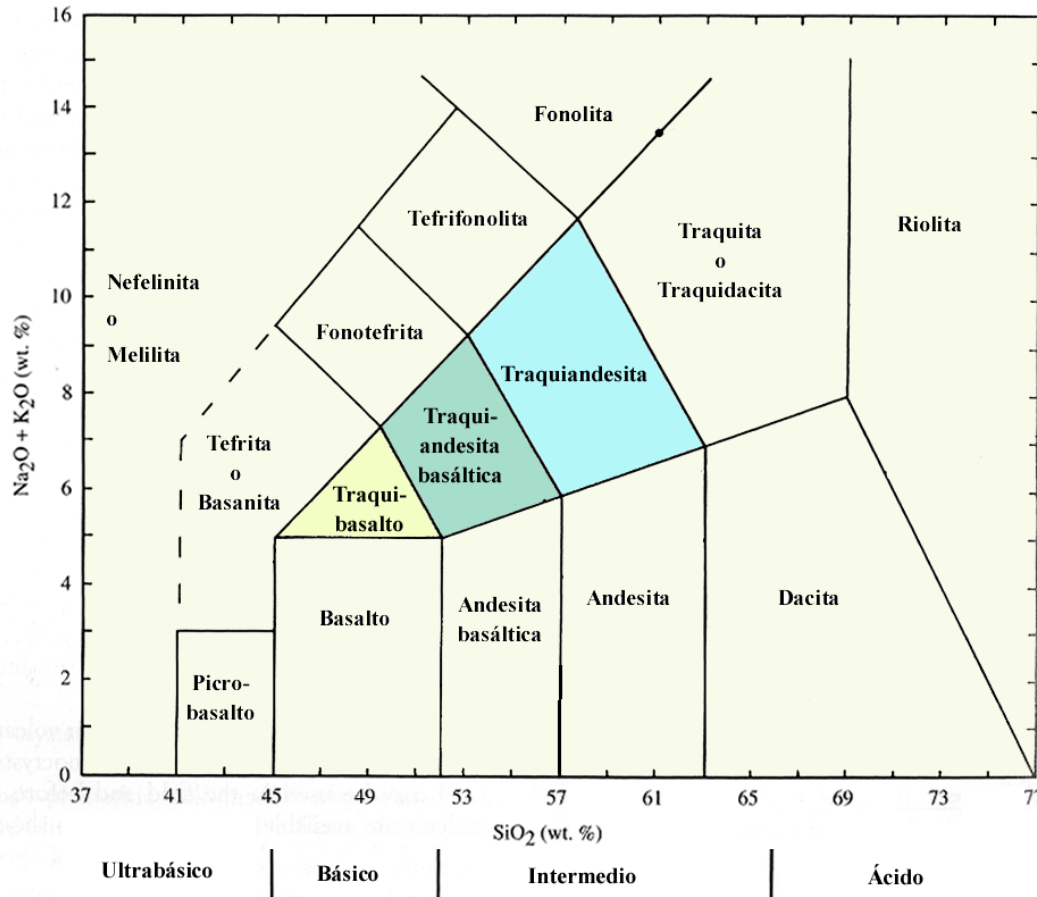


Tetraedro de basaltos



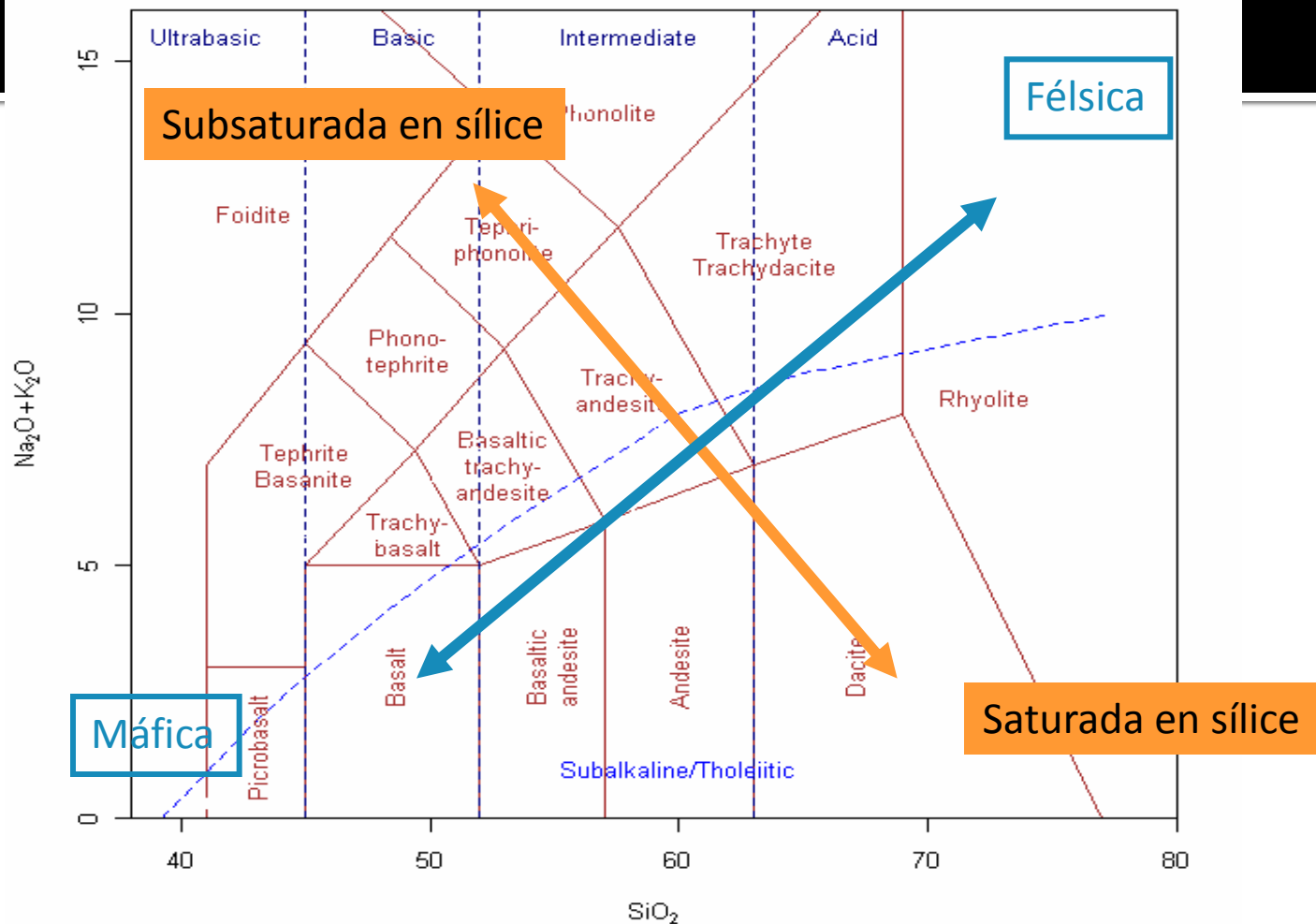
- Válida para basaltos, basado en mineralogía normativa

Diagrama TAS



- Se aplica a rocas volcánicas frescas ($\text{H}_2\text{O} < 2\%$ y $\text{CO}_2 < 0.5\%$)
- Deben ser recalculados en base seca
- Se basa en mineralogía normativa, pero esta NO es necesaria para utilizarlo

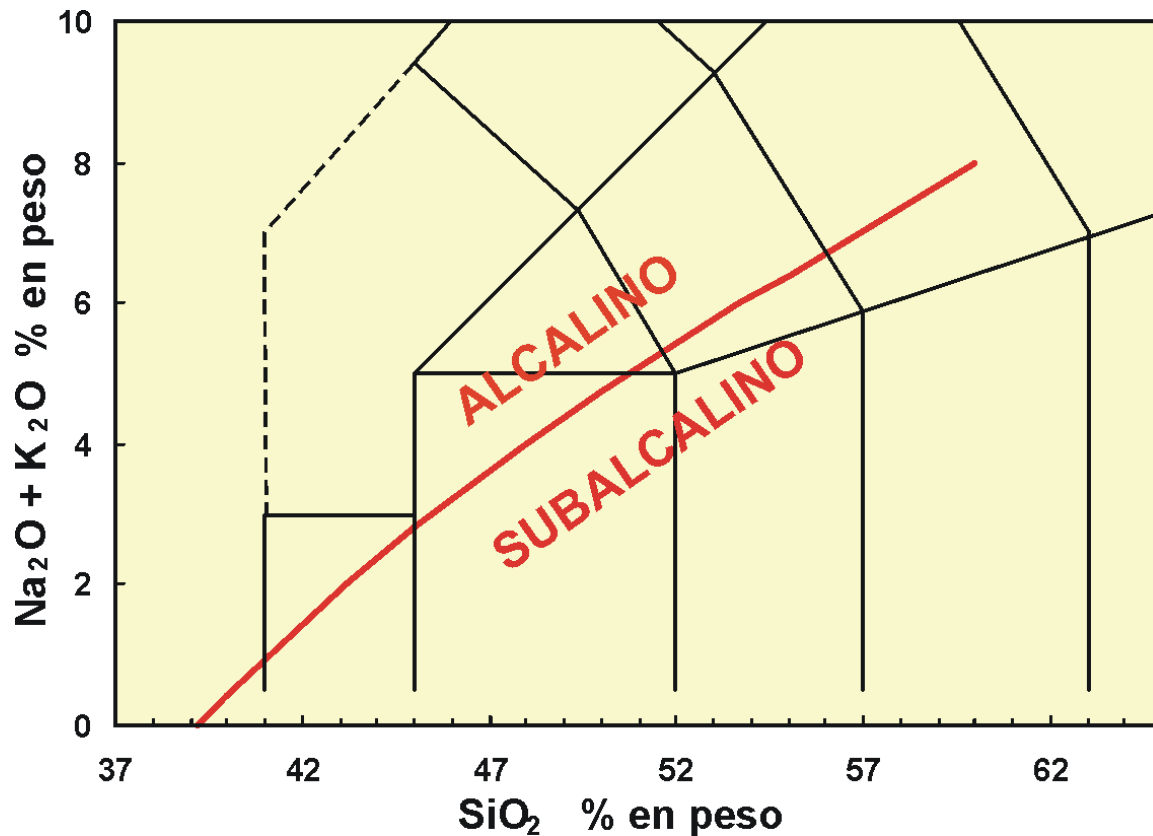
Sudivisión de los campos coloreados	Traquibasalto	Traquiandesita basáltica	Traquiandesita
$\text{Na}_2\text{O} - 2.0 \geq \text{K}_2\text{O}$	Hawaiita	Mugearita	Benmoreita
$\text{Na}_2\text{O} - 2.0 \leq \text{K}_2\text{O}$	Traquibasalto potásico	Shoshonita	Latita



Básico

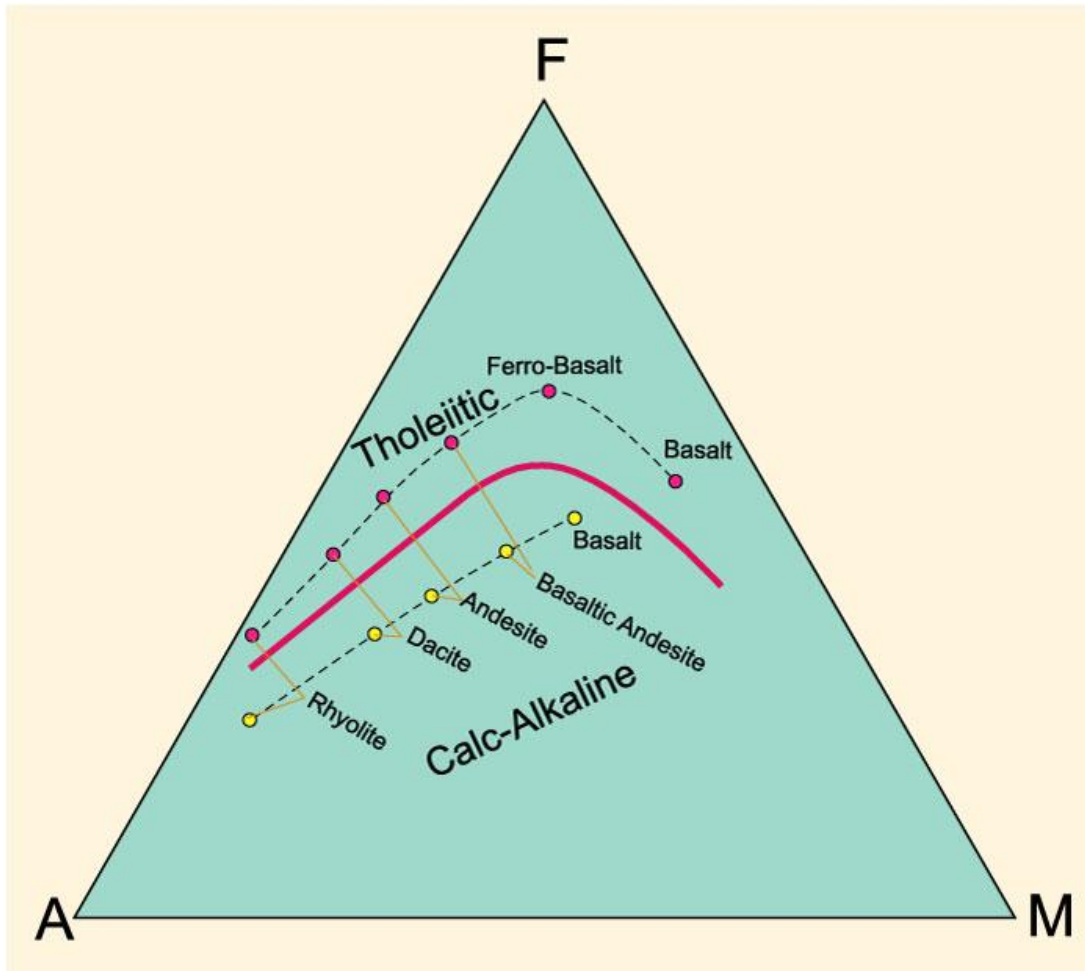
Ácido

Series alcalina y subalcalina



- Alcalina
 - Subsaturada en sílice
 - Rica en alcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)
 - Nefelina normativa
- Subalcalina
 - Saturada en sílice
 - Serie Toleítica
 - Serie Calcoalcalina
 - Cuarzo normativo

Diagrama AFM



- Sirve para discriminar entre series toleítica y calcoalcalina

- A: $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$
- F: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$
- M: MgO

Diagrama AFM

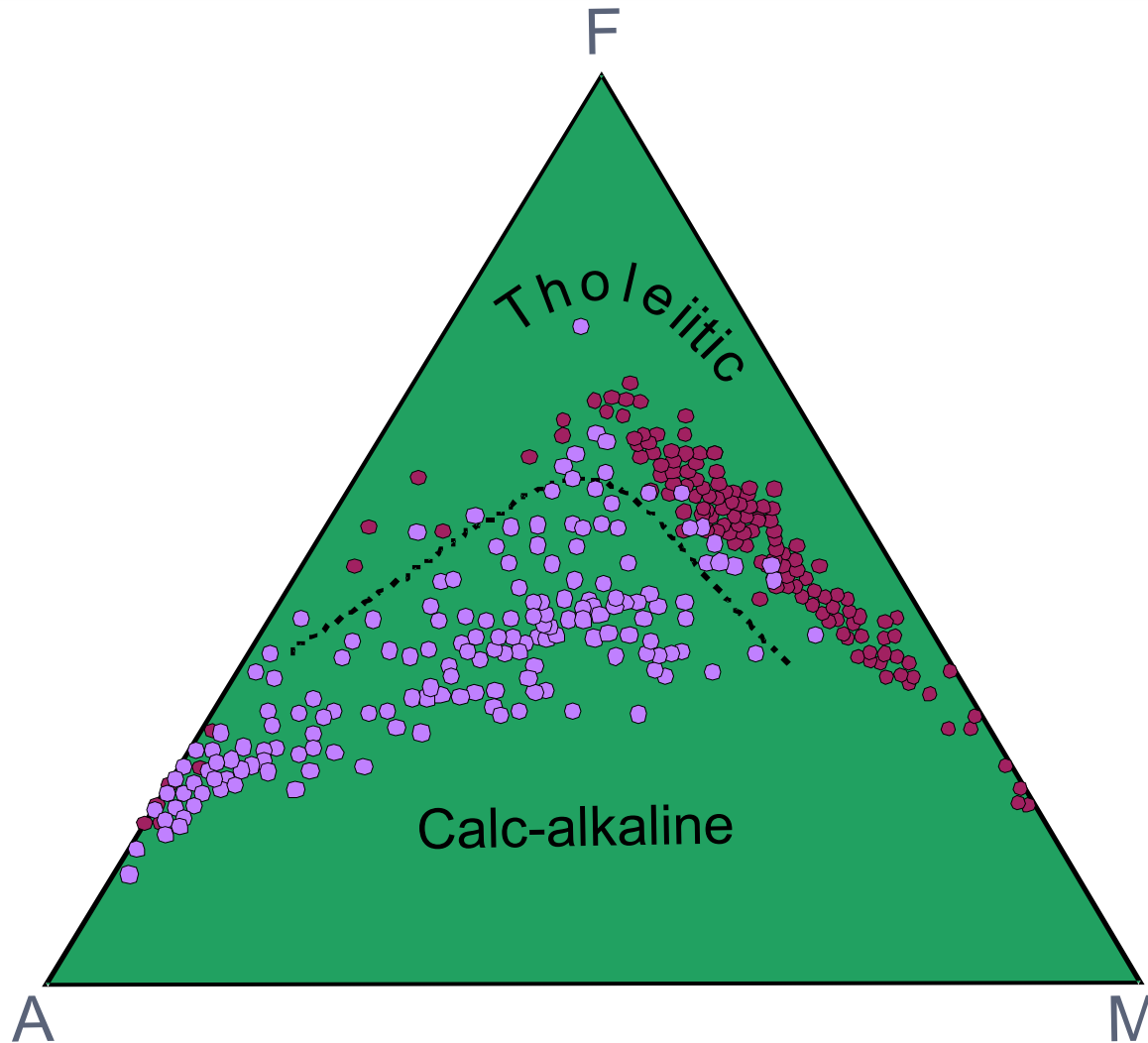
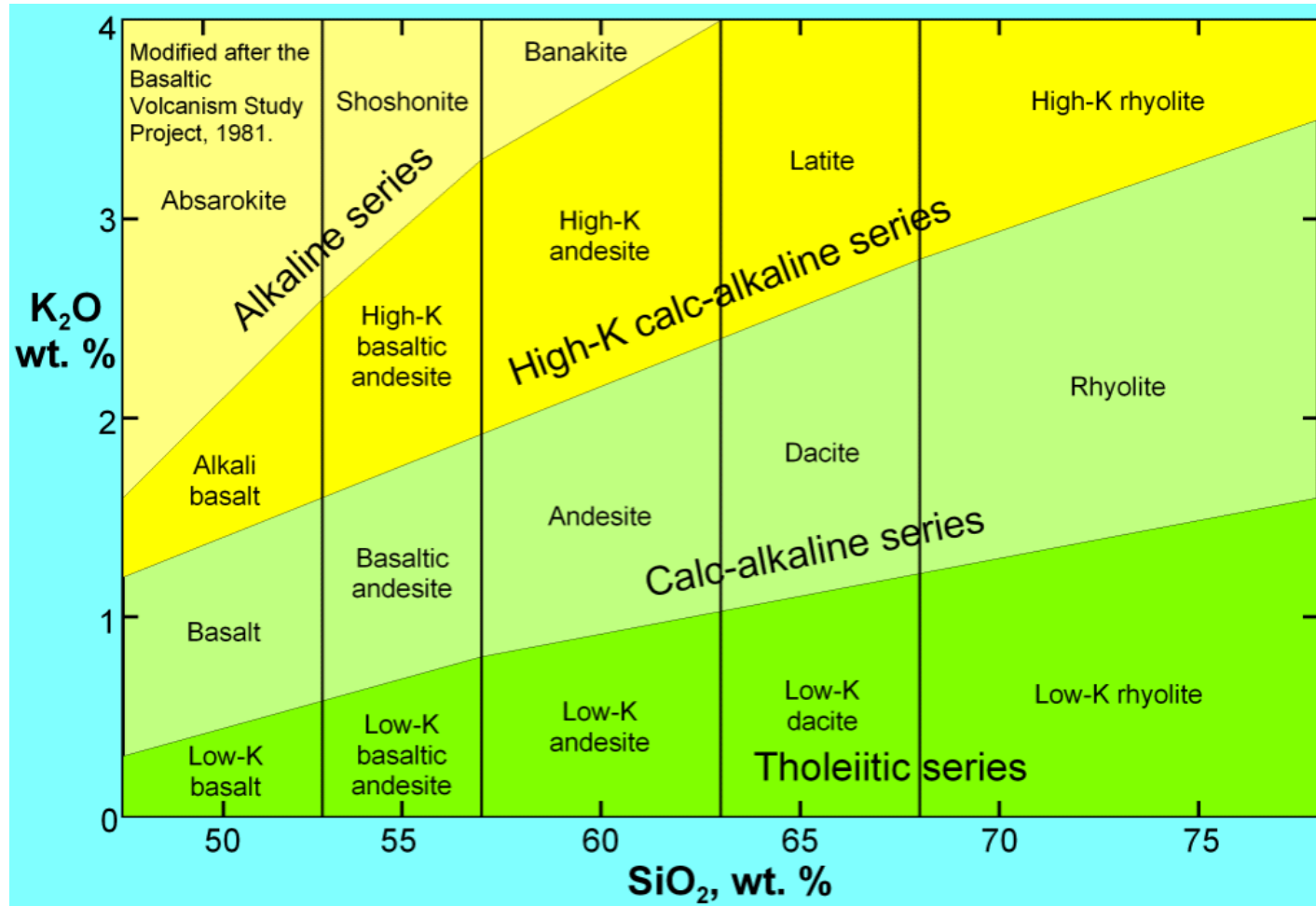
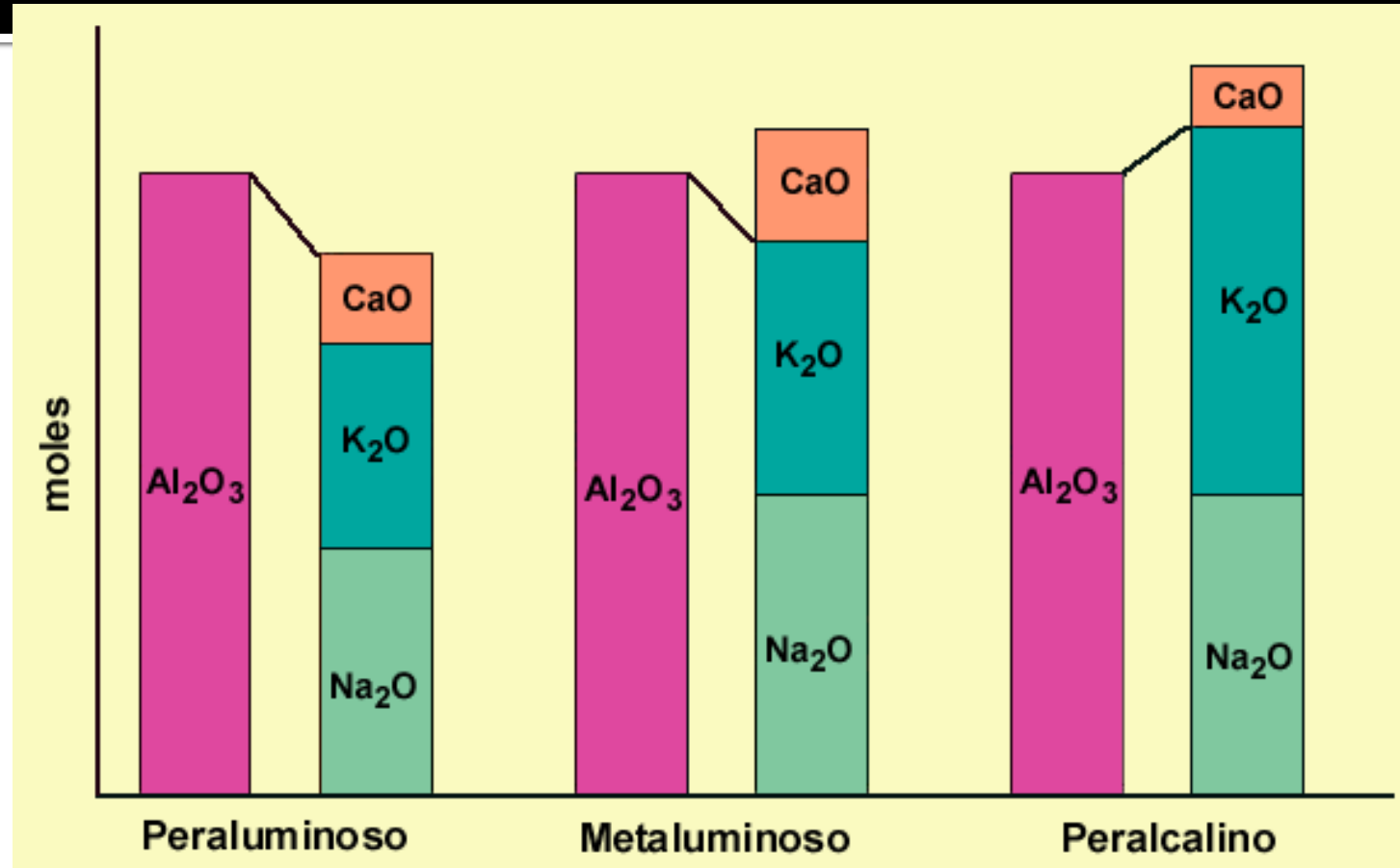


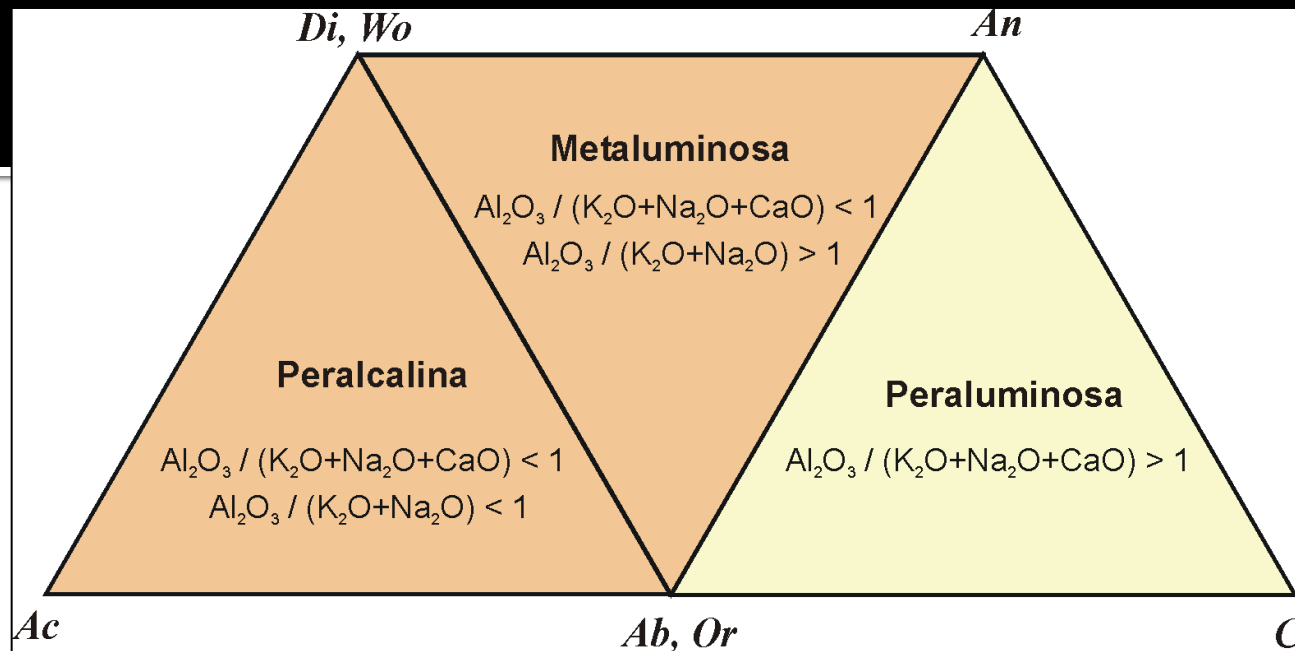
Diagrama K₂O vs SiO₂



Saturación en alúmina

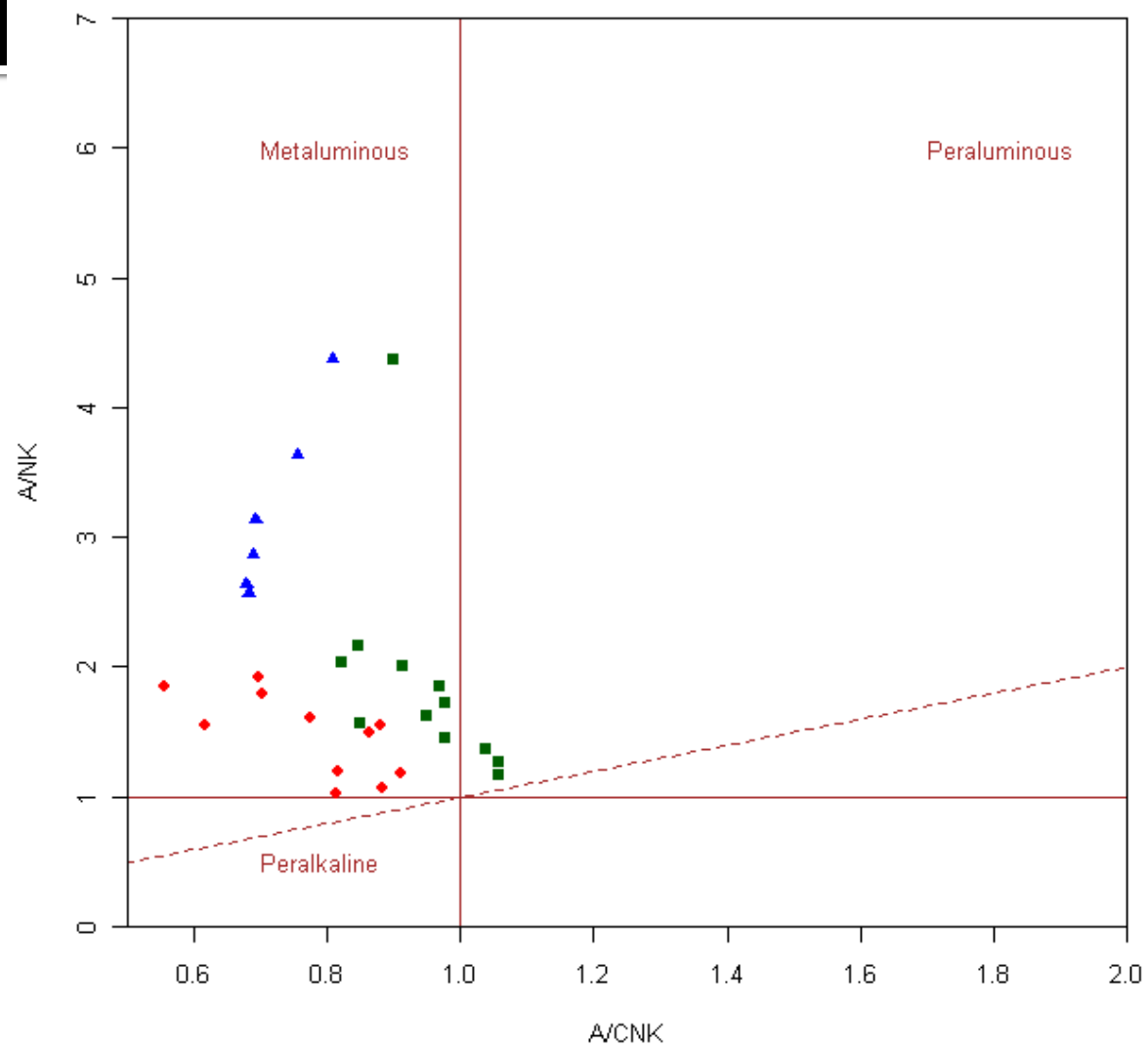


- Especialmente importante en clasificación de rocas félsicas
- OJO!! , el eje Y esta en moles (dividir porcentaje del óxido con su peso molecular)



■ Triángulos basados en mineralogía normativa

Grado de saturación	Serie	Minerales diagnósticos
Sobresaturada	Peraluminosa	Muscovita, Biotita rica en Al, cordierita, silimanita, andalusita, corindón, granate (almandino-espesartina), turmalina, topacio.
Subsaturada	Metaluminosa	Piroxeno, Biotita, Hornblenda
	Peralcalina	Anfíboles alcalinos (riebeckita, arfvedsonita), Piroxenos alcalinos (egirina), Olivino fayalítico, Ferrohedenbergita



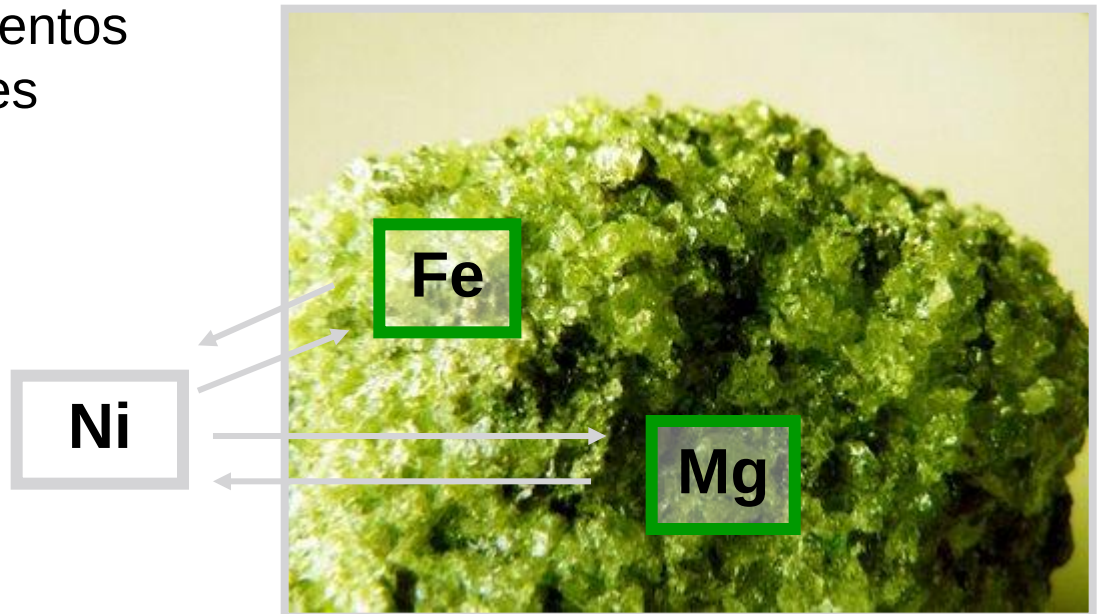
Resumen

Series		Alkali content	Fe-Mg	Al
Alkaline		High	Fe-rich	Metaluminous to peralkaline
Sub-alkaline	Calc-alkaline	Low to moderate	Mg-rich	Metaluminous to per-aluminous
	Tholeiitic	Low	Fe-rich	Metaluminous

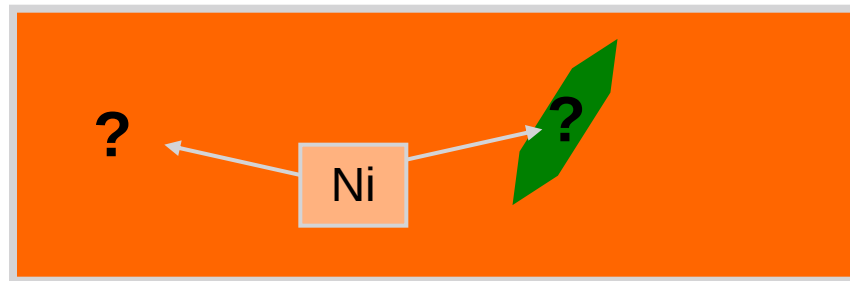
Elementos traza

- Elemento presente en la roca $< 0.1\%$ (1000 ppm)
- Mejores discriminantes que elementos mayores en procesos petrológicos
- No forman minerales solos

→ pueden sustituir elementos mayores en los minerales formadores de rocas



- En procesos de fusión o cristalización, los elementos traza pueden mostrar preferencia por la fase líquida o sólida
 - Preferencia parte Líquida → Incompatibles
 - Preferencia parte Sólida → Compatibles



- Grado compatibilidad e incompatibilidad varia en fundidos de diferente concentración
- Ej. Fósforo (P)
 - Incompatible mineralogía mantélica
 - Compatible mineralogía granítica
 - Apatito en granitos



Incompatibles

HFSE

LFSE

Carga
Radio

POTENCIAL IONICO

- HFSE: High Field Strength Elements $PI > 2$

- cationes pequeños y muy cargados

- LFSE: Low Field Strength Elements $PI < 2$

- cationes grandes de pequeña carga

LILE

Large Ion Lithophile Elements

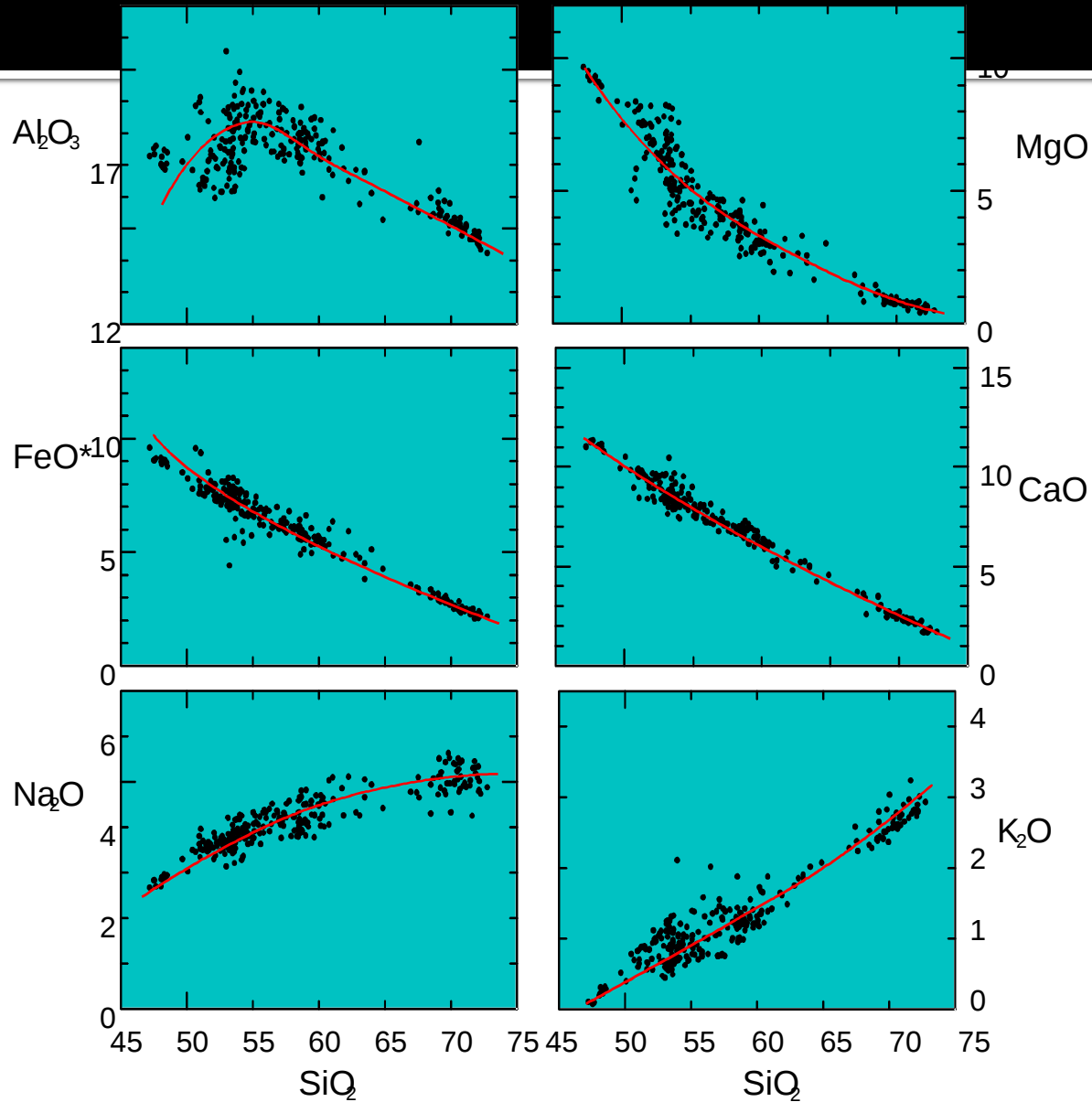
- Elementos similar carga y tamaño
 ➔ Comportamiento Geoquímico similar

	1																	18
1	H	2																He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
6			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb		
7			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No		

HFSE

LILE

Diagramas Harker



- Elementos traza fuertemente particionados en un mineral
- Ni - olivino en Tabla 9-1 = 14

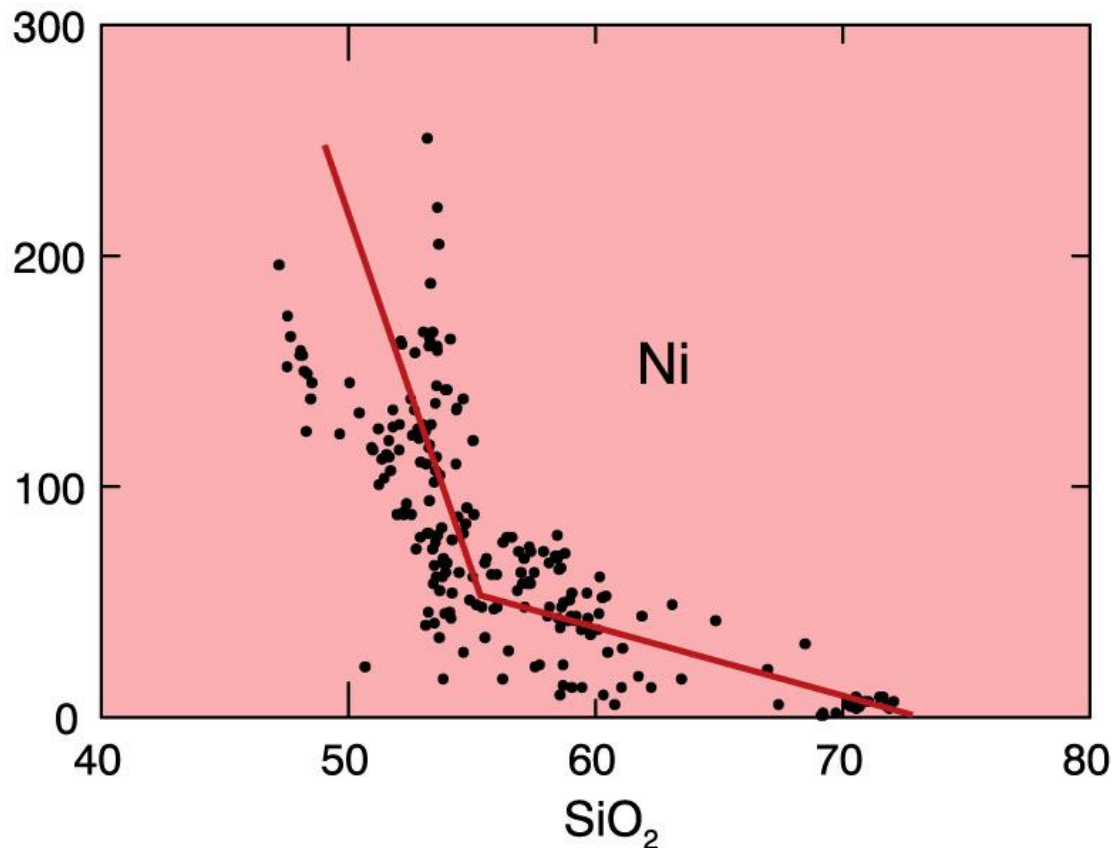


Figure 9.1a. Ni Harker Diagram for Crater Lake. From data compiled by Rick Conrey. From Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

- Elementos traza incompatibles → liquido
- Pueden reflejar la proporción de liquido en un estado dado de cristalización o fusión

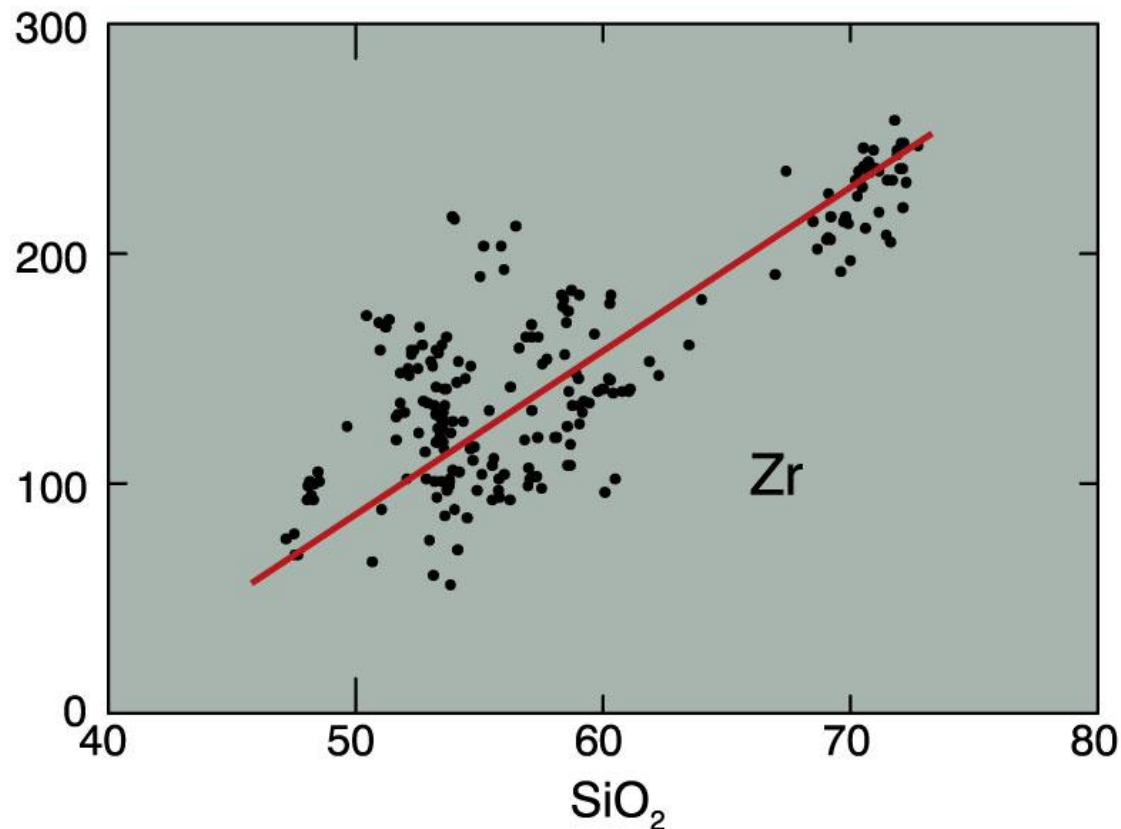


Figure 9.1b. Zr Harker Diagram for Crater Lake. From data compiled by Rick Conrey. From Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

Las Tierras Raras(REE)

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

GROUP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
PERIOD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H 1.01 H° 0.46 Hydrogen																	He 4.00 Helium
2	Li 6.94 Li° 0.68 Lithium	Be 9.01 Be²⁺ 0.25 Beryllium											B 10.81 B³⁺ 0.10 Boron	C 12.01 C° 0.77 Carbon	N 14.01 N³⁺ 0.16 Nitrogen	O 16.00 O²⁻ 1.30 Oxygen	F 19.00 F⁻ 1.23 Fluorine	Ne 20.18 Neon
3	Na 22.99 Na⁺ 1.24 Sodium	Mg 24.305 Mg²⁺ 0.80 Magnesium											Al 26.98 Al³⁺ 0.61 Aluminum	Si 28.09 Si⁴⁺ 0.34 Silicon	P 30.97 P³⁺ 0.55 Phosphorus	S 32.065 S²⁺ 0.37 Sulfur	Cl 35.45 Cl⁻ 1.72 Chlorine	Ar 39.95 Argon
4	K 39.10 K⁺ 1.68 Potassium	Ca 40.08 Ca²⁺ 1.20 Calcium	Sc 44.96 Sc³⁺ 0.83 Scandium	Ti 47.87 Ti⁴⁺ 0.69 Titanium	V 50.94 V³⁺ 0.72 Vanadium	Cr 52.00 Cr³⁺ 0.70 Chromium	Mn 54.94 Mn²⁺ 0.80 Manganese	Fe 55.845 Fe²⁺ 0.74 Fe³⁺ 0.64 Iron	Co 58.93 Co²⁺ 0.72 Cobalt	Ni 58.69 Ni²⁺ 0.77 Nickel	Cu 63.546 Cu²⁺ 0.81 Copper	Zn 65.39 Zn²⁺ 0.83 Zinc	Ga 69.72 Ga³⁺ 0.70 Gallium	Ge 72.64 Ge⁴⁺ 0.62 Germanium	As 74.92 As³⁺ 0.58 Arsenic	Se 78.96 Se²⁺ 0.37 Selenium	Br 79.90 Br⁻ 1.88 Bromine	Kr 83.80 Krypton
5	Rb 85.47 Rb⁺ 1.81 Rubidium	Sr 87.62 Sr²⁺ 1.33 Strontium	Y 88.91 Y³⁺ 0.98 Yttrium	Zr 91.22 Zr⁴⁺ 0.80 Zirconium	Nb 92.91 Nb⁵⁺ 0.72 Niobium	Mo 95.94 Mo⁶⁺ 0.80 Molybdenum	Tc (98) Tc⁴⁺ 0.72 Technetium	Ru 101.07 Ru⁴⁺ 0.70 Ruthenium	Rh 102.91 Rh³⁺ 0.75 Rhodium	Pd 106.42 Pd²⁺ 0.80 Palladium	Ag 107.87 Ag⁺ 1.26 Silver	Cd 112.41 Cd²⁺ 0.97 Cadmium	In 114.82 In³⁺ 1.00 Indium	Sn 118.71 Sn⁴⁺ 0.77 Tin	Sb 121.76 Sb³⁺ 0.69 Antimony	Te 127.60 Te⁴⁺ 0.60 Tellurium	I 126.90 I⁻ 1.97 Iodine	Xe 131.29 Xenon
6	Cs 132.91 Cs⁺ 1.96 Cesium	Ba 137.33 Ba²⁺ 1.50 Barium	La-Lu 57-71 Lanthanide	Hf 178.49 Hf⁴⁺ 0.79 Hafnium	Ta 180.95 Ta⁵⁺ 0.72 Tantalum	W 183.84 W⁶⁺ 0.68 Tungsten	Re 186.21 Re⁴⁺ 0.71 Rhenium	Os 190.23 Os⁴⁺ 0.71 Osmium	Ir 192.22 Ir⁴⁺ 0.71 Iridium	Pt 195.08 Pt²⁺ 0.80 Platinum	Au 196.97 Au³⁺ 0.78 Gold	Hg 200.59 Hg²⁺ 1.10 Mercury	Tl 204.38 Tl³⁺ 1.08 Thallium	Pb 207.2 Pb²⁺ 1.57 Lead	Bi 208.98 Bi³⁺ 1.19 Bismuth	Po (209) Po⁴⁺ 1.16 Polonium	At (210) Astatane	Rn (222) Radon
7	Fr (223) Francium	Ra (226) Ra²⁺ 1.56 Radium	Ac-Lr 89-103 Actinide															

57 138.91	58 140.12	59 140.91	60 144.24	61 (145)	62 150.36	63 151.96	64 157.25	65 158.93	66 162.50	67 164.93	68 167.26	69 168.93	70 173.04	71 174.97
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
La³⁺ 1.25	Ce³⁺ 1.22	Pr³⁺ 1.22	Nd³⁺ 1.20	Promethium	Sm³⁺ 1.17	Eu³⁺ 1.15	Gd³⁺ 1.14	Tb³⁺ 1.12	Dy³⁺ 1.11	Ho³⁺ 1.10	Er³⁺ 1.08	Tm³⁺ 1.07	Yb³⁺ 1.06	Lu³⁺ 1.05
Lanthanum	Cerium	Praseodymium	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium

89 (227)	90 232.04	91 231.04	92 238.03	93 (237)	94 (244)	95 (243)	96 (247)	97 (247)	98 (251)	99 (252)	100 (257)	101 (258)	102 (259)	103 (262)
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
Ac³⁺ 1.18	Th⁴⁺ 1.12	Pa³⁺ 1.09	U⁴⁺ 1.08	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lawrencium
Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lawrencium

Existen contrastes y semejanzas en el valor para el coeficiente de partición

TODAS son incompatibles, pero:

HREE menos incompatibles que LREE

Table 9-1. Partition Coefficients (C_S/C_L) for Some Commonly Used Trace Elements in Basaltic and Andesitic Rocks

	Olivine	Opx	Cpx	Garnet	Plag	Amph	Magnetite
Rb	0.01	0.022	0.031	0.042	0.071	0.29	
Sr	0.014	0.04	0.06	0.012	1.83	0.46	
Ba	0.01	0.013	0.026	0.023	0.23	0.42	
Ni	<i>14.0</i>	5.0	7.0	0.955	<i>0.01</i>	6.8	29.
Cr	0.7	10.0	34.0	1.345	<i>0.01</i>	2.0	7.4
La	0.007	<i>0.03</i>	0.056	0.001	0.148	0.544	2.
Ce	0.006	0.02	0.092	0.007	0.082	0.843	2.
Nd	0.006	0.03	0.23	0.026	0.055	1.34	2.
Sm	0.007	0.05	0.445	0.102	0.039	1.804	1.
Eu	0.007	0.05	0.474	0.243	0.1/1.5*	1.557	1.
Dy	0.013	0.15	0.582	3.17	0.023	2.024	1.
Er	0.026	0.23	0.583	6.56	0.02	1.74	1.5
Yb	0.049	0.34	0.542	11.5	0.023	1.642	1.4
Lu	0.045	0.42	0.506	11.9	0.019	1.563	

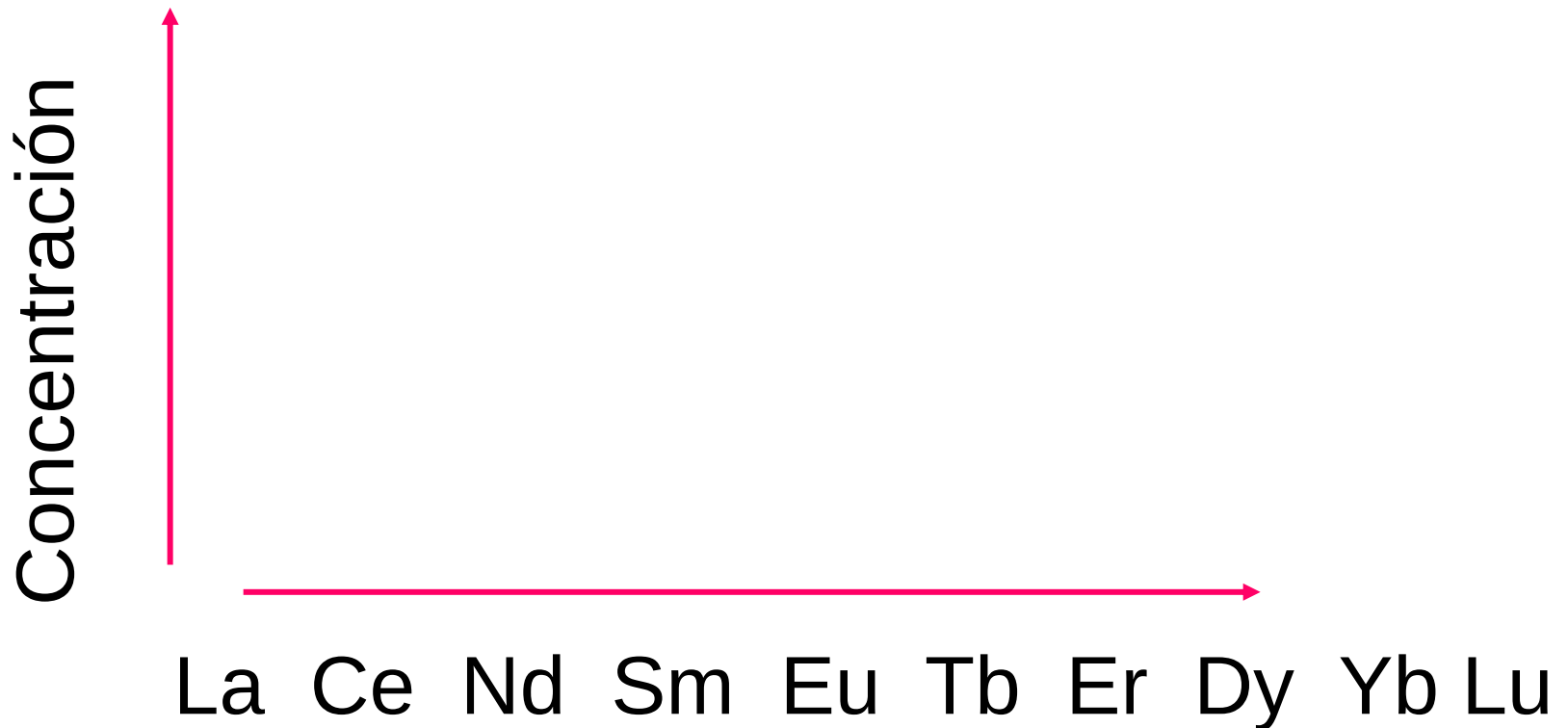
Data from Rollinson (1993).

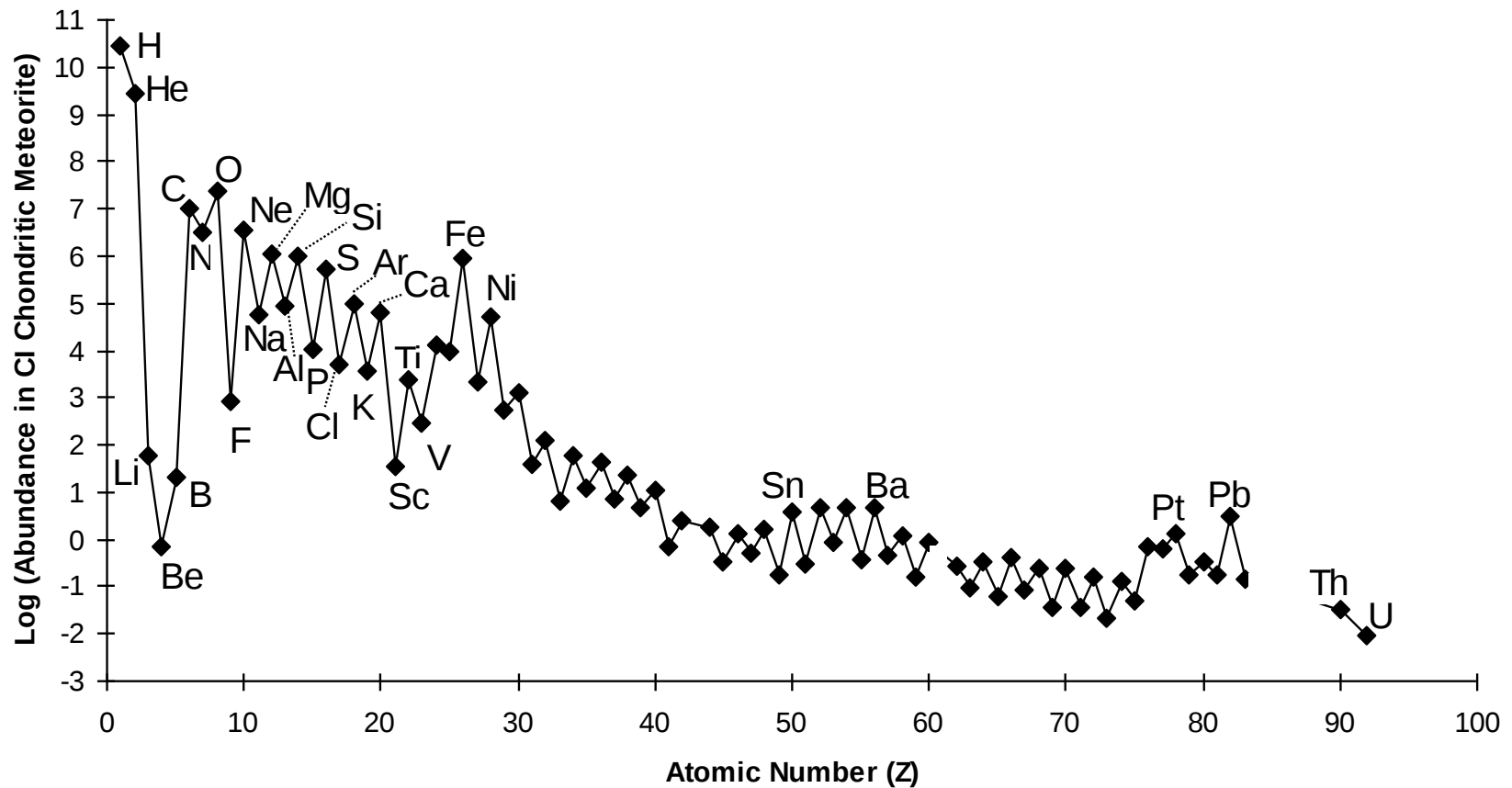
* $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ *Italics* are estimated

Diagramas de REE

Se plotea la concentración (eje Y) vs el número atómico

👉 **La compatibilidad aumenta hacia la derecha**



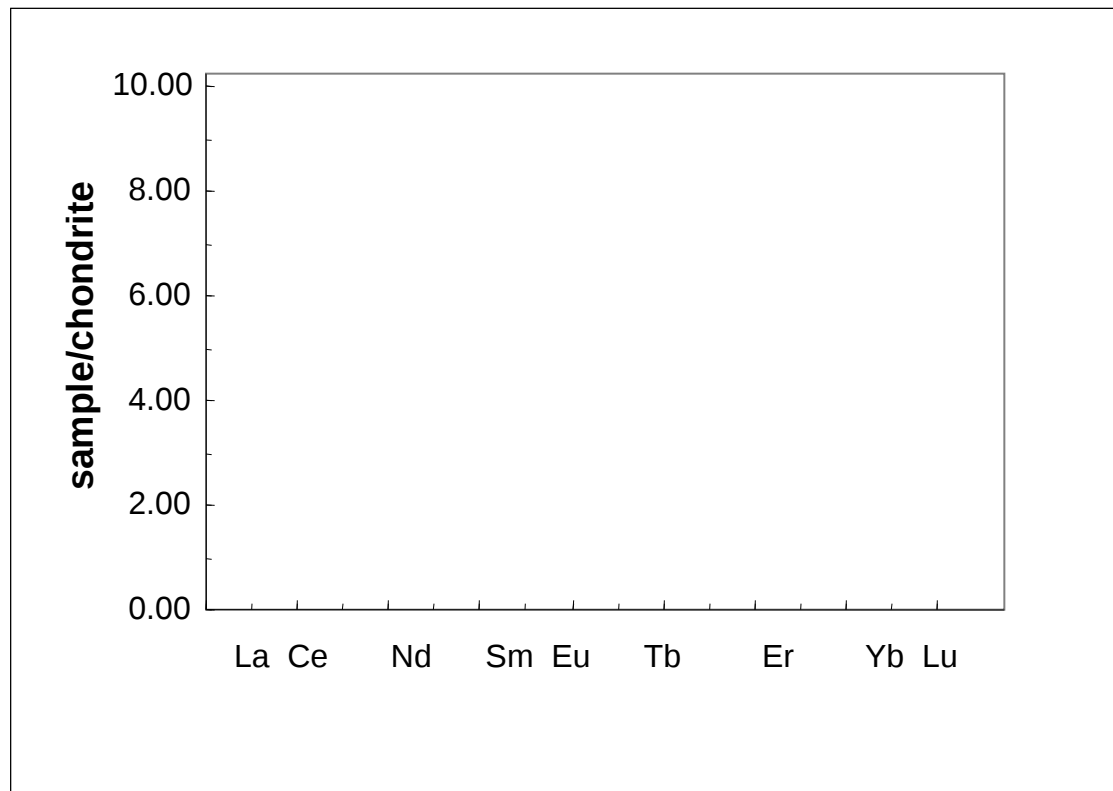


👉 Para eliminar el efecto Oddo-Harkins, los valores de las concentraciones se normalizan a un standard:

- Estimaciones de un manto primitivo

Concentraciones de meteoritos condriticos

Se divide la concentración de cada muestra por el valor de esa concentración en el standard



Diagramas Multielementos normalizados (Spider)

Una extensión de la técnica de REE
ampliada para más elementos
incompatibles

Diagramas normalizados al condrito
comúnmente organizados para
aumentar la compatibilidad hacia la
derecha

Excepciones principales:

Sr (cuando Plg es
envuelta)

Y, Yb (Granate)

Ti (Magnetita)

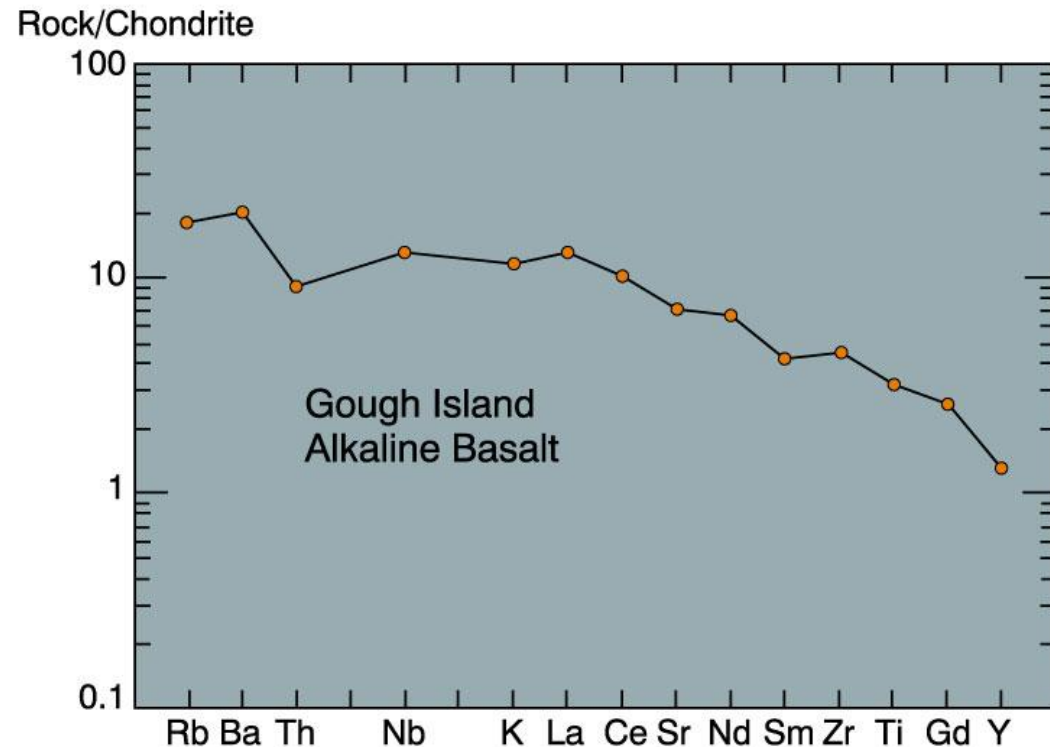


Fig. 9.6. Spider diagram for an alkaline basalt from Gough Island, southern Atlantic. After Sun and MacDonough (1989). In A. D. Saunders and M. J. Norry (eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. London Spec. Publ., **42**. pp. 313-345.

Spiders normalizados al MORB

Se separan en LILE y HFSE

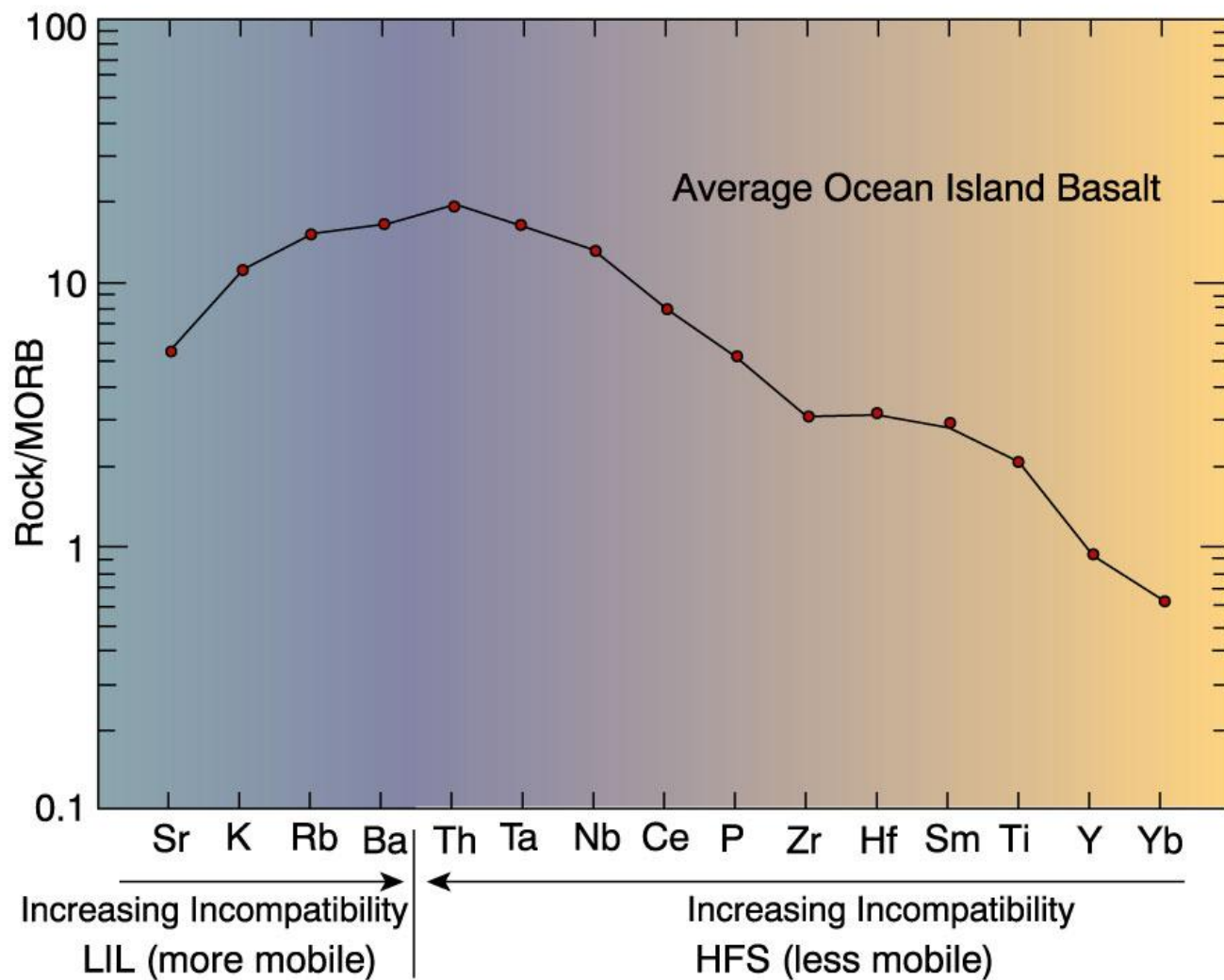


Figure 9.7. Ocean island basalt plotted on a mid-ocean ridge basalt (MORB) normalized spider diagram of the type used by Pearce (1983). Data from Sun and McDonough (1989). From Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

Table: Resumen de algunos elementos traza particularmente útiles en petrología Ignea

Elemento	Uso como indicador petrogenetico
Ni, Co, Cr	Elementos altamente incompatibles. Ni (y Co) son concentrados en olivino, y Cr en espinel y clinopiroxeno. Altas concentraciones indican una fuente mantélica.
V, Ti	Ambos altamente fraccionados en Fe-Ti óxidos (ilmenita o titanomagnetita). Si ellos se comportan diferentemente, Probablemente el Ti se fracciona en una fase accesoria, como esfeno o rutilo.
Zr, Hf	Elementos muy incompatibles que no se sustituyen en las fases mayores silicatadas (aunque ellos pueden reemplazar Ti en esfeno o rutilo).
Ba, Rb	Elementos incompatibles que substituyen K en K-felds, micas, o hornblenda. Rb substituye menos fácilmente en Hb que en K-felds y en micas, K/Ba permite distinguir estas fases.
Sr	Sustituye al Ca en plagioclasas (pero no en piroxenos), y, en menor cantidad, K en los K-felds. Se comporta como elemento compatible a baja presión donde plagioclase se forma temprano, pero como incompatible a mayores presiones, donde la plagioclase ya no es estable.
REE	Granate acomoda las HREE más que las LREE, y ortopiroxeno y hornblenda en menor proporción. Esfeno y plagioclase acomodan más las LREE. Eu^{2+} es fuertemente fraccionado por las plagioclasas.
Y	Comunmente incompatible (como HREE). Fuertemente particionado en el granate y anfíbola. Esfeno y apatito también concentran Y, por lo tanto la presencia de ellos como accesorios podría tener un efecto significativo.

Green (1980). Tectonophys., 63, 367-385.