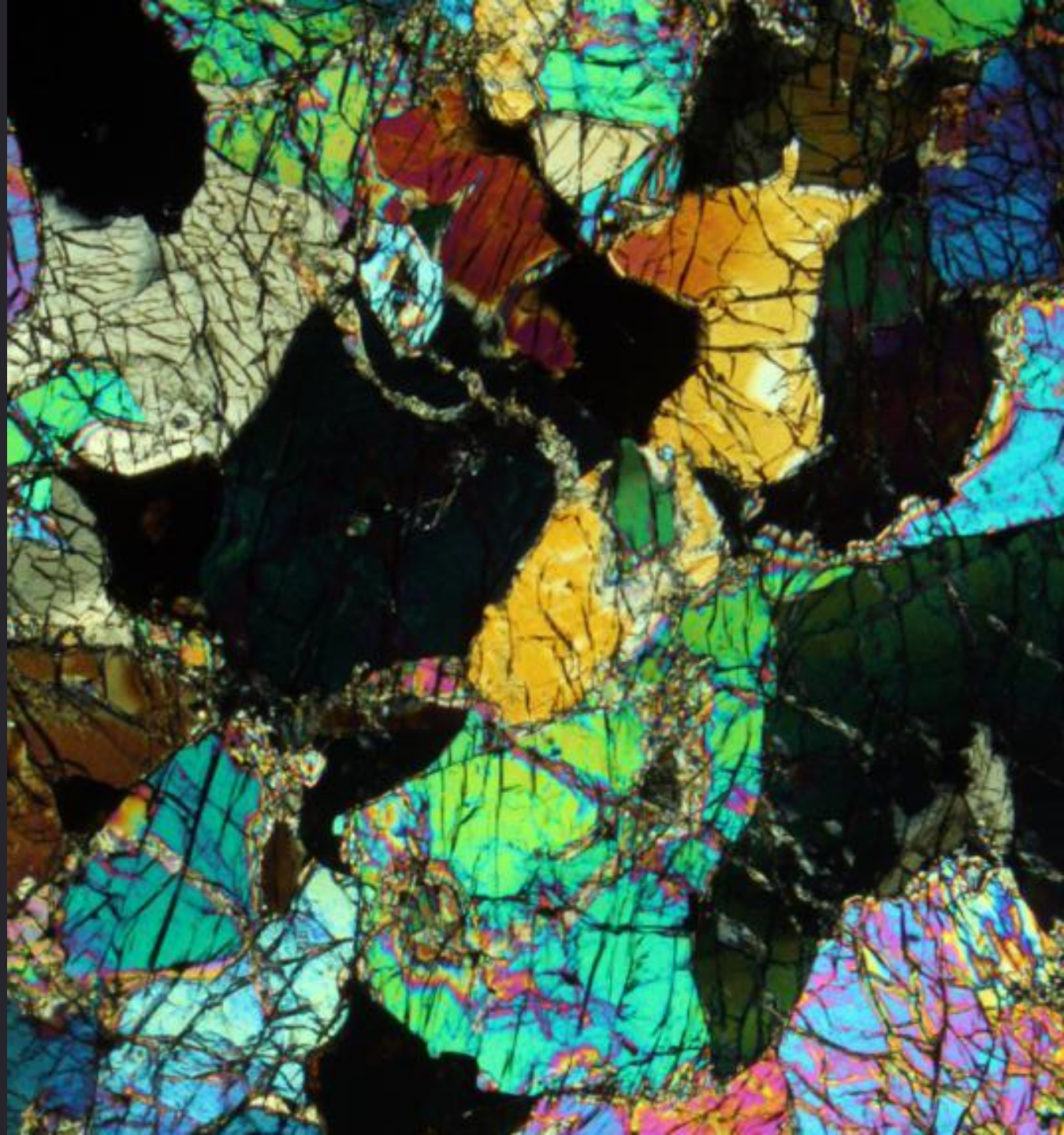


Petrología Ígnea y metamórfica

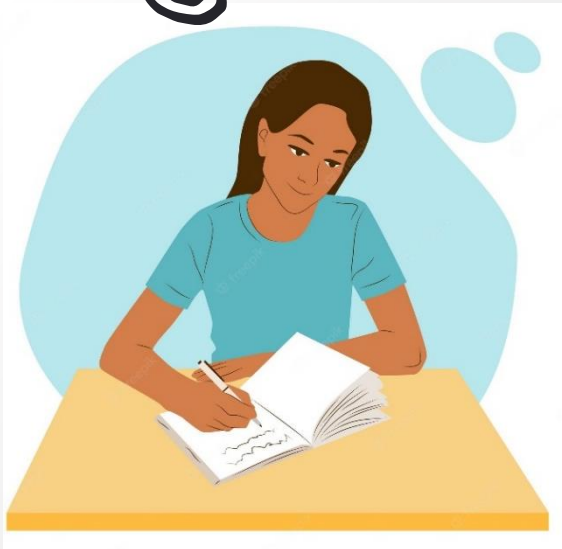
2024





TEMAS

- Relaciones de fase en magmas que cristalizan y rocas que se funden.



- I. ¿Qué le ocurre a un fundido cuando desciende la T?
- II. ¿Cómo cristaliza un magma?
- III. ¿Cuál es la diferencia entre cristalización en equilibrio y cristalización fraccionada?
- IV. ¿Cómo se comportan diferentes minerales con la disminución de la T?
- V. ¿Cómo procede la fusión de una peridotita?
- VI. ¿Cuál es la diferencia entre fusión en equilibrio y fusión fraccionada? ¿Por qué hablamos de fusión parcial?

EQUILIBRIO DE FASES



Condiciones de presión y temperatura bajo las cuales se forman diversos minerales y diferentes composiciones de rocas



Base termodinámica y experimental

Pero cuidado:

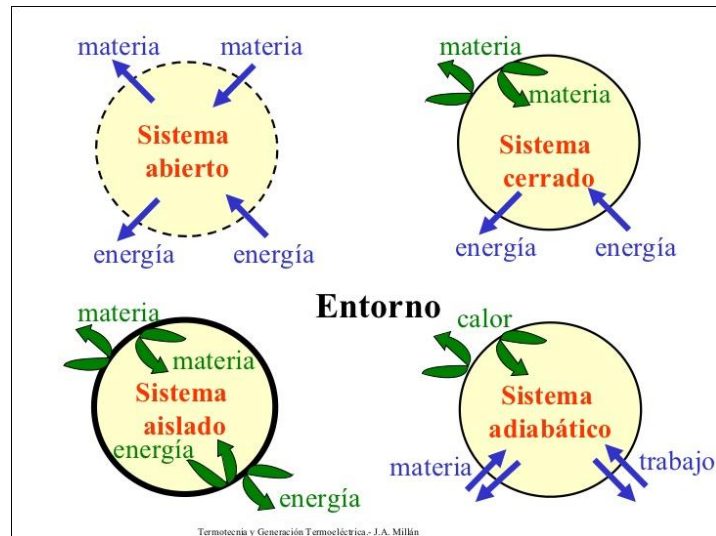
- Los magmas naturales son sistemas mucho más complejos que los simulados.

TERMODINÁMICA

DEFINICIONES

En estos diagramas se añade un componente para aproximarse a sistemas naturales.

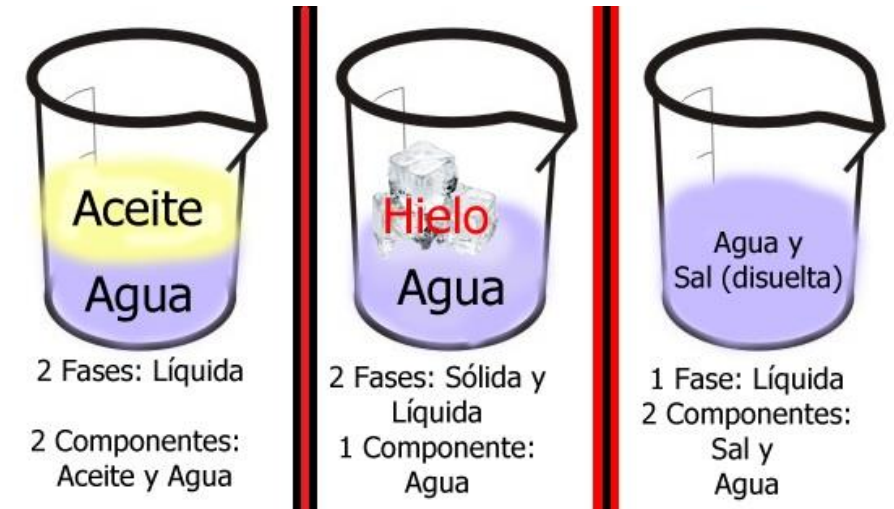
Un SISTEMA es una porción del universo que se pretende estudiar.



Un sistema puede ser ABIERTO (si puede transferir energía y materia hacia y desde el entorno), CERRADO (solo energía, como el calor, puede intercambiarse con el entorno) o AISLADO (no se puede transferir energía ni materia).

Una FASE se define como una parte de un sistema que es química y físicamente homogénea y que puede separarse mecánicamente de otras fases. Las fases pueden ser *gaseosas*, *líquidas* o *sólidas*.

Un COMPONENTE es el constituyente químico más pequeño, como el Si y el H₂O.



DEFINICIONES

TERMODINÁMICA

EQUILIBRIO de un sistema

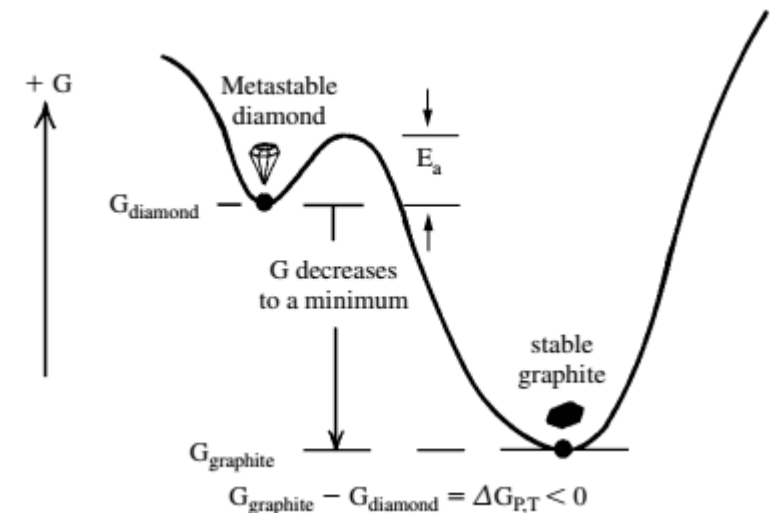
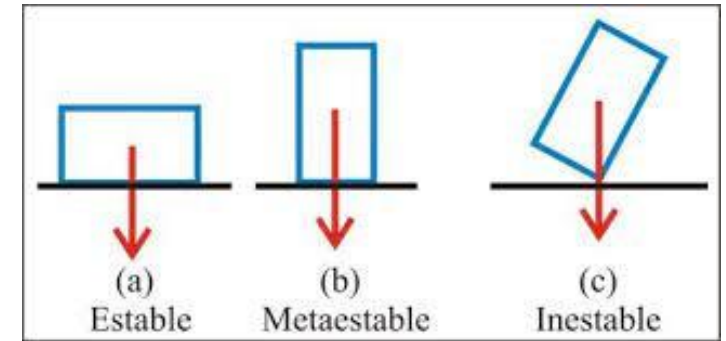
Es el estado en el que el resultado neto de las fuerzas actuantes es cero.

Los sistemas tienden espontáneamente a alcanzarlo.

ESTABLE: es el estado de menor energía.

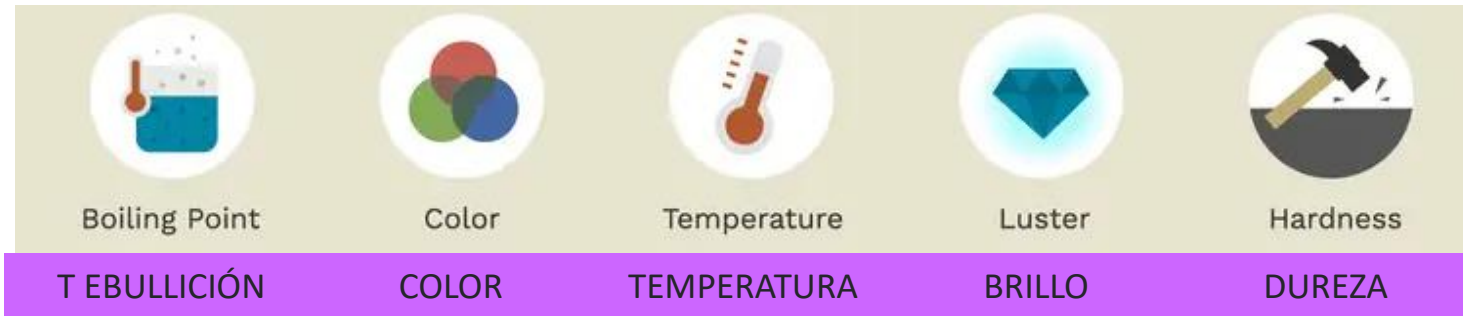
INESTABLE: la perturbación más pequeña provoca un cambio irreversible hacia el estado de menor energía.

METAESTABLE: puede persistir indefinidamente hasta que se supere una barrera energética (*energía de activación*) que mueva el sistema hacia su estado de menor energía, estable.



Las variables pueden ser:

❖ **INTENSIVAS** (no dependen del tamaño del sistema, cantidad de materia)



❖ **EXTENSIVAS** (dependen del tamaño del sistema, cantidad de materia).



El **GRADO DE LIBERTAD** de un sistema es la cantidad de variables **INTENSIVAS** que se requiere especificar para caracterizar completamente a un sistema en **EQUILIBRIO**.

REGLA DE LAS FASES

Nos cuenta cuántas fases (ϕ) pueden coexistir en un sistema en equilibrio de acuerdo al número de componentes (C) y grados de libertad (F).

$$F = 2 + C - \phi$$

El 2 en general indica P y T.
Son las variables intensivas que gobiernan el estado de un sistema a composición constante.

$$F = 1 + C - \phi$$

Experimentos con una variable fija, como la presión.

Pensamos a F como el número de variables que podemos intercambiar independientemente mientras que el resto no se modifica.

No resuelve qué variables son las independientes.

REGLA DE LAS FASES

En Petrología, utilizamos la regla de las fases y los diagramas de fases para reconocer **qué fases son estables** ante determinadas condiciones de **P, T y composición del fundido**.

Las **fases** corresponden a los **minerales** (cristales), al **fundido** y a los **gases** y los **componentes** son los **elementos químicos** expresados como óxidos, números de moles o fracción molar.

REPRESENTACIÓN



DIAGRAMAS DE FASES

Un diagrama de fases muestra qué fase o qué asociación de fases está presente (es estable) en un sistema bajo determinadas condiciones de P, T y composición (u otras variables intensivas).

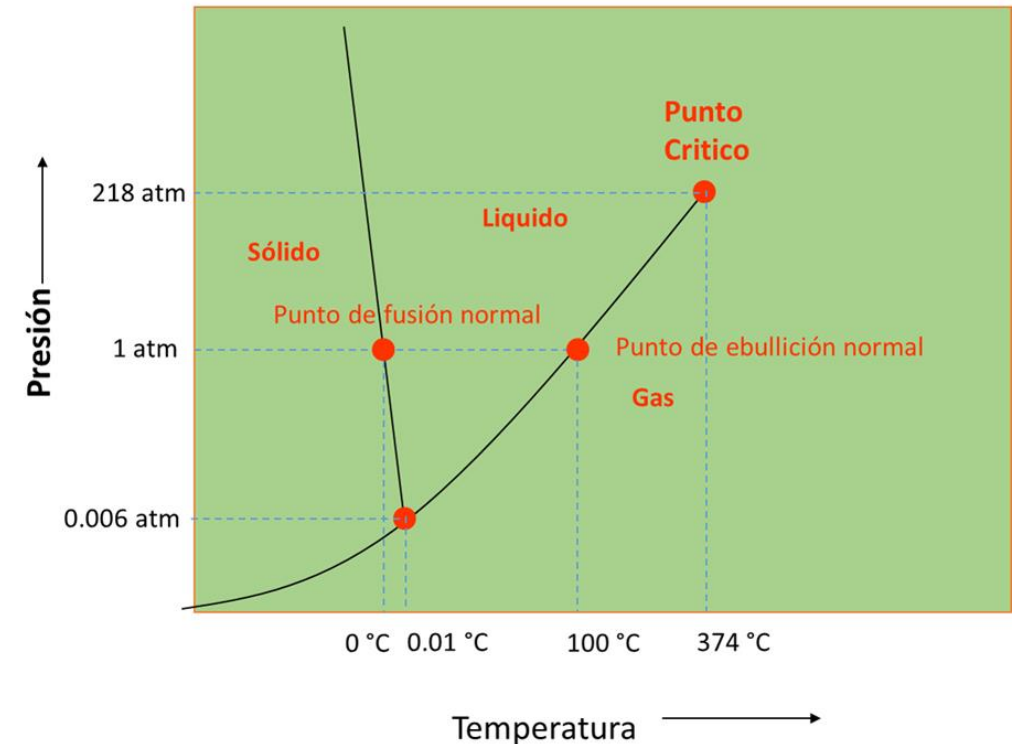
Gráfico de condiciones termodinámicas de equilibrio – Estado de equilibrio

DIAGRAMAS DE FASES= diagramas de estabilidad

En un diagrama de fases, las ÁREAS, LÍNEAS y PUNTOS tienen un significado:

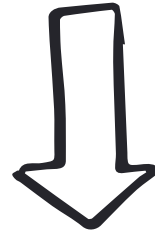
1. Los **campos de estabilidad** son áreas sobre las cuales una fase o conjunto de **fases es estable** y está en equilibrio.
2. Las **líneas** que limitan campos/áreas de estabilidad/equilibrio representan valores de variables intensivas donde las **fases** en los campos de estabilidad adyacentes **coexisten** de manera estable.
3. En los **puntos** donde se encuentran las líneas de límite entre áreas/campos de estabilidad/equilibrio, **todas las fases** de los campos de estabilidad adyacentes **coexisten** en equilibrio.

Diagrama de Fases del Agua



¡Cambios de estado!

DIAGRAMAS DE FASES= diagramas de estabilidad

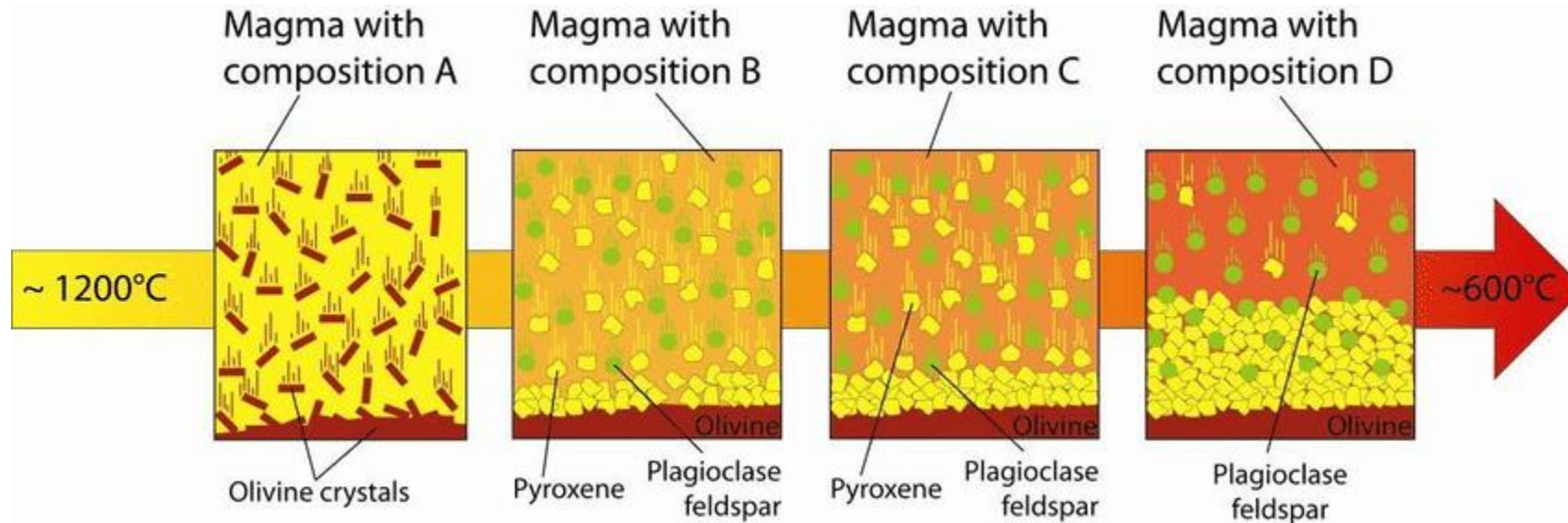


nos permiten
reconocer, comprender, estudiar y analizar
los cambios de estado en sistemas magmáticos:
¡¡fusión y cristalización!!

Se construyen a partir de los resultados de **experimentos** en laboratorio bajo la simulación de rangos de P y T que prevalecen en el manto y la corteza



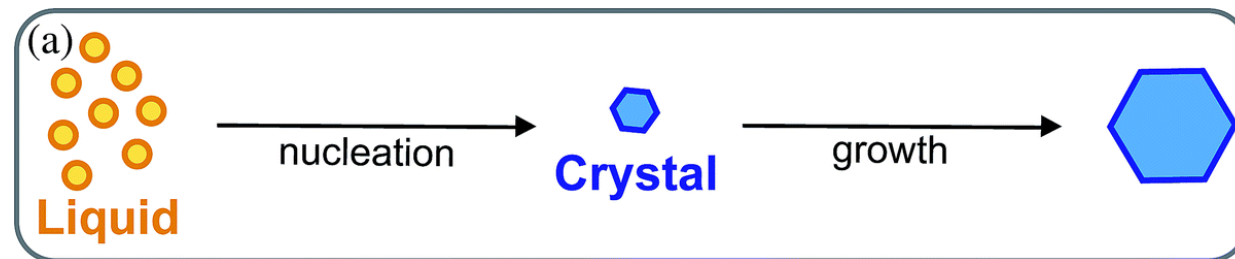
Cristalización del magma



Cristalización del magma

Una vez segregado de la roca fuente, la temperatura del fundido disminuye. Esta pérdida de T provoca que el magma atraviese su *líquidus* y comiencen a formarse fases cristalinas.

1. nucleación del cristal: proceso de formación de un embrión de iones (núcleo) a partir del cual se unen más iones durante el crecimiento del cristal. Los silicatos de estructuras simples (p.ej., nesosilicatos) tienen mayor facilidad de nucleación que aquellos de estructuras más complejas (p.ej., tectosilitactos).
2. crecimiento del cristal: adición de iones a núcleos o cristales preexistentes.

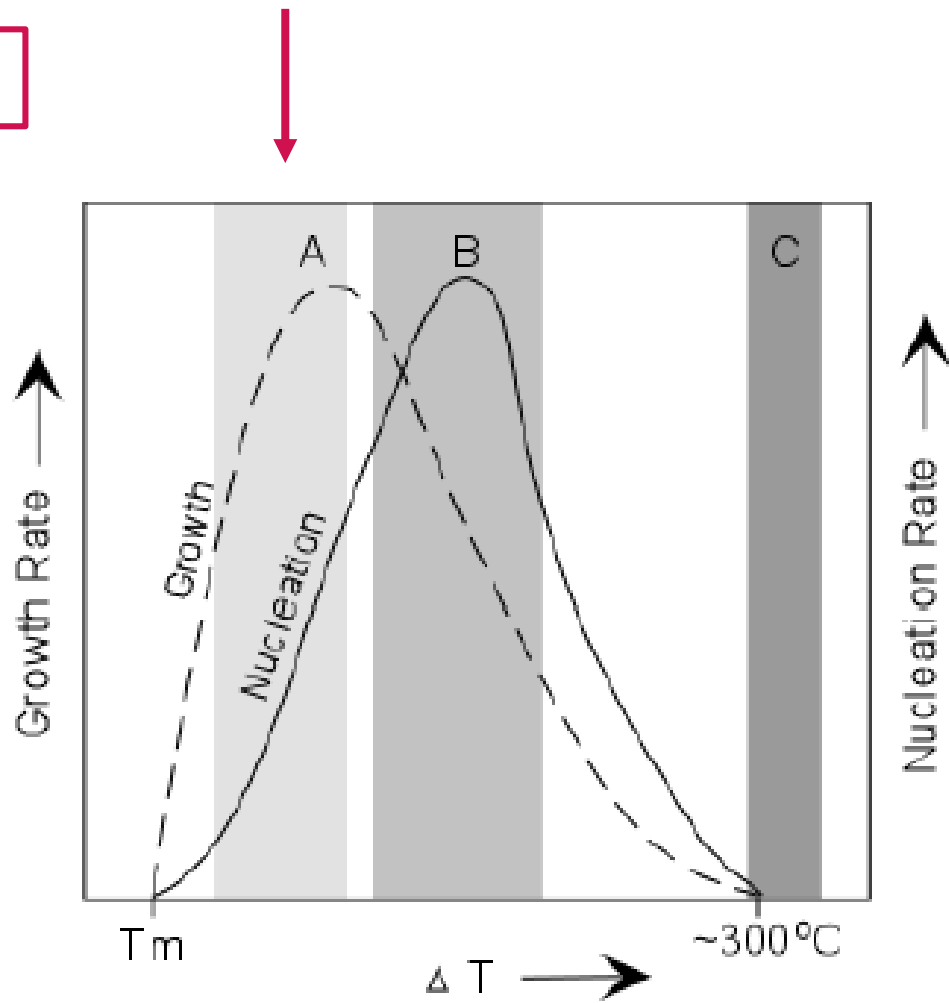


La tasa de nucleación y la tasa de crecimiento:

- Dependen de la tasa de enfriamiento: velocidad en que la temperatura desciende, $\Delta T/t$
- Influencian la textura que se formará en la roca

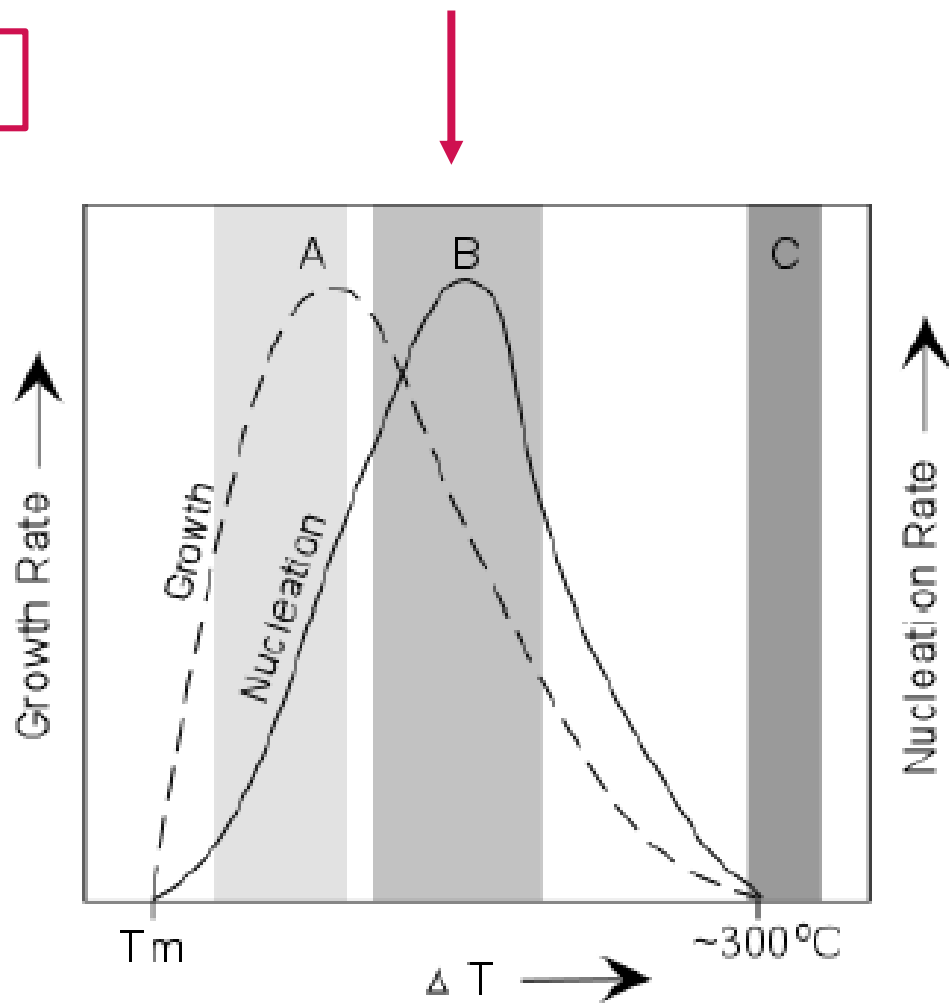
Grado de enfriamiento $\Delta T/t$	Tasa de nucleación	Textura
ALTO	ALTA	Muchos cristales. Grano fino. Ej.: Microlitos de la pasta.
BAJA	BAJA	Pocos cristales. Grano grueso. Ej.: Fenocristales.
MUY ALTA-EXTREMA	NULA	No se forman cristales. Ej.: Holohialina.

ZONA A



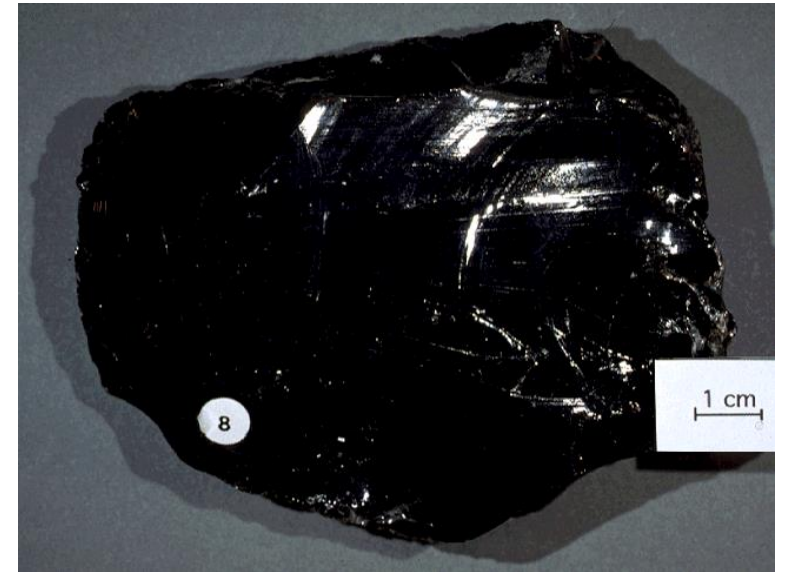
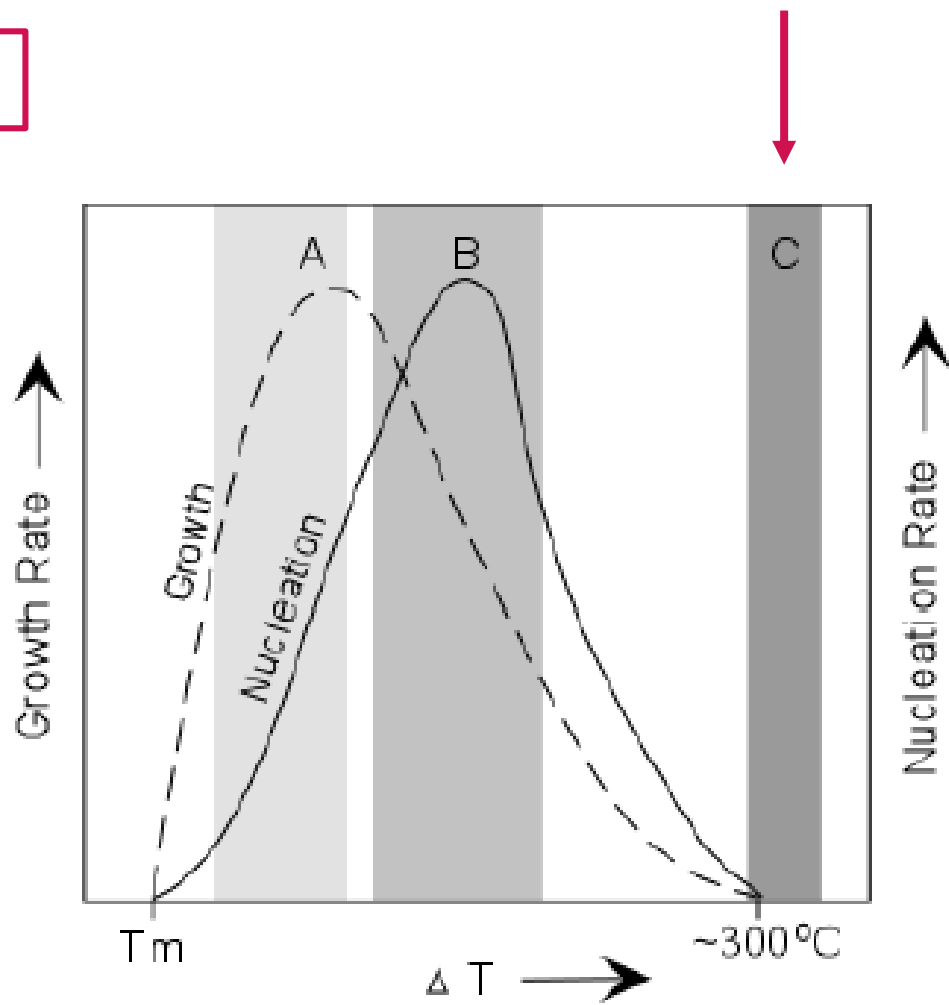
Magmas que se enfrían lentamente (baja tasa de enfriamiento, bajo $\Delta T/t$) tienen baja tasa de nucleación y alta tasa de crecimiento de los cristales.

ZONA B



Magmas que se enfrían rápidamente (alta tasa de enfriamiento, alto $\Delta T/t$) tienen alta tasa de nucleación y baja tasa de crecimiento de los cristales.

ZONA C



Magmas que se enfrían muy rápidamente (se congelan) tienen nula tasa de nucleación y de crecimiento de cristales.

¡Directamente no se forman cristales!

TEXTURA PORFÍRICA



Distribución BIMODAL del tamaño de grano de los cristales en una roca volcánica

SUGIERE

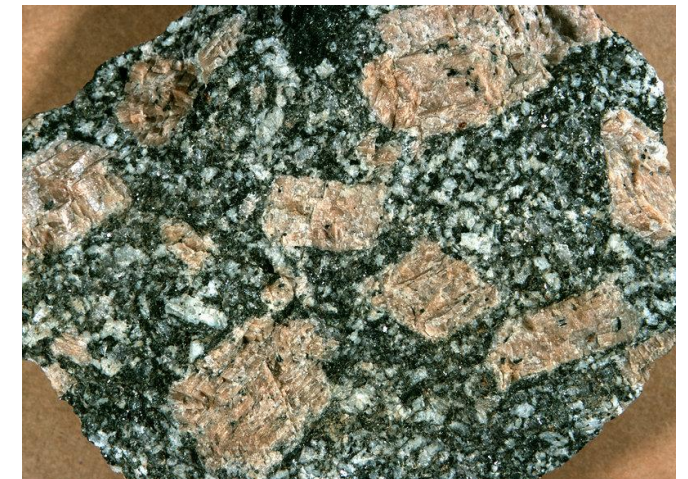
Dos episodios de cristalización que evidencian dos eventos de enfriamiento (lento y rápido)

¿Y la textura porfírica en una roca plutónica)

El caso de los granitos con fenocristales de feldespato alcalino (FA).

El FA no cristaliza antes que la plagioclasa de menor tamaño.
Único episodio de cristalización durante el enfriamiento continuo del magma.

En verdad la bimodalidad responde a diferentes tasas de nucleación de los minerales (menor en el FA).



Pasta *hialopilitica*: pequeños microlitos de plagioclasa en pasta vítrea

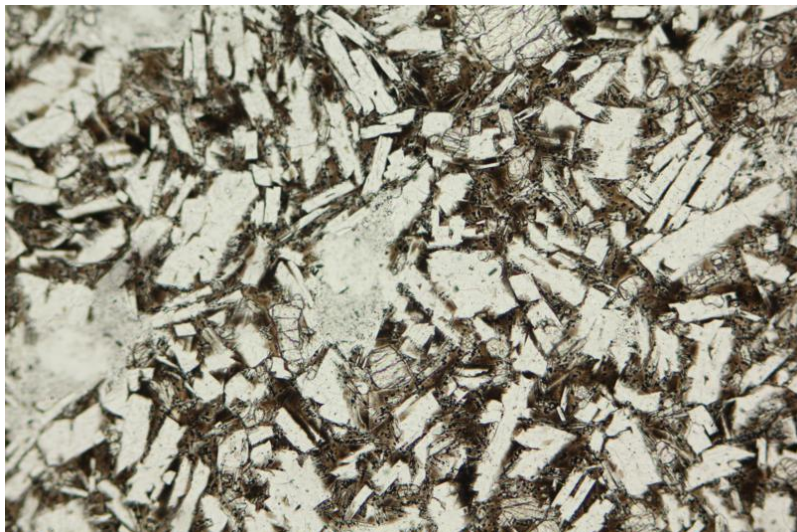


Fenocristales en pastas/matriz hipocriticalina (rocas volcánicas) a vítreas

Pasta *traquítica*: los cristales de feldespatos están orientados por flujo



Pasta *intersertal*: vidrio y microlitos variados

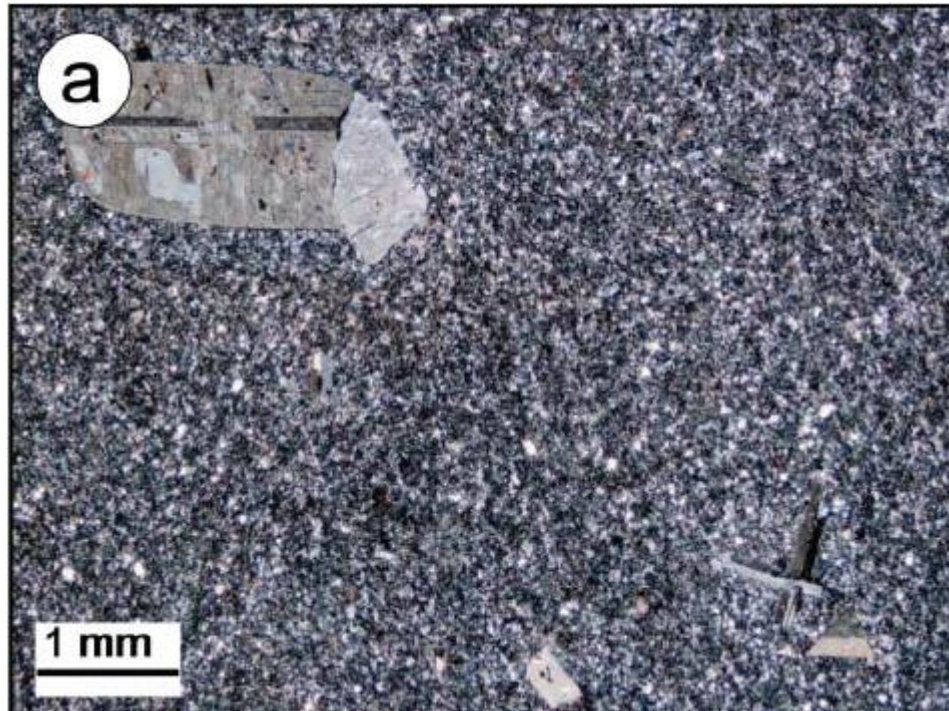


Pasta *vítrea* u holohialina



**Fenocristales en pastas/matriz
holocristalinas (rocas hipabisales)**

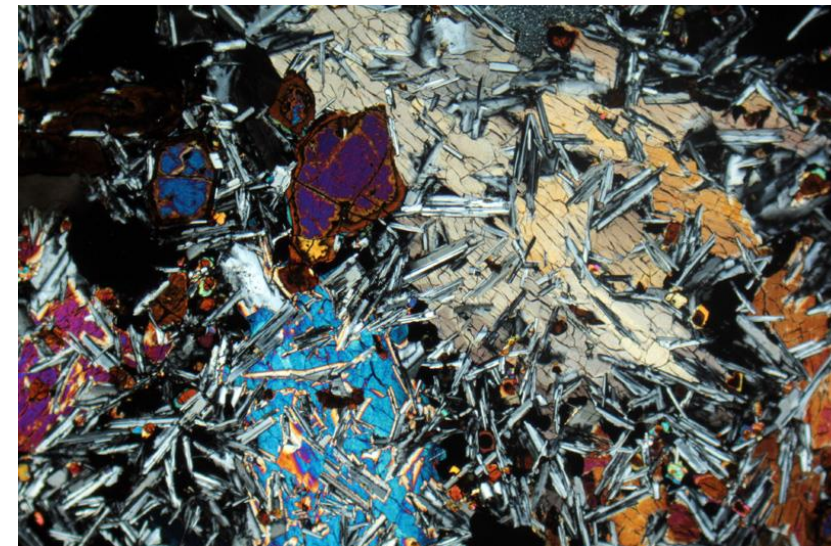
Pasta *microfelsítica*: finísimo mosaico de
cuarzo y feldespato por desvitrificación



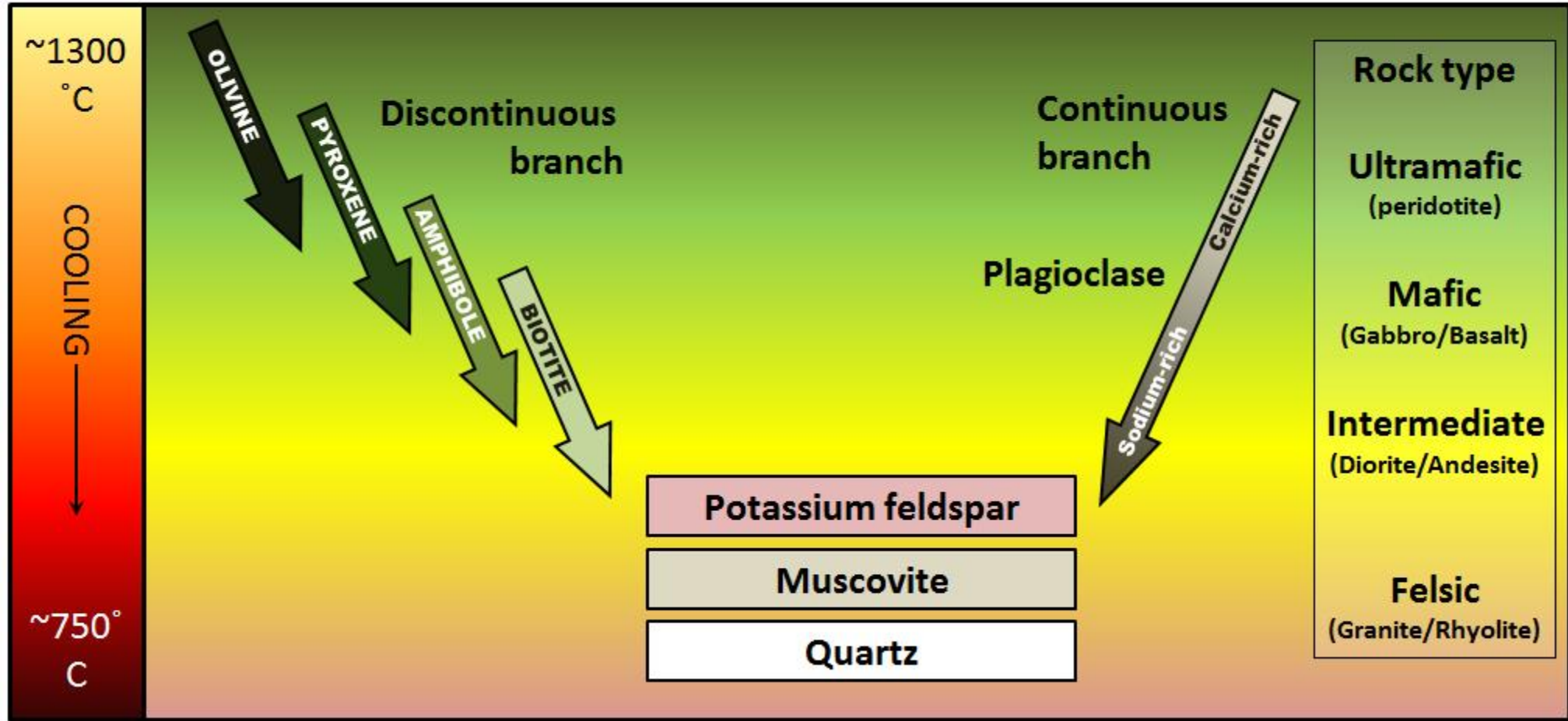
Pasta *intergranular*: microlitos de varios
minerales



Pasta *ofítica*: microlitos de plagioclasa sobre
grandes cristales de clinopiroxeno



Bowen's Reaction Series



DIAGRAMAS DE FASES DE SISTEMAS DE 1 COMPONENTE

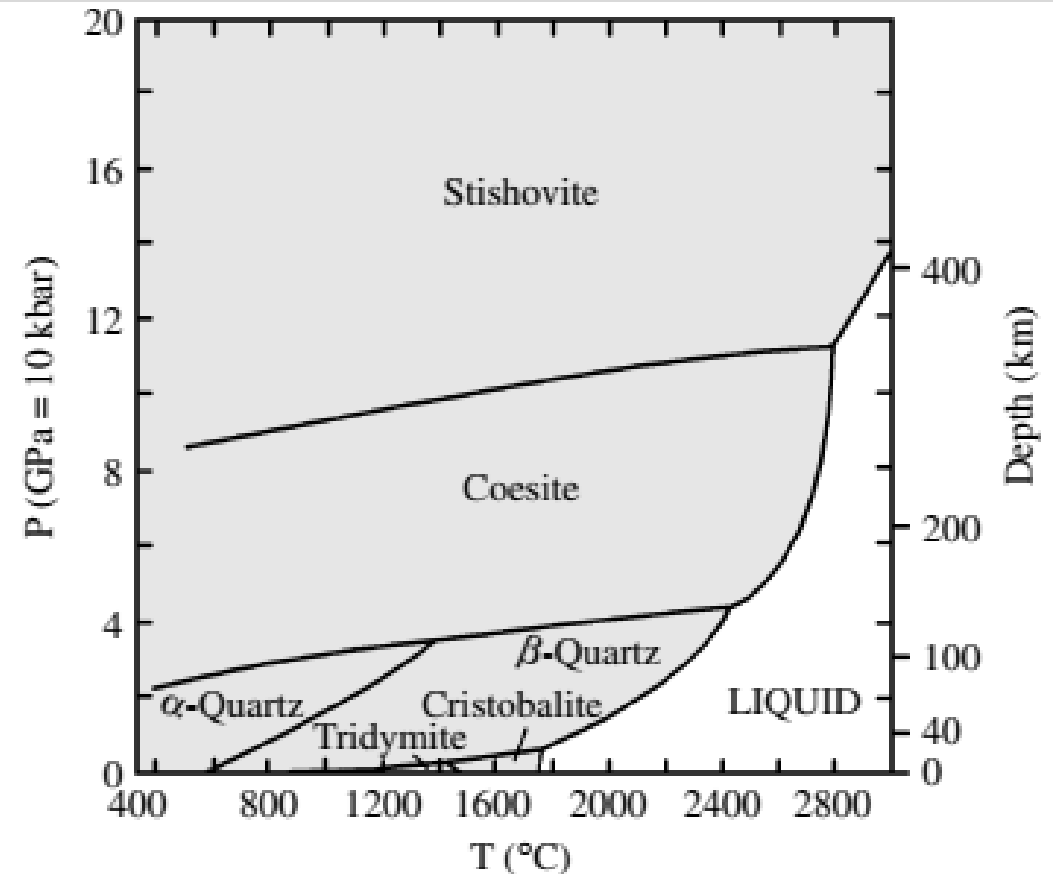
En estos diagramas se añade un componente para aproximarse a sistemas naturales.

En un diagrama de fases de un componente, P y T son independientes y la composición es constante.

Las áreas, líneas y puntos tienen el siguiente significado:

- Áreas:** son los campos de estabilidad sobre los cuales una fase o conjunto de fases es estable.
- Líneas:** representan valores de variables intensivas donde las fases en los campos de estabilidad adyacentes coexisten de manera estable. Las líneas son **univariantes** (sólo una variable intensiva debe ser definida).
- Puntos triples:** todas las fases de estos campos adyacentes coexisten en equilibrio. Este punto es **invariante**, es decir, **T y P tienen un valor fijo**.

Diagrama de fases del SISTEMA SÍLICE.



$$C = 1 (\text{SiO}_2) \quad F = 2 + C - \phi$$

F = 2 en los campos de estabilidad (P y T) , F = 1 (P o T) en las líneas y F = 0 en los puntos triples.

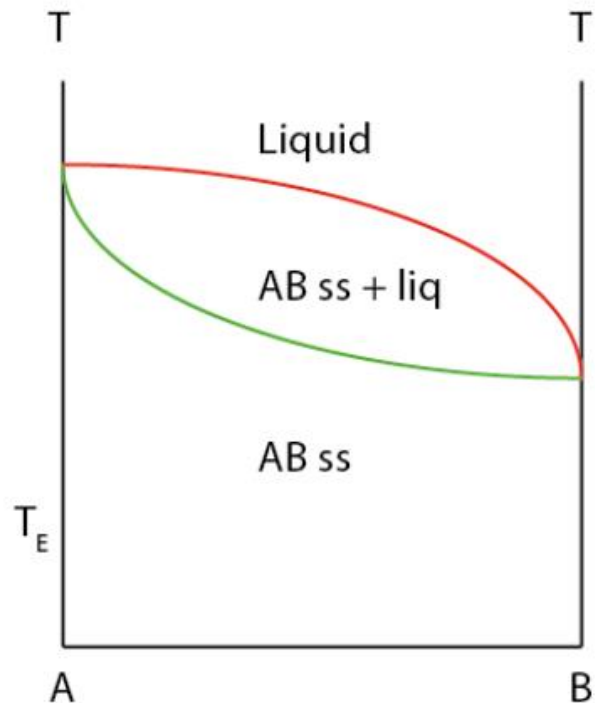
DIAGRAMAS DE FASES DE SISTEMAS DE 2 COMPONENTES (Sistemas binarios)

En estos diagramas se añade un componente para aproximarse a sistemas naturales.

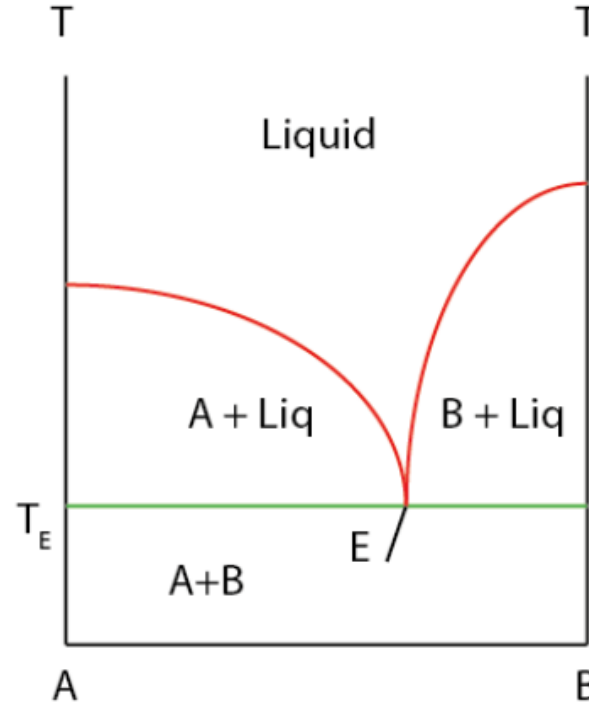
En un diagrama de fases de dos componentes, **una de las variables (P (isobárico), T (isotérmico)) debe ser fija** para poder representar en dos dimensiones. Dado que la composición de la mayoría de las fases en sistemas ígneos es variable, X no puede ser fijada.

Las áreas y líneas y puntos conservan los mismos significados que en diagramas de un componente.

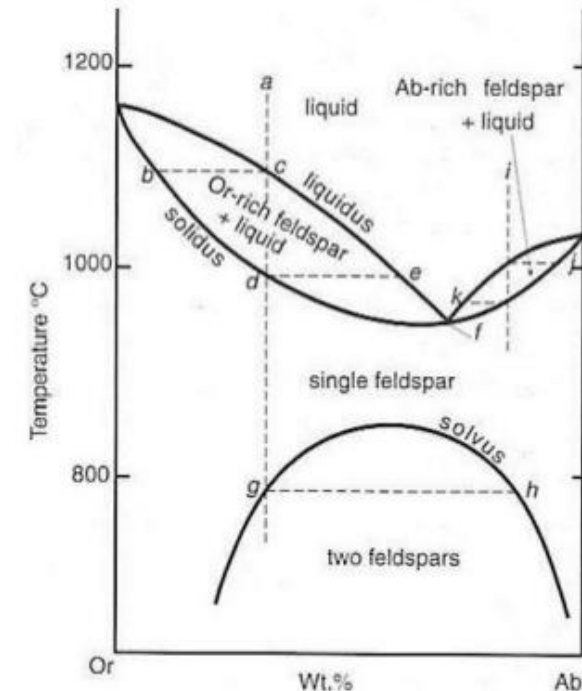
Sistema con solución sólida



Sistema con eutéctico



Sistema con solución sólida y eutéctico



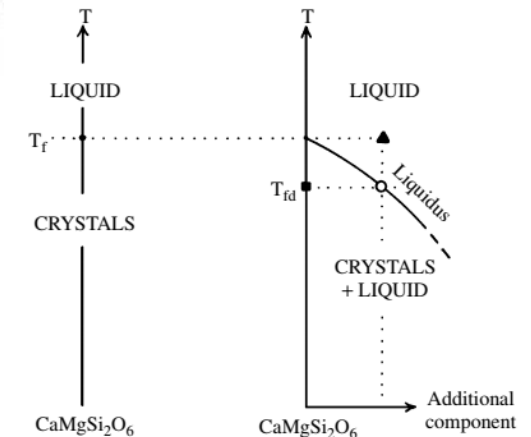
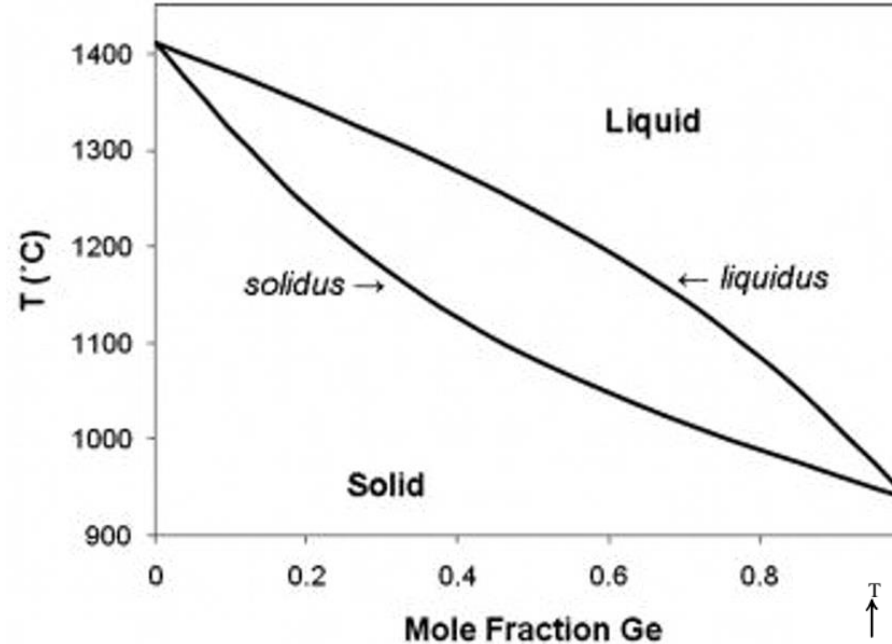
Sistemas con solución sólida

Línea o curva en contacto con la fase líquida: **liquidus**.

Línea o curva en contacto con la fase sólida: **solidus**.

La curva del liquidus tiene 3 significados:

1. Cada punto en la línea es la composición del líquido que coexiste con una fase sólida .
2. La curva muestra la variación de la composición del líquido con el descenso de T a medida que se agrega un segundo componente.
3. Por encima de la línea el sistema es sólo fundido (líquido).

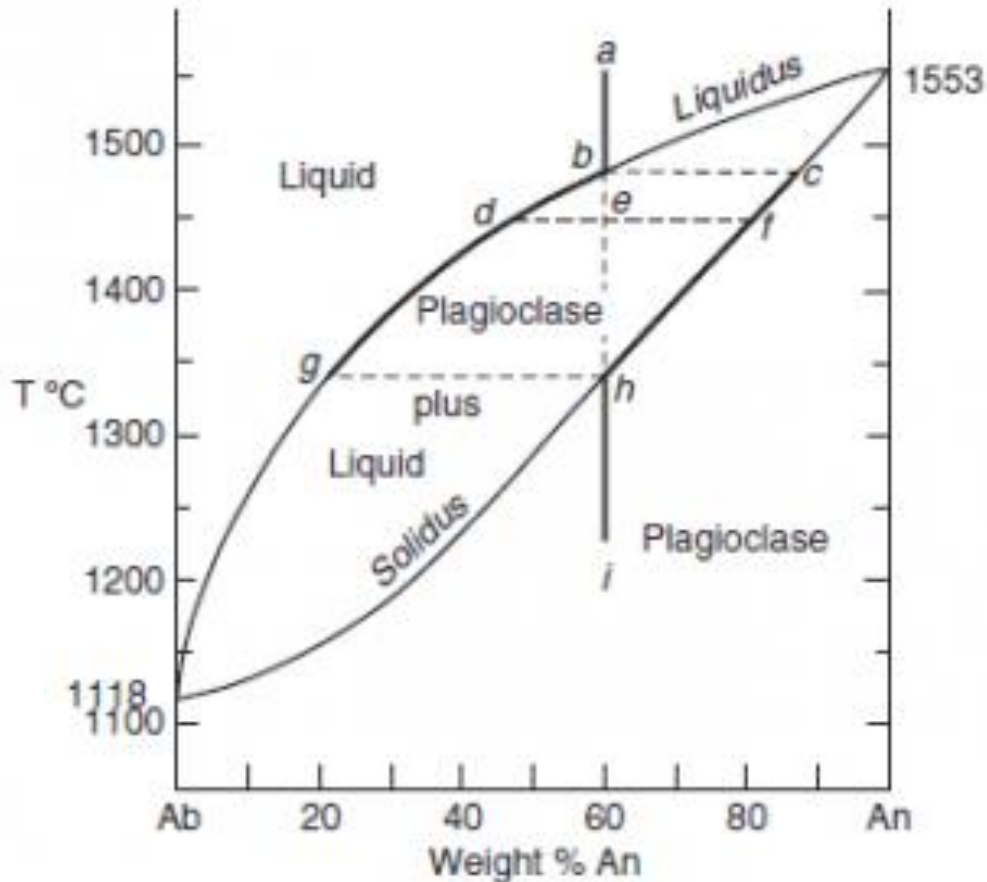


Isopleta: línea de composición constante.

Isoterma: línea de temperatura constante.

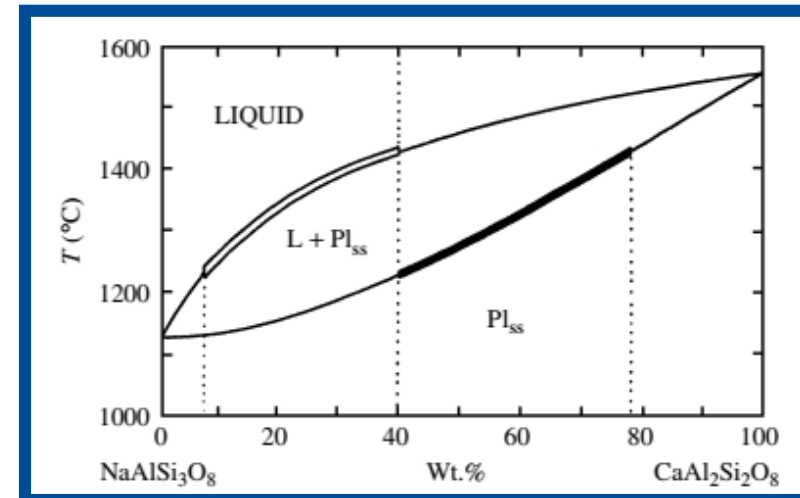
Sistema binario con solución sólida: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{Ab}) - \text{CaAlSi}_2\text{O}_8(\text{An})$

Diagrama de fases de la solución sólida de la plagioclasa.
Presión fija de 1 atm (0.1 Mpa).



Reglas de las fases isobárica ($F=1+C-\phi$)
En a: $F=2$
En b, d, g: $F=1$
En e: $F=1$
En c, f, h: $F=1$
En i: $F=2$

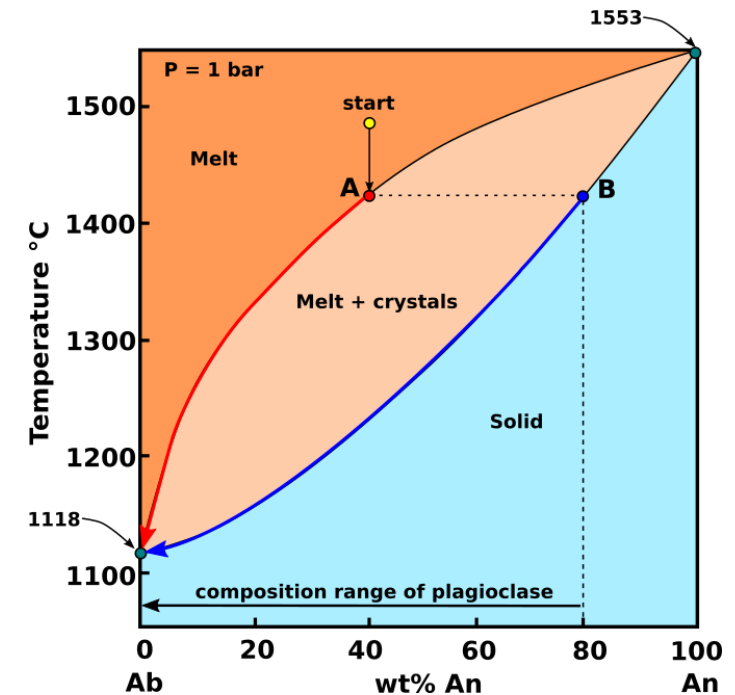
A cualquier T dentro del campo de estabilidad de la plagioclasa y el fundido siempre los cristales son más ricos en anortita que el líquido (más albítico). A medida que desciende T, los cristales también se vuelven más albíticos.



Zonación en plagioclasa



La velocidad de difusión de los iones en el cristal de plagioclasa es más lenta que los cambios químicos que ocurren en el líquido durante la cristalización. Por ello los cambios composicionales en la solución sólida de la plagioclasa se observan no continuos en el cristal si no más bien dando saltos y definiendo una zonación .



Sistemas eutécticos binarios

EUTÉCTICO: punto de convergencia de las curvas del liquidus, separa los campos con líquido del campo con sólo fases sólidas. Es un **punto invariante**.

T_E : temperatura del eutéctico, tiene un único valor!

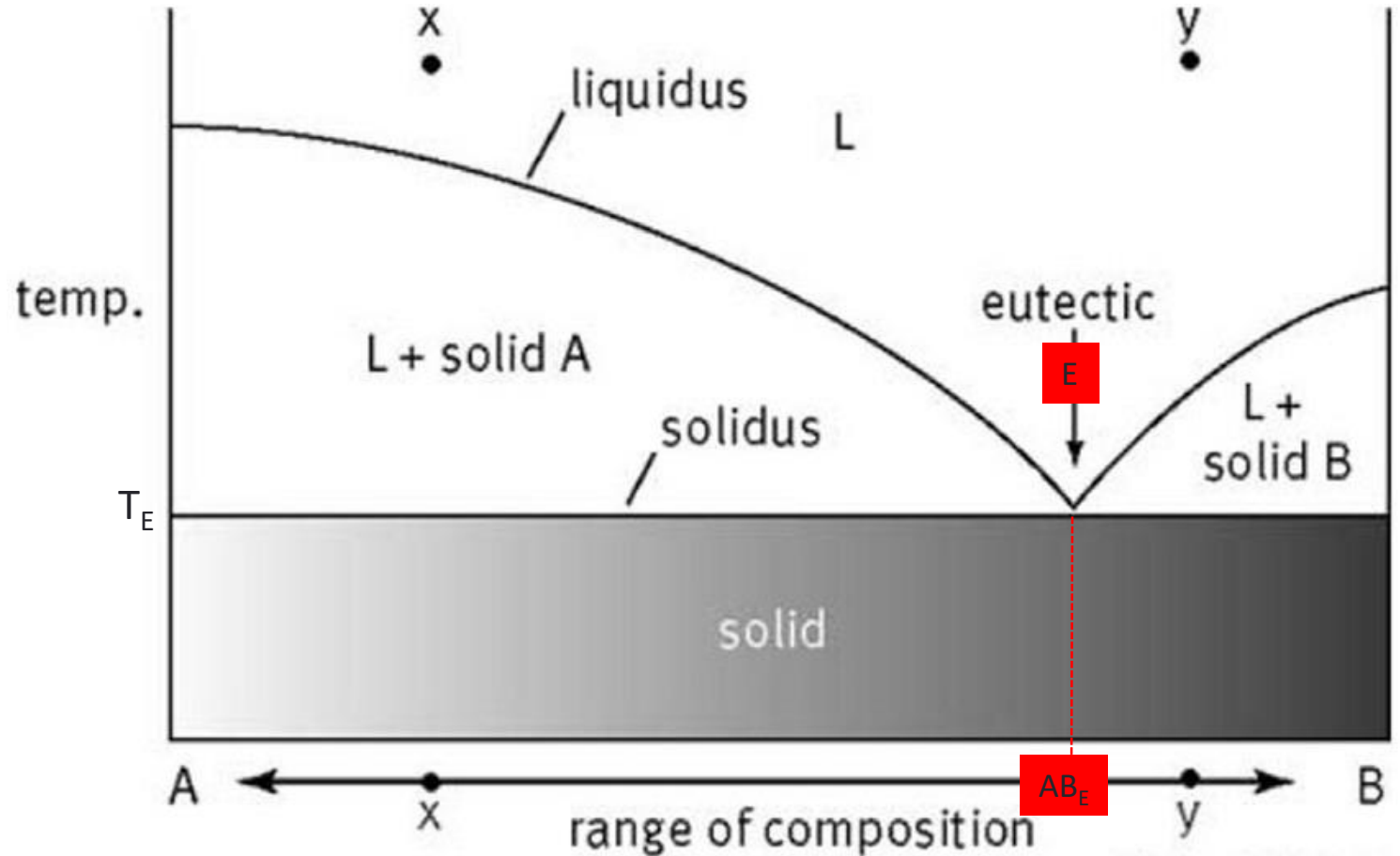
La T_E permanece fija hasta que se consume todo el líquido residual y cristalizan las dos fases completamente.

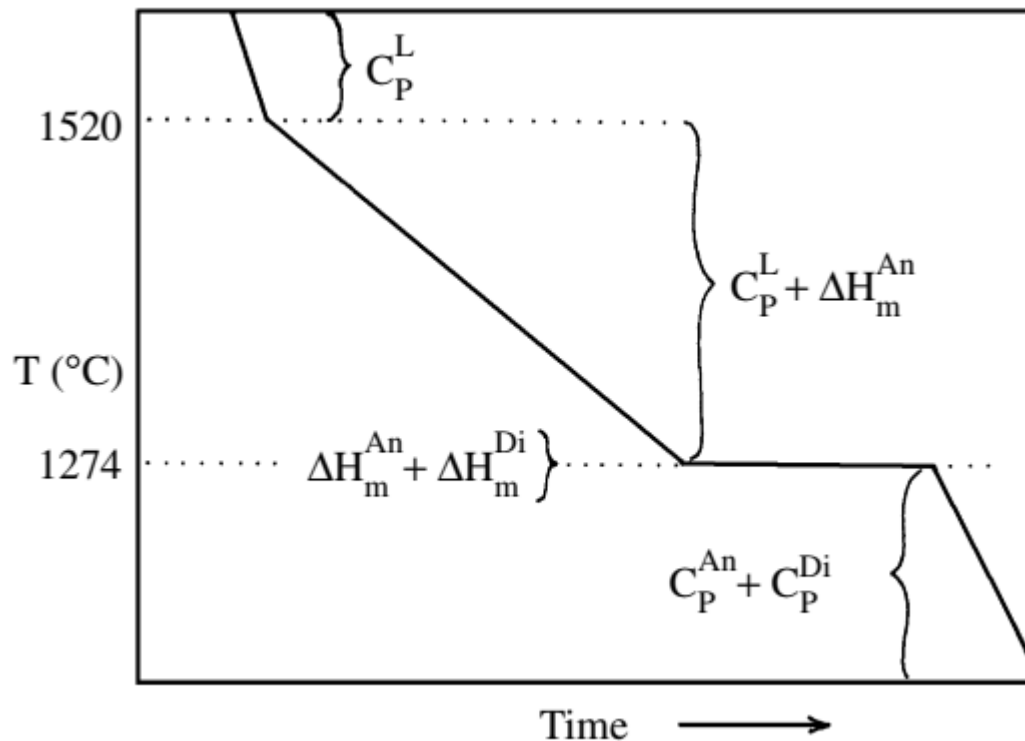
La T_E es la T mínima a la que el líquido es estable!

Composición del eutéctico:
composición en E (fija).

Entonces...

en el **eutéctico $F=0$!!**



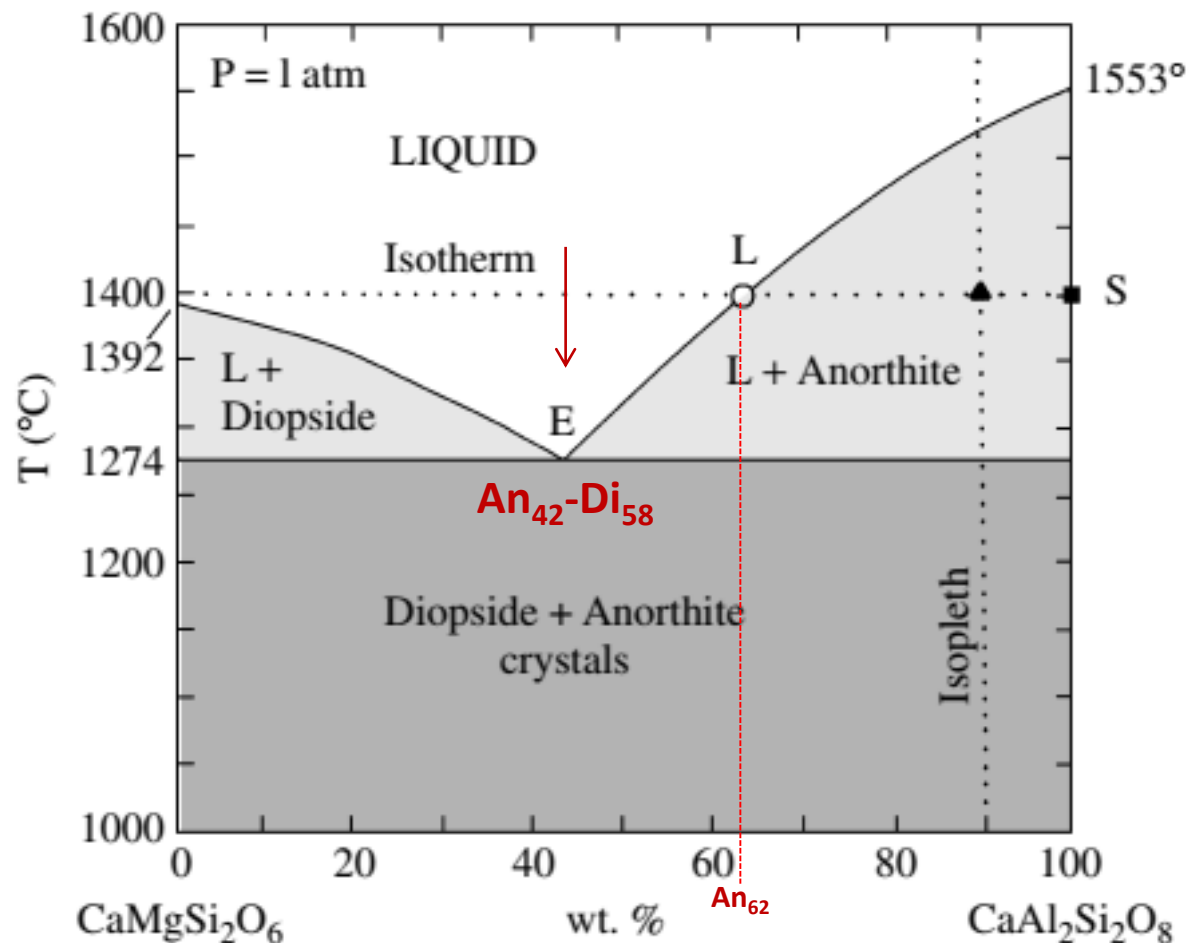


La T decae continuamente a medida que se pierde el calor por encima de la T_E .

A la T_E , la T se mantiene constante aunque el sistema pierde calor porque esta pérdida se compensa con el **calor generado por la cristalización (calor latente de cristalización)** de la anortita y el diópsido.

La T del sistema vuelve a decrecer una vez que todo el fundido cristalizó.

Sistemas eutécticos binarios: $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ (Di)- $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (An)



Cristalización de clinopiroxeno (Di) y plagioclasa (An) en un magma basáltico a 1 atm.

Leamos el diagrama en las condiciones marcadas con un triángulo relleno negro:

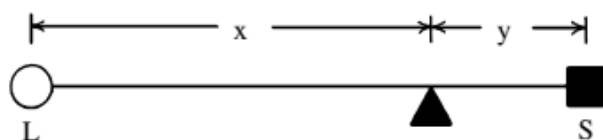
- $T = 1400^\circ\text{C}$
- La composición general del sistema es An_{90} (Di_{10})
- En el sistema coexisten en equilibrio la fase líquida y sólida.
- El fundido tiene la composición L, que es el punto en la isoterma que intersecta el liquidus a la isopleta: An_{62}).
- El sólido tiene la composición S, que es anortita pura.
- Si la T desciende, la composición del líquido residual de la cristalización se vuelve más rico en el componente Di hasta llegar a la composición de E.
- Las fases que cristalizan tienen siempre la composición pura anortita y diópsido.

¿Cuál es la proporción entre las fases?
 ¿Cuántos cristales y cuánto fundido forman
 nuestro magma?

*La proporción entre fases no
 modifica a las variables intensivas
 que definen mi sistema pero sí lo
 hace su composición!!*



Regla de la palanca



$$Sy = Lx$$

pero como $S+L=1$, entonces: $L=1-S$

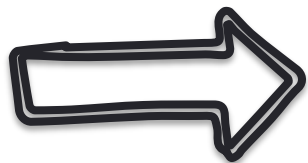
$$Sy = (1-S)x$$

$$Sy = x - Sx$$

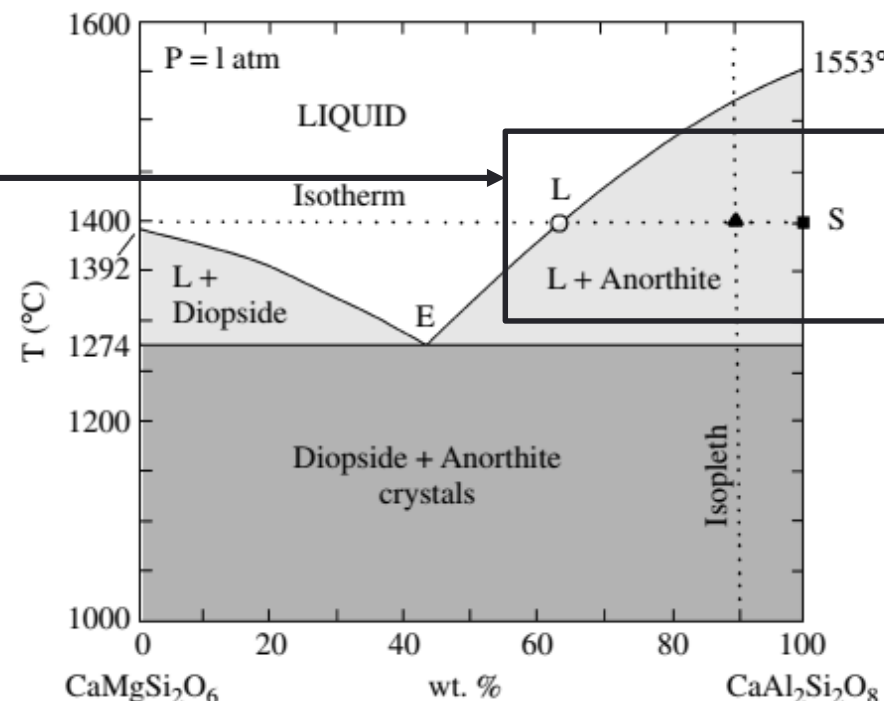
$$Sy + Sx = x$$

$$S(y+x) = x$$

ENTONCES

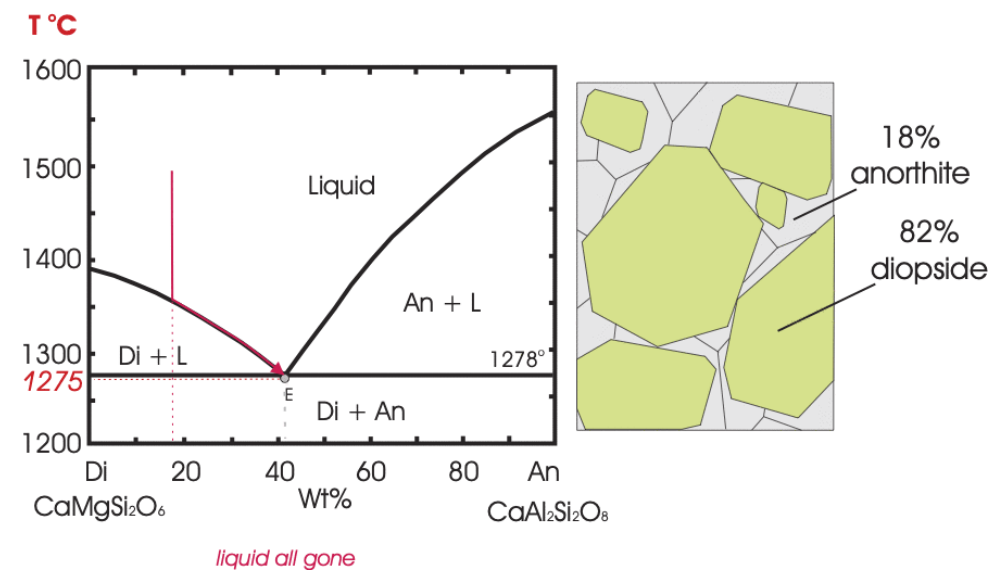
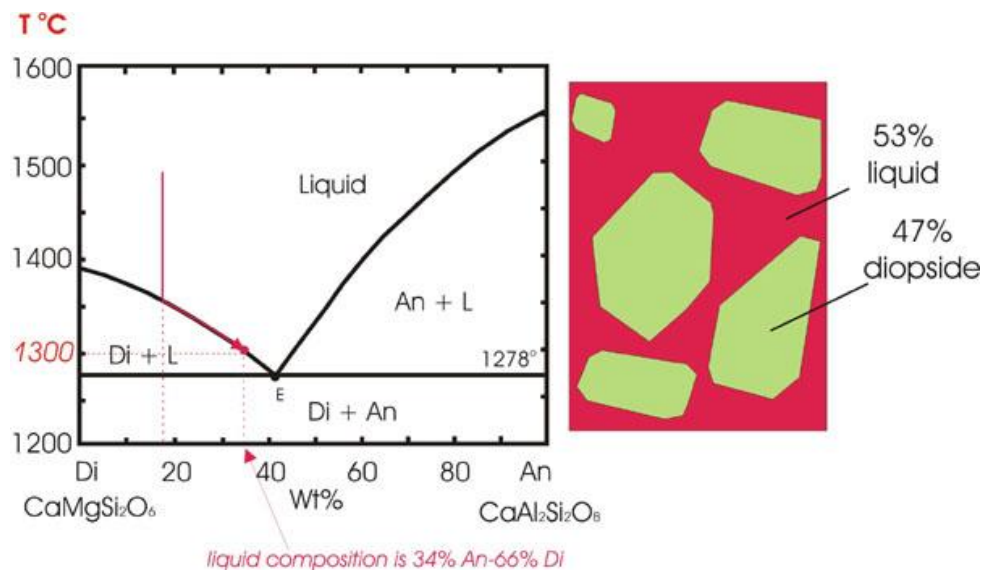
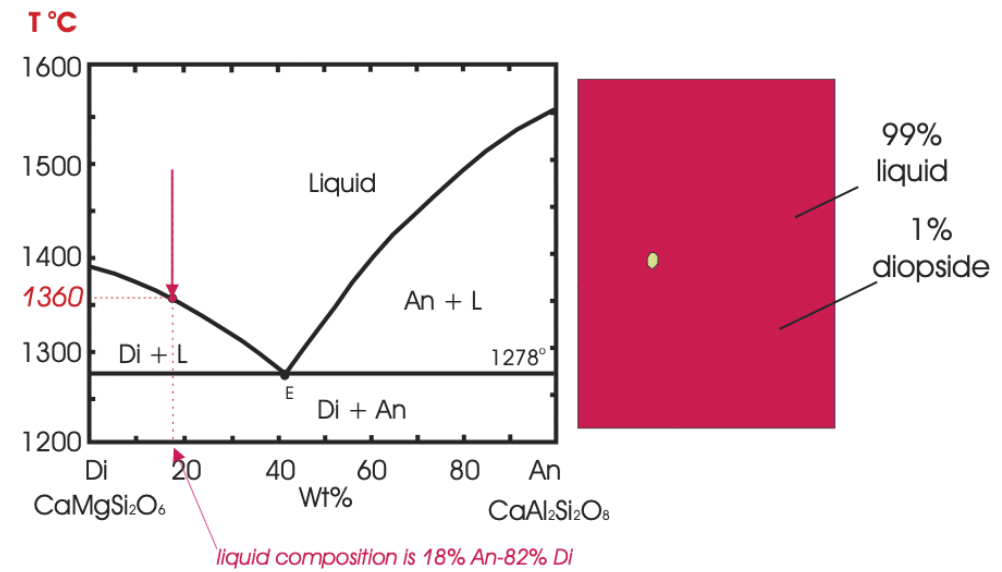
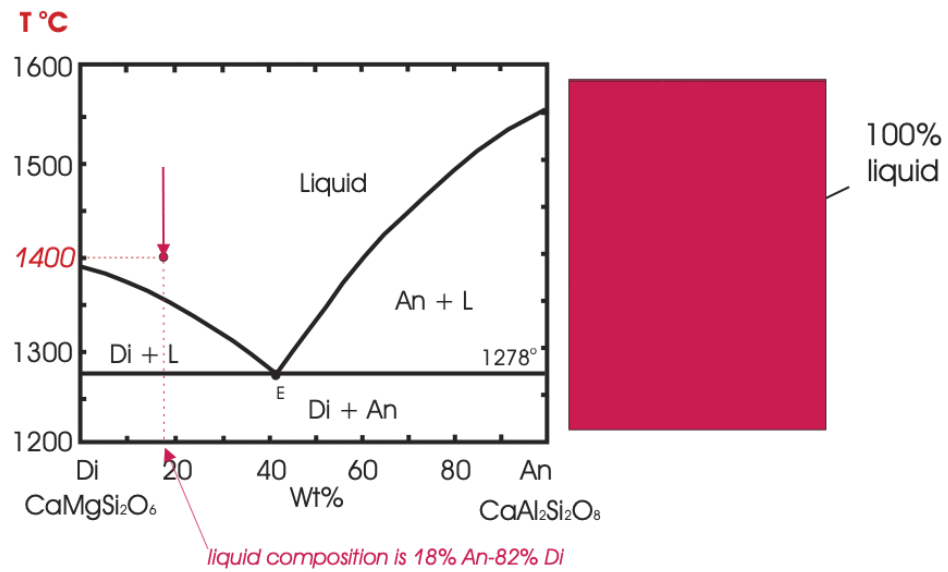


$$S = \frac{x}{(y+x)}$$

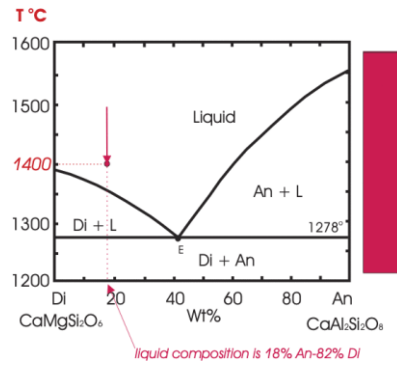


En este caso, la proporción
 fundido:cristales en las condiciones
 del triángulo es 75:25.

El diagrama de fases del sistema Di-An sirve como un modelo muy simplificado de cómo cristaliza un magma basáltico.

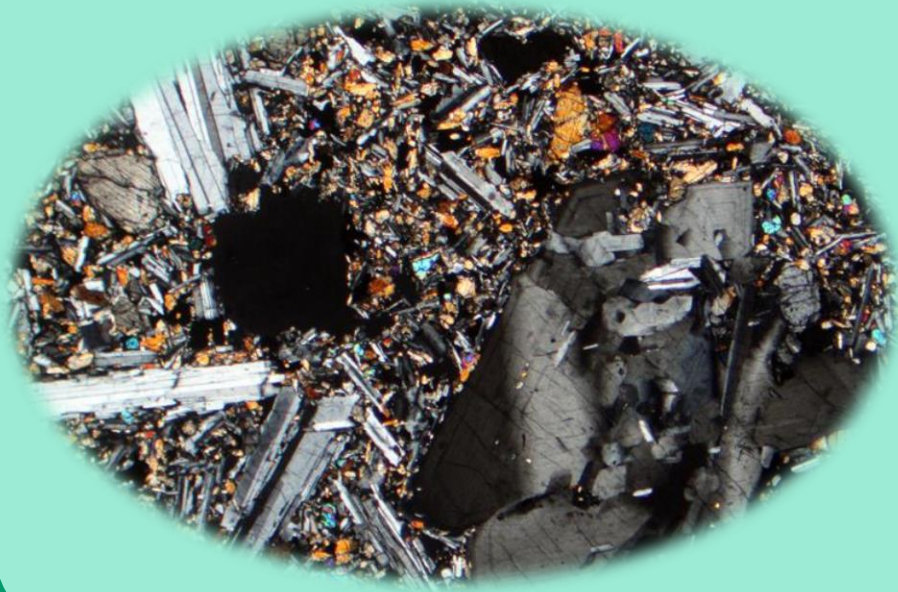


- ✓ En un líquido rico en el componente $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ aparecerá primero con el descenso de temperatura la plagioclasa cálcica y luego el piroxeno (p.ej., tendremos basaltos con fx de pl y px en la pasta).

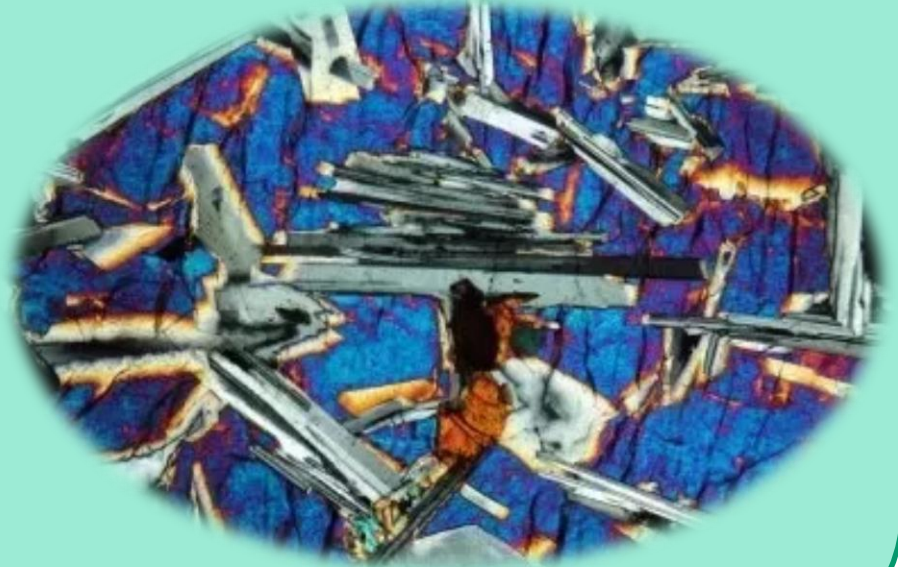


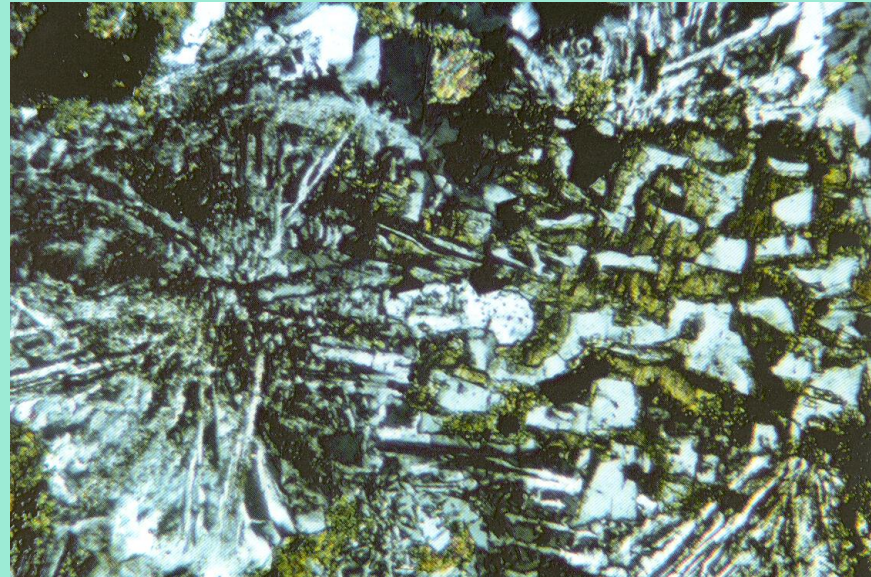
- ✓ Si el fundido es más rico en Mg, el piroxeno se formará primero (p.ej. tendremos un basalto con fx de px y pl en la pasta o una textura ofítica).

Textura porfírica



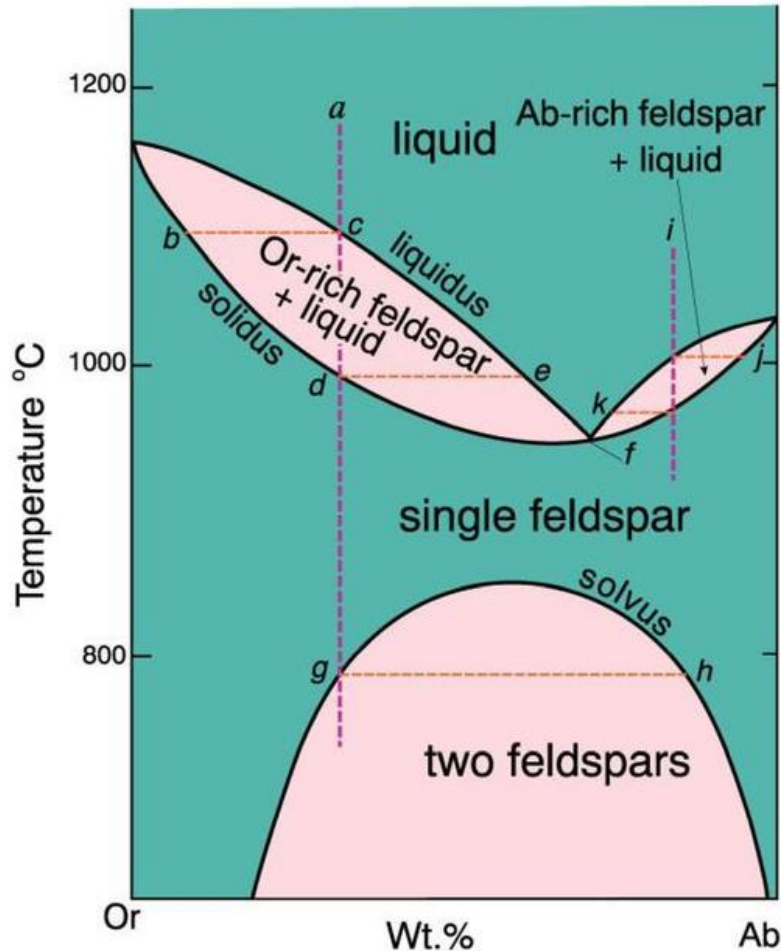
Textura ofítica





Textura gráfica de intercrecimiento entre An y Di
Evidencia de cristalización en un punto eutéctico.

Sistemas con solución sólida y eutéctico: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{Ab}) - \text{KAlSi}_3\text{O}_8(\text{Or})$



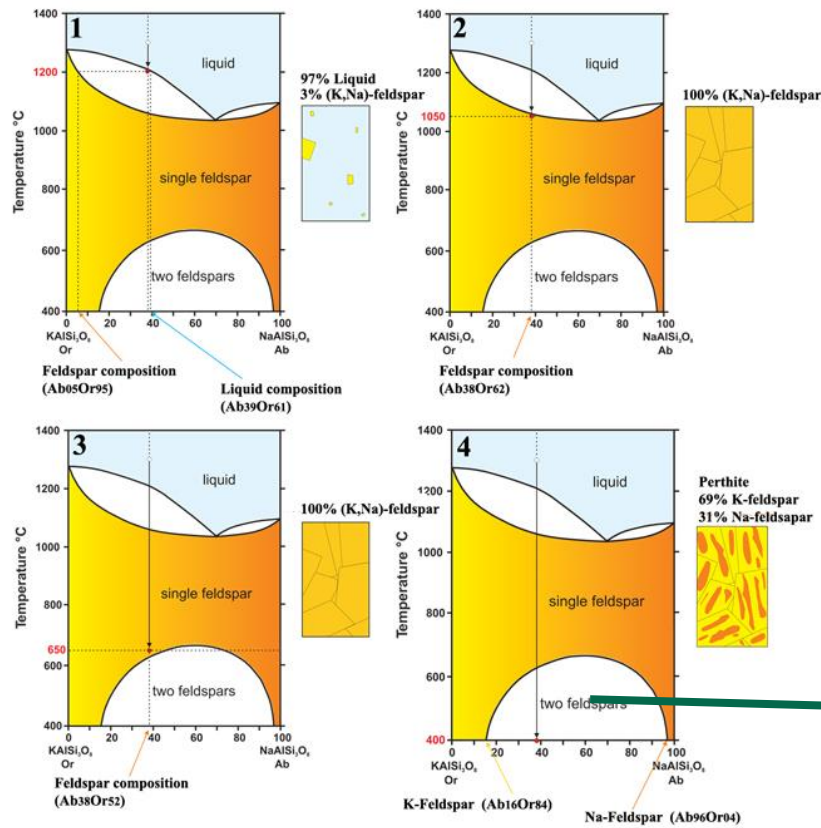
SOLVUS: implica la separación de dos fases sólidas de una solución sólida homogénea. Se debe a las diferencias en el tamaño de los iones.

T sobre el solvus: la energía vibracional en la estructura cristalina permite que los minerales acepten más iones y es posible la cristalización de un único feldespato porque el rango de sustitución es completo ("solución sólida completa").

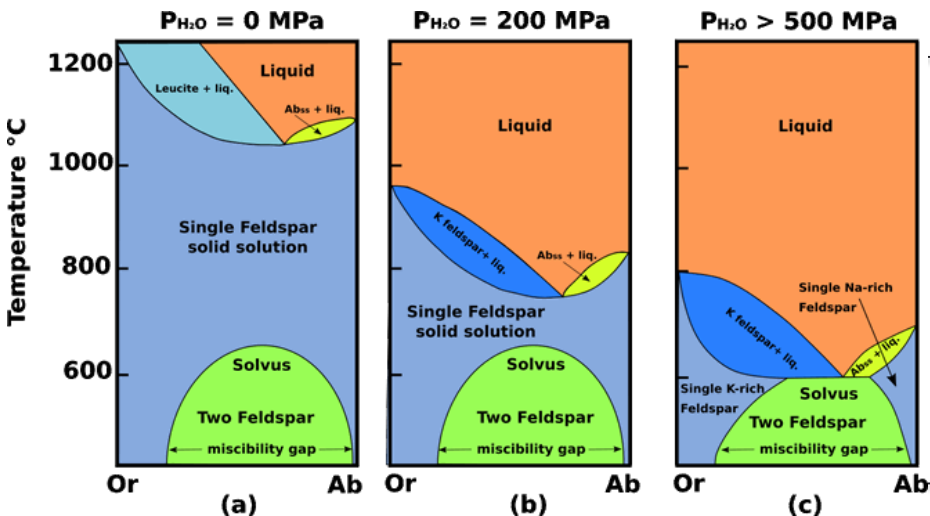
T debajo del solvus: las estructuras cristalinas pierden energía vibracional y se vuelven más rígidas, aceptando menos iones. Un sólo feldespato homogéneo se separa en dos feldspatos; uno es más rico en K (composición g) mientras que el otro es más rico en Na (composición h). Como la movilidad de los iones es limitada, la separación raras veces forma cristales separados, más bien el resultado será la *exsolución* de una fase en otra.

La traza del *solvus* cambia de posición con la temperatura. Una línea horizontal trazada por cualquier temperatura inferior a la línea curva del *solvus* intersecta dos puntos que representan las composiciones respectivas de los dos feldspatos que pueden coexistir en equilibrio a esa temperatura.

Debajo del *solvus* cualquier feldespato sufre desmezcla y exsuelve una fase en el cristal original formando finas lamelas o un intercrecimiento que llamamos **PERTITAS** (si la composición gral. es rica en K y la exsolución es rica en Na) o **ANTIPERTITAS** (si la composición gral. es rica en Na y la exsolución es rica en K).



Textura pertítica



Una mayor contribución de agua en el magma baja el punto de fusión (estabiliza la fase líquida por un rango mayor de T) a expensas de la fase sólida, con una disminución entonces del campo de estabilidad del feldespato único (que no acepta agua en su composición!). Pero no modifica mucho la posición del *solvus*. permite la cristalización de dos feldespatos individuales, uno potásico y otro sódico en un rango más amplio de T.

DIAGRAMAS DE FASES DE 3 COMPONENTES (Sistemas ternarios)

La adición de sucesivos componentes a un sistema hace que sea cada vez más difícil visualizar las variables que lo definen. Idealmente, deberíamos tener una dimensión para cada variable en F , pero estamos limitados a la representación gráfica 2D.

Los diagramas de presión y temperatura fueron fáciles de representar para sistemas de un componente.

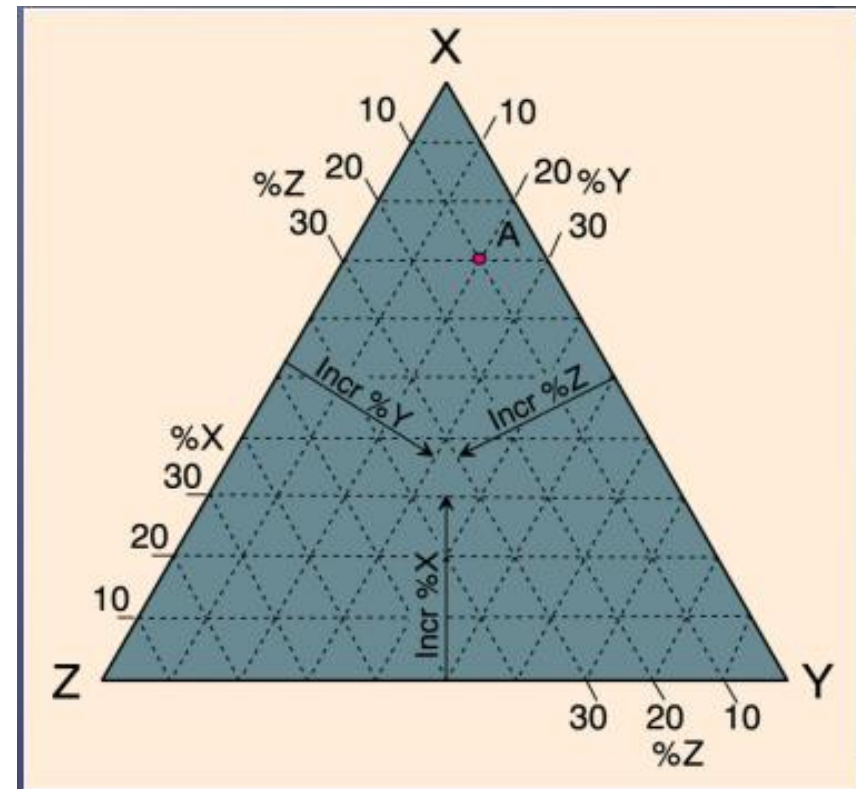
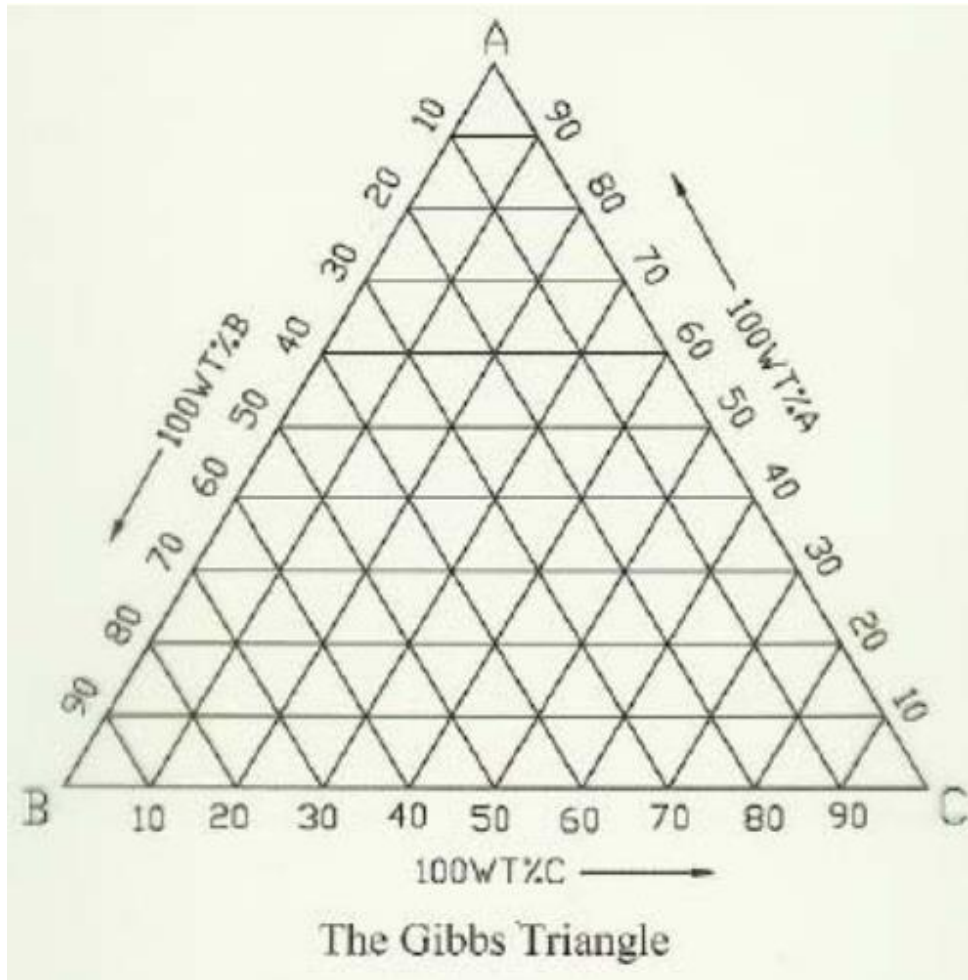
Para los sistemas de dos componentes, tuvimos que confiar en diagramas T-X isobáricos, que en realidad son secciones de diagramas T-P-X tridimensionales con P invariable.

Para representar sistemas de tres componentes, necesitamos de cuatro dimensiones (4D)!! Para simplificar se diseñan diagramas **T-X₁-X₂-X₃ ternarios (3D) e isobáricos (P cte. $F=1+C-\phi$), donde las esquinas de un triángulo equilátero corresponden a las composiciones de los componentes y T se representa en el eje vertical (la tercera dimensión!).**



Proyección de sistemas ternarios en 2D

- ❖ Primero recordemos cómo se lee un diagrama ternario:

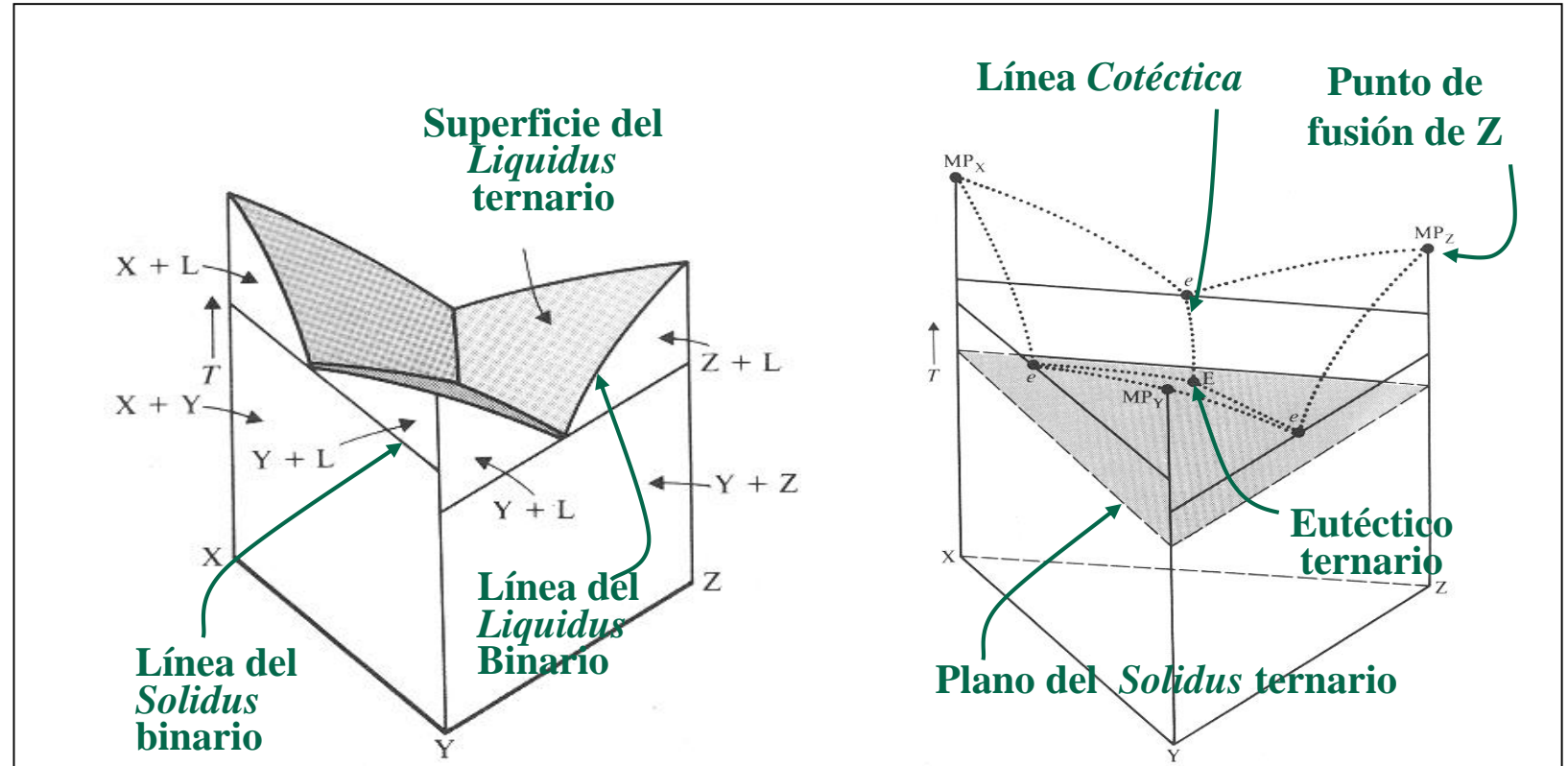


Proyección de sistemas ternarios en 3D

¡ ¡ Se agrega una dimensión a los elementos del diagrama !!

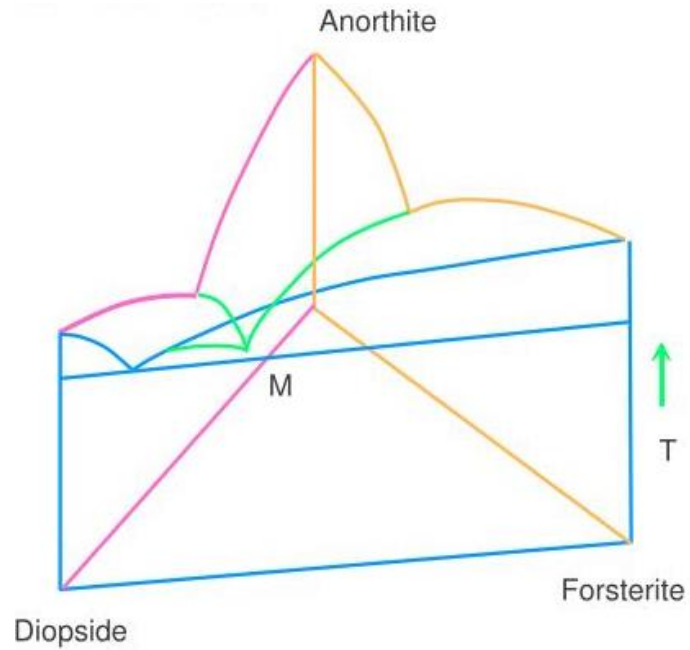
Entonces...

- Las líneas de *liquidus* y *solidus* binarios pasan a ser **SUPERFICIES** ternarias divariantes ($F = 1 + 3 - 2 = 2$).
- El eutéctico binario pasa a ser una **LÍNEA COTÉCTICA** ternaria univariante ($F = 1 + 3 - 3 = 1$).
- Hay un nuevo **PUNTO EUTÉCTICO TERNARIO** invariante ($f = 1 + 3 - 4 = 0$)



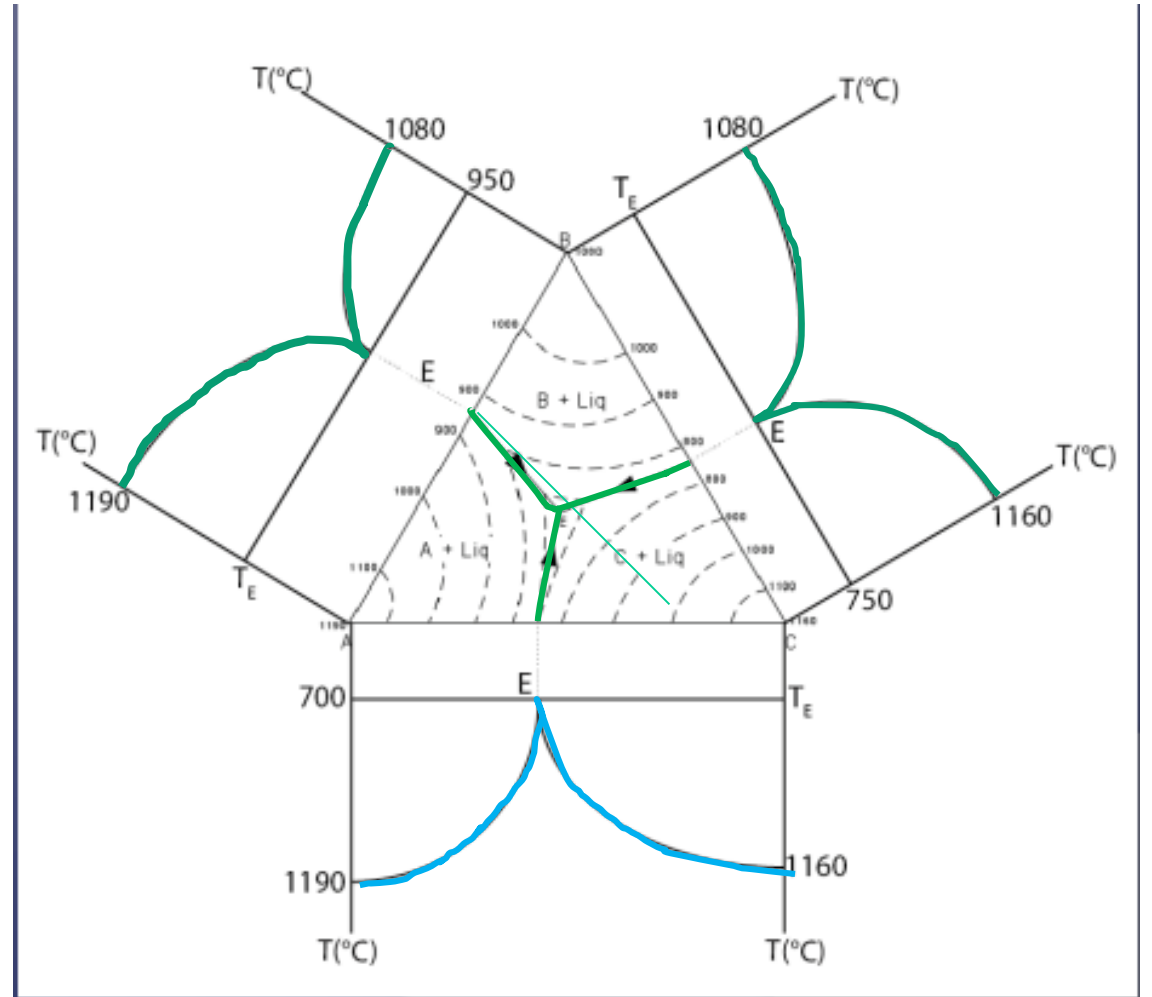
Por la regla de las fases a P cte. $F = 1 + C - \phi$: a medida que agregamos un componente, F también aumenta en una unidad.

Proyección de sistemas ternarios en 3D

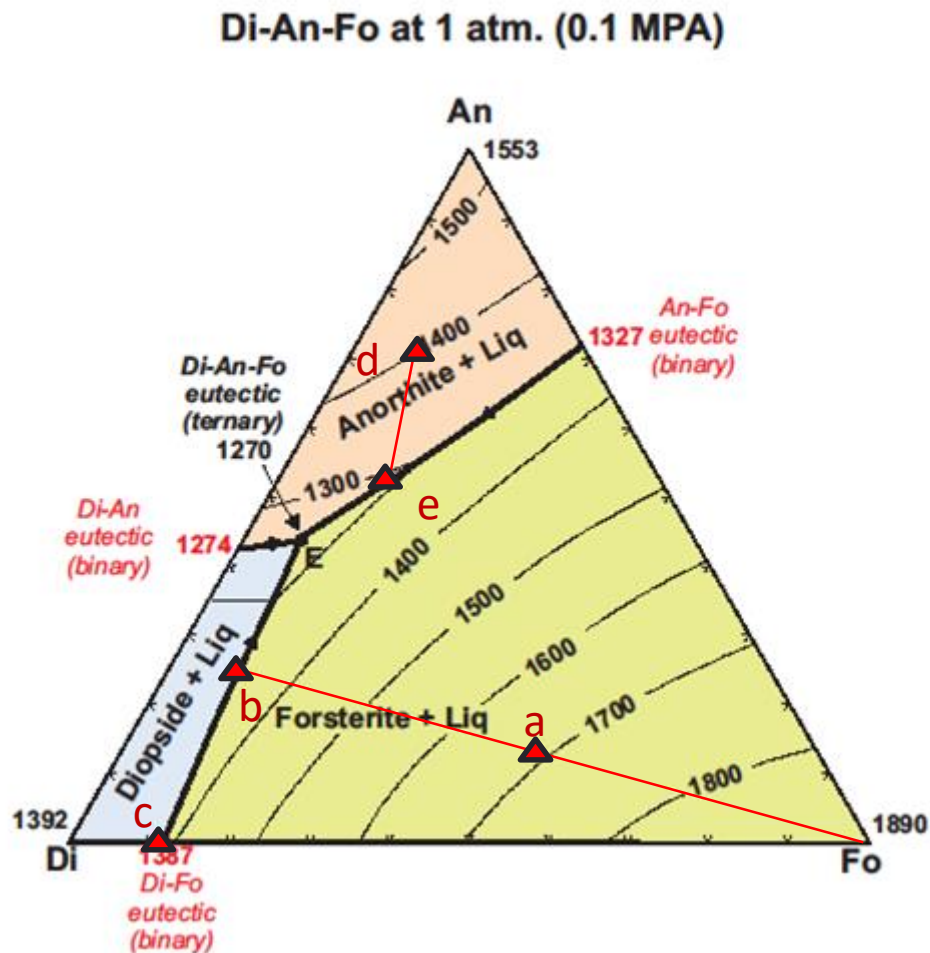


La T:

- La temperatura se representa en curvas de igual temperatura (isotermas), similares a las curvas de nivel.
- Cuando no se representan las isotermas se indica la dirección de descenso de temperatura con flechas en las líneas cotécticas que separan los campos de estabilidad de las diferentes fases.



Sistema $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ (Di) - Mg_2SiO_4 (Fo) - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (An)



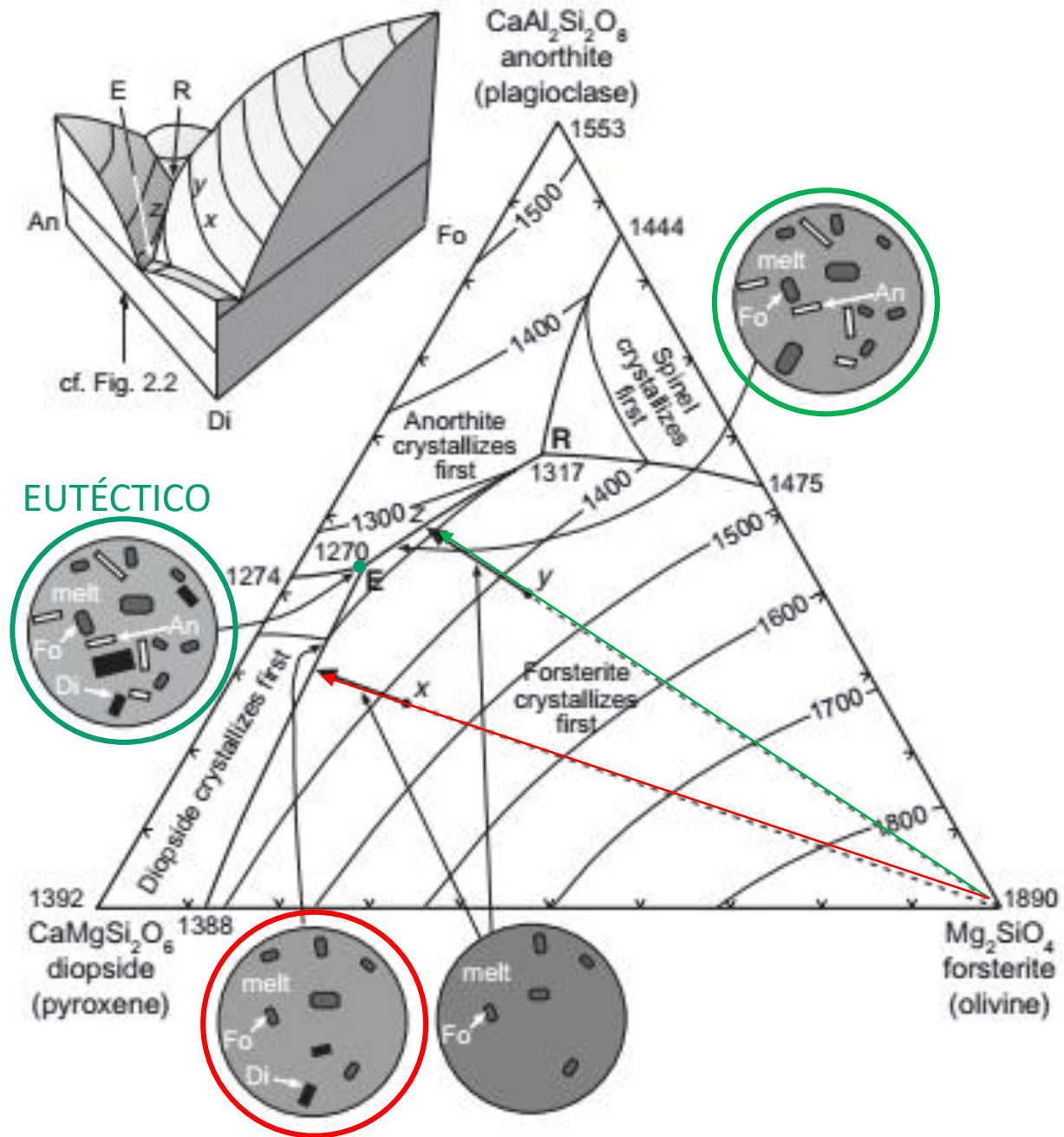
Sistema con eutéctico simple

Descenso progresivo de la temperatura:

- Comienza a **crystalizar olivino** en un líquido con composición DiAnFo. A medida que **crystaliza olivino** el líquido se **empobrece** en el componente Fo y se **enriquece** en Di y An (más cálcico y menos magnesiano!) hacia b (línea recta que cruza la línea cotéctica partiendo de Fo y pasando por a).
- Comienza a **crystalizar clinopiroxeno** junto con el olivino.
- Luego la composición del líquido sigue la línea cotéctica hasta E a medida que un sólido de composición (c) (ol + cpx) es **removido** del líquido.
- En E ($T=1270^\circ\text{C}$), se **suma la plagioclasa** a la **crystalización** hasta que se consume todo el líquido. **El sólido final será una asociación de ol+cpx+pl.**

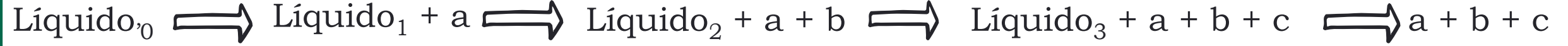
El tamaño del campo de estabilidad de las fases es inversamente proporcional a la solubilidad de la fase en el líquido.

En este ejemplo *forsterita* sería la fase menos soluble en el líquido y la primera en **crystalizar** de un amplio rango de composiciones del líquido.



EUTÉCTICO

Cristalización de un magma basáltico a bajas presiones y en condiciones anhidras



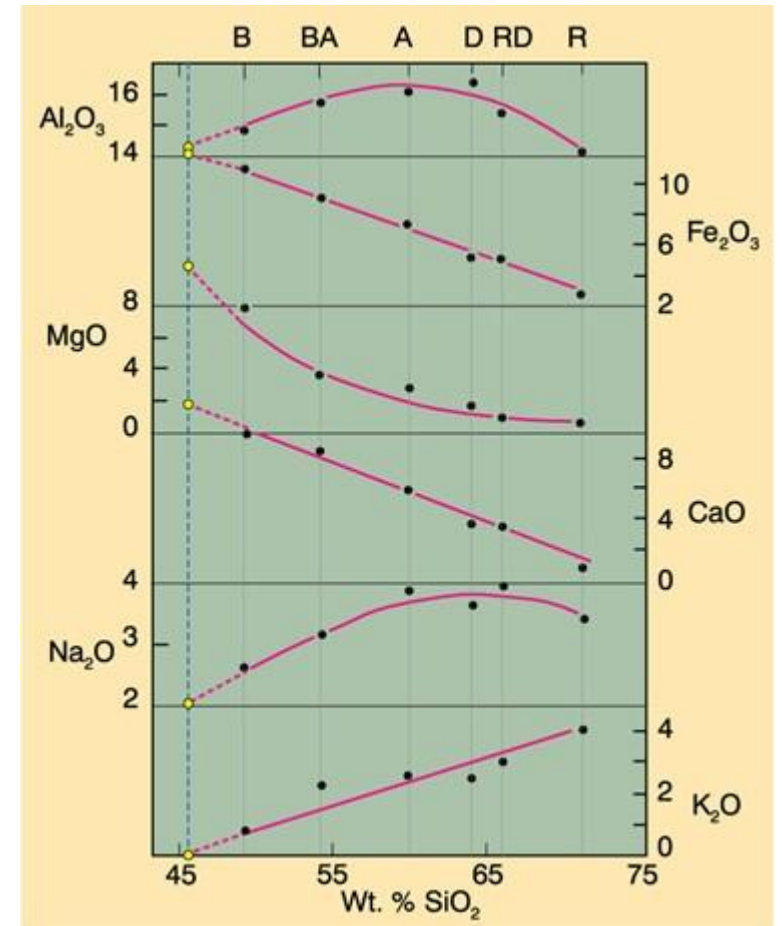
La composición del líquido SIEMPRE cambia durante la cristalización



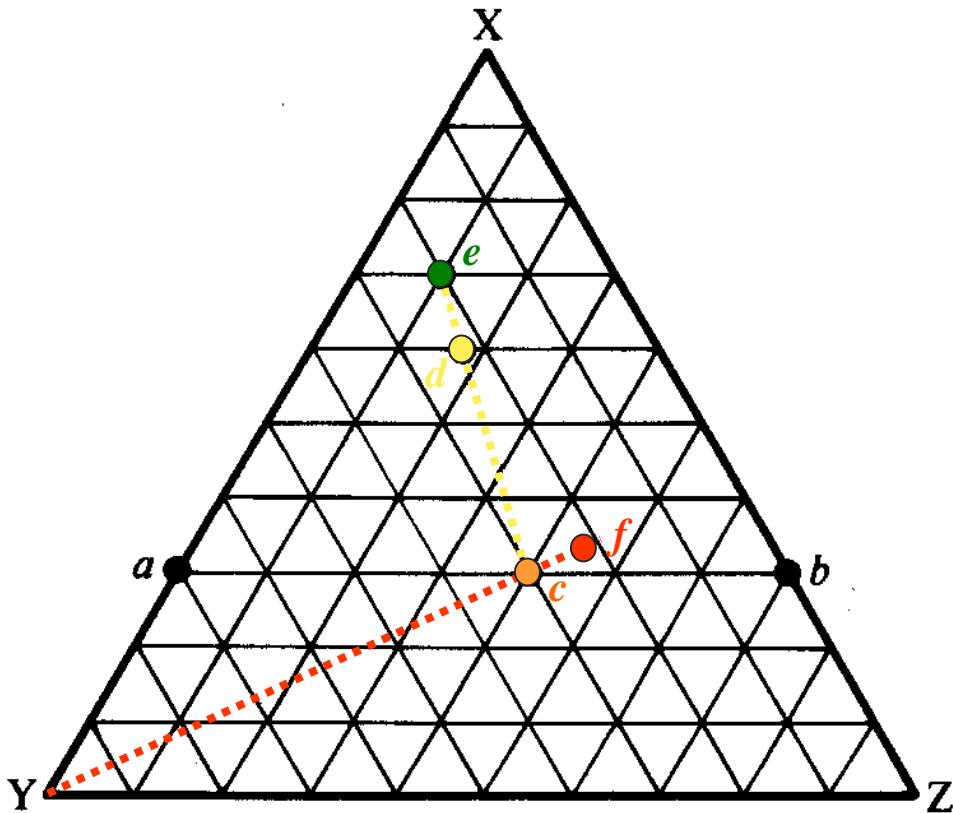
¡EL LÍQUIDO RESIDUAL siempre EVOLUCIONA!

Línea descendente del líquido
(*liquid line of descent*)

Pero no siempre lo hace el sistema en general (magma)



Regla de la palanca para un sistema ternario



Nos ayuda a calcular la composición de un magma al extraerle (fraccionar) determinada composición de cristales:

$$100 = X + Y + Z$$

¿Cuál es la composición del sistema (f) si se extrae 10% de cristales de la composición Y al líquido c ?:

$$\begin{aligned} c &= 30X + 30Y + 40Z \\ Y &= 0X + 100Y + 0Z \\ c - 0.1Y &= 30X + 20Y + 40Z \end{aligned}$$

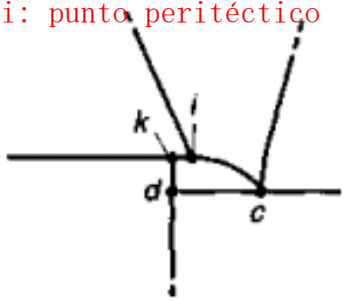
Pero eso representa un 90 %, necesito recalcular al 100 %:

$$f = 33.3X + 22.2Y + 44.4Z$$

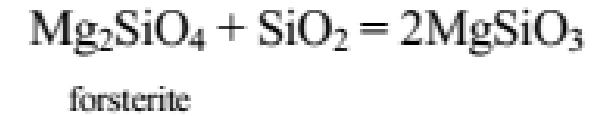
Gráficamente:

$$f = \frac{Y - c}{Y - f} \quad \% Y_{\text{cristalizado}} = \frac{c - f}{Y - f} \times 100$$

i: punto peritético



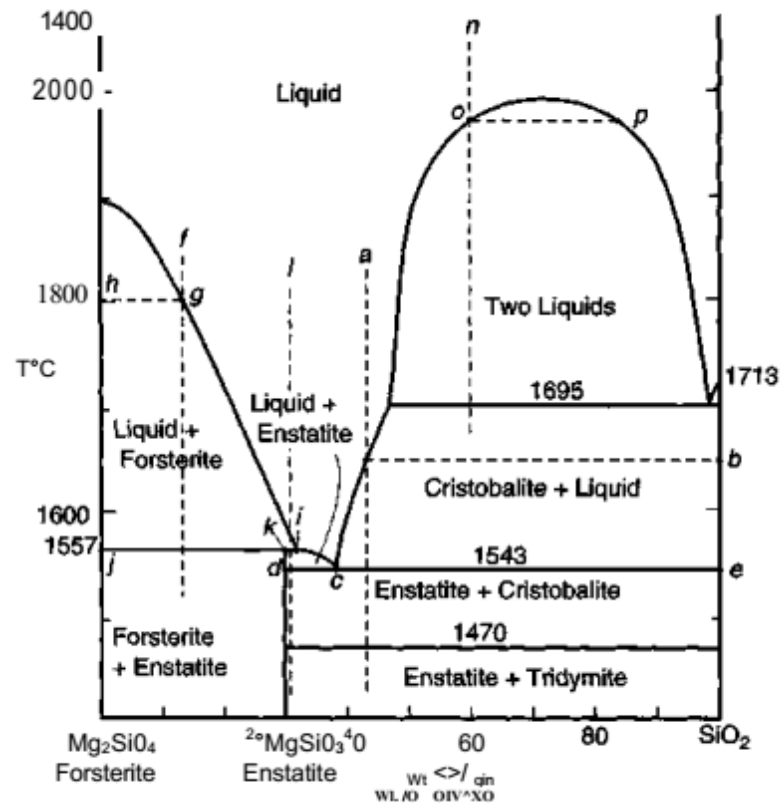
Cristalización discontinua: dos fases de distinta composición ($\text{cristal}_A + \text{líquido}$) reaccionan para dar como producto una tercera fase de composición diferente (cristal_B).



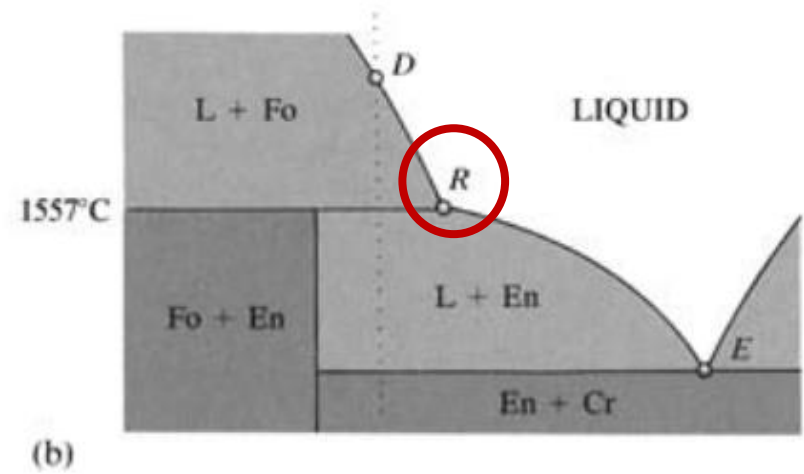
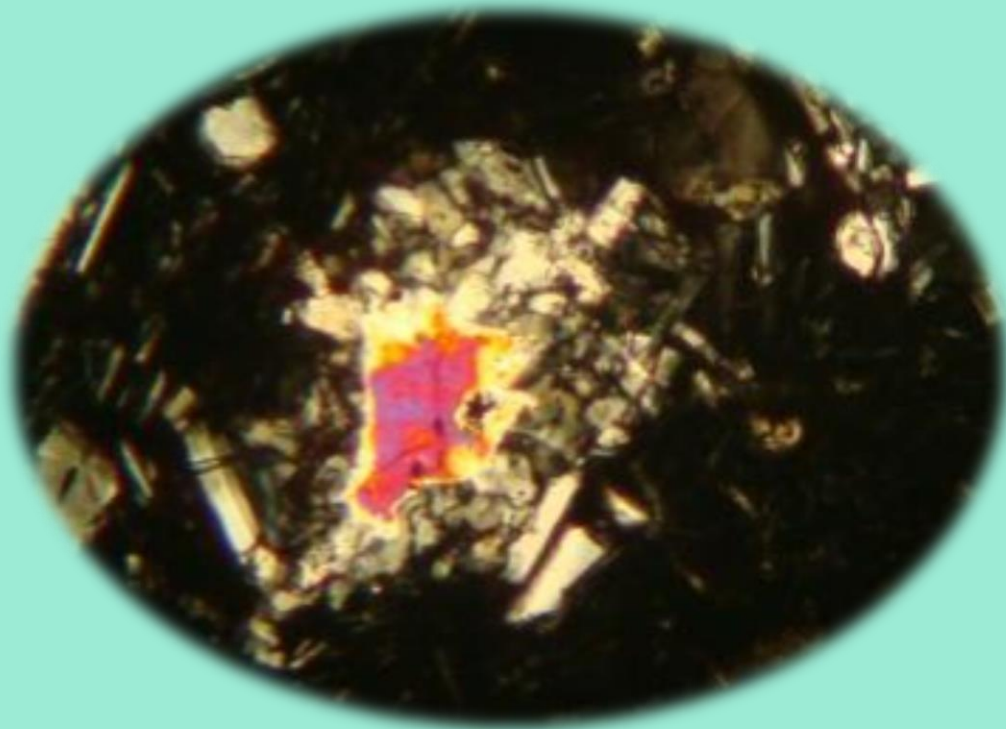
En estos sistemas aparece un nuevo elemento en los diagramas de fases que se denomina PUNTO PERITÉCTICO (sistemas binarios) o LÍNEA PERITÉCTICA (sistemas ternarios).

Descenso de la T:

- A 1558 ° C, el sistema consiste en cristales de olivino y fundido en equilibrio (partiendo de f) o enstatita y fundido (partiendo de a).
- A 1557 ° C coexisten establemente olivina, ortopiroxeno y un líquido (punto i, peritético). Enstatita se forma a expensas de la reacción de la forsterita y el fundido (cristalización discontinua).
- T fija hasta que se consume todo el líquido y cristalizan completamente opx y ol (sistema parte de f).
- T fija hasta que se consume todo el olivino. El líquido y enstatita se mueven al eutéctico donde se consume todo el líquido y cristalizan completamente opx y cristobalita (sistema parte de a).

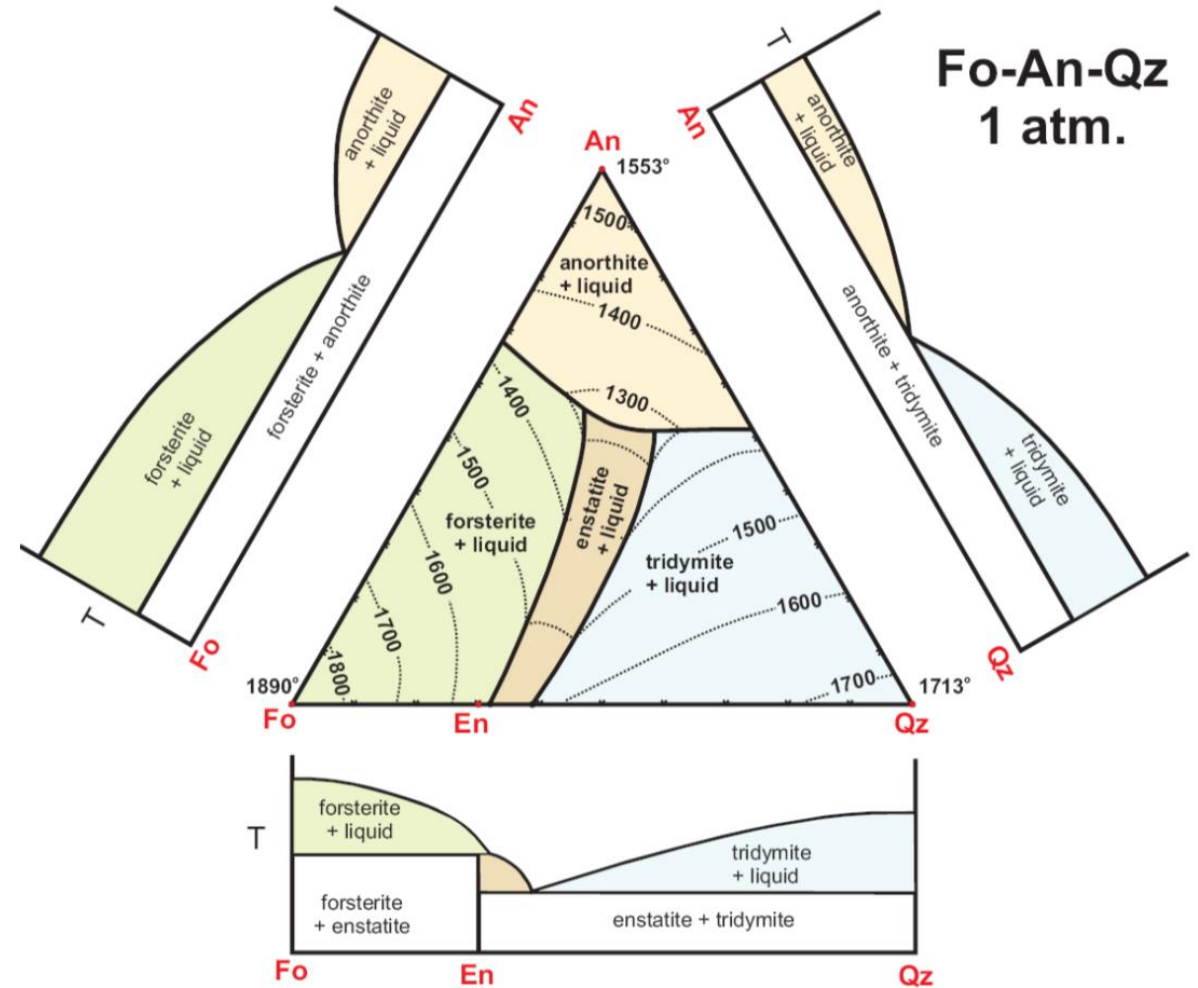
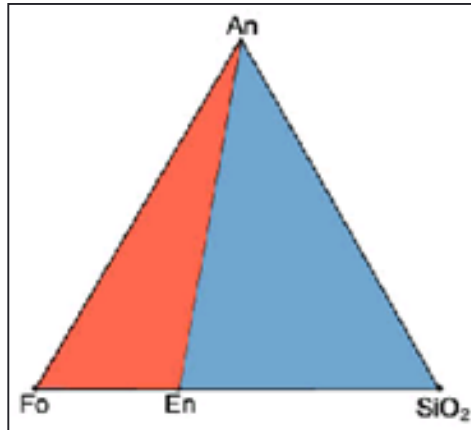


Corona de reacción de opx en olivino



Sistemas peritéticos ternarios: $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (An) - Mg_2SiO_4 (Fo) - SiO_2 (Qz)

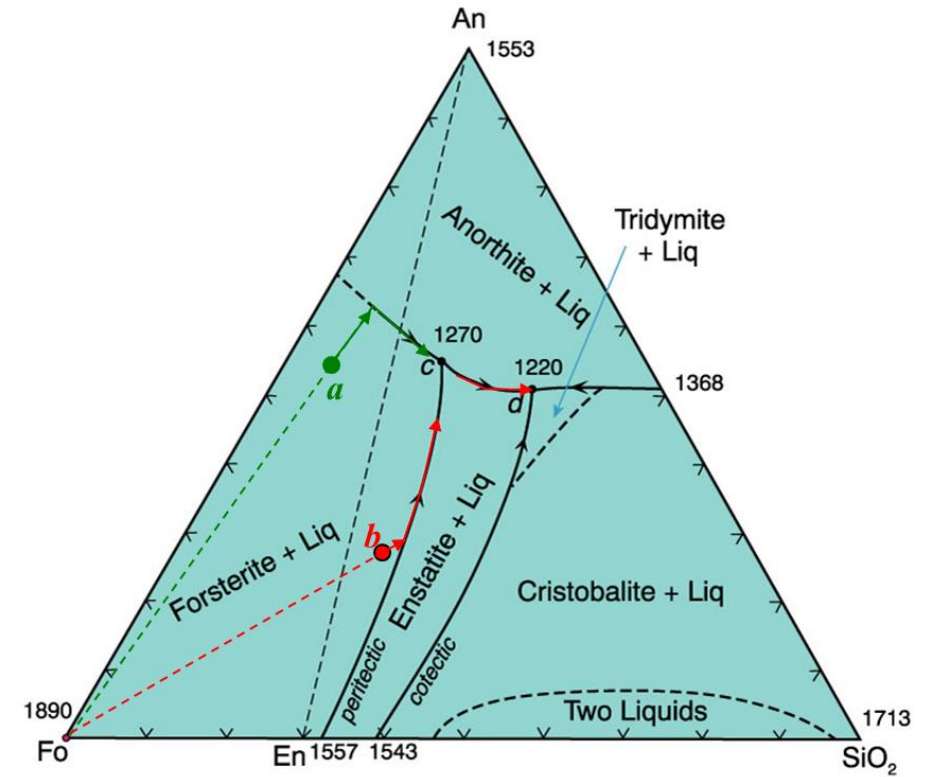
Este triángulo se divide en una porción saturada en sílice (Fo-En-An) y una sobresaturada en sílice (En-An-SiO₂).



- ✓ Tiene un **EUTÉCTICO TERNARIO** y un **PERITÉCTICO TERNARIO**.
- ✓ La línea que separa los campos de (Fo+L) y (En+L) es una **LÍNEA PERITÉCTICA**

Sistemas peritéticos ternarios: $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (An) - Mg_2SiO_4 (Fo) - SiO_2 (Qz)

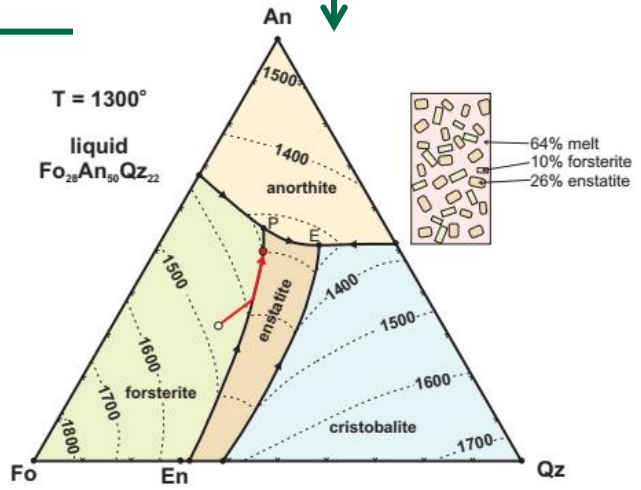
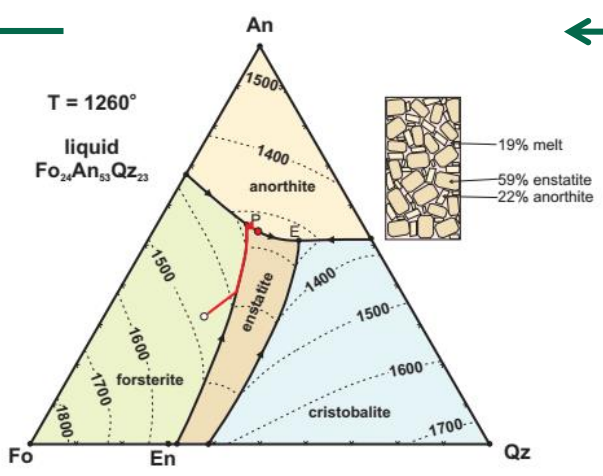
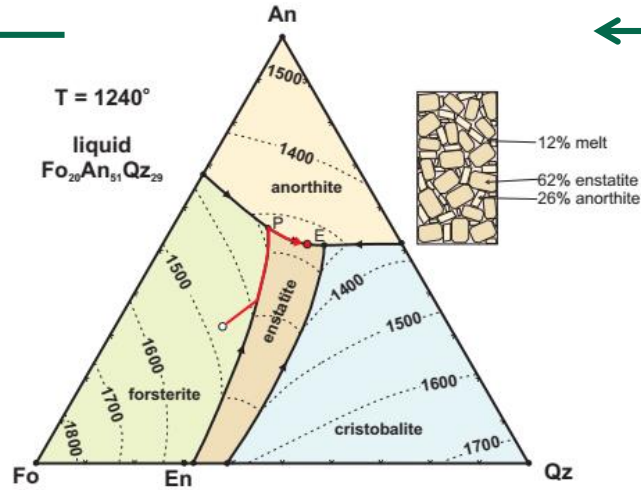
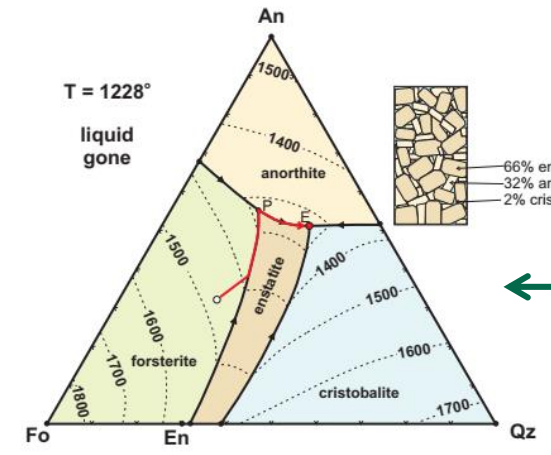
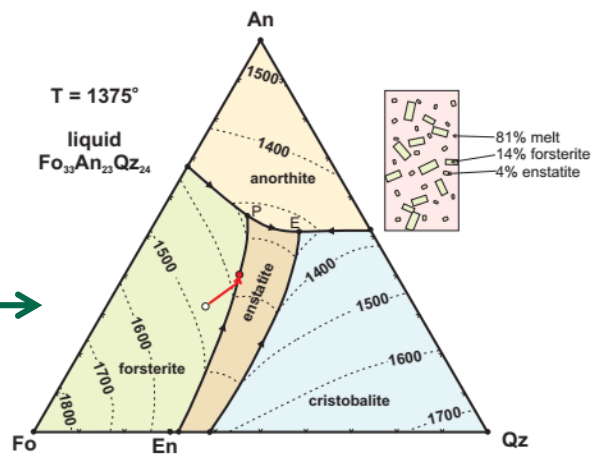
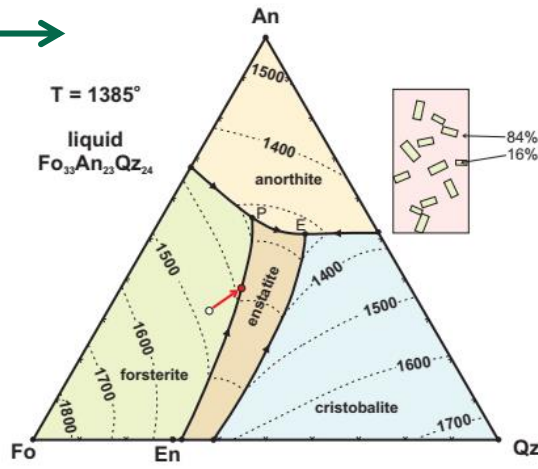
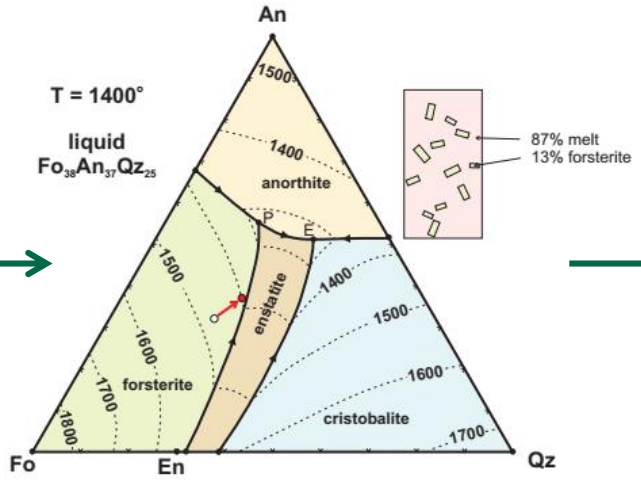
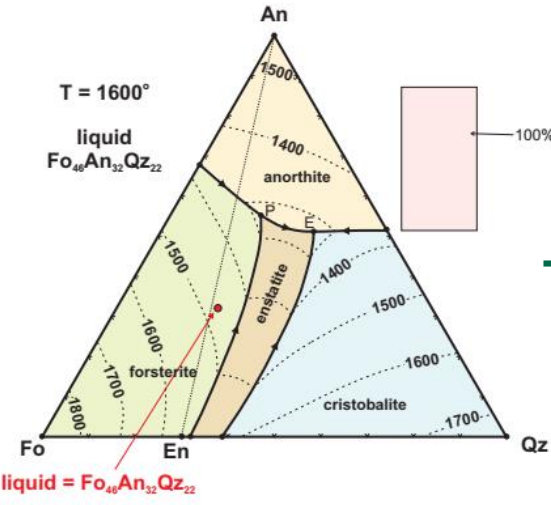
- Partiendo de la composición en (a), **crystaliza Fo** primero y el líquido se desplaza hacia la línea cotéctica con el campo An+L donde comienza a **crystalizar An** junto con los cristales de Fo. El líquido se desplaza hasta c (punto peritético ternario) donde la Fo reacciona con el L para dar En.
- Partiendo de (b), el líquido alcanza la línea peritética donde Fo y L reaccionan para dar En. Luego el líquido se desplaza hacia el punto c donde **crystaliza también anortita**.
- Desde c el sistema puede desplazarse hacia (d) **crystalizando sólo: An + En + polimorfo de la sílice**



Partiendo de cualquier composición inicial del sistema nunca obtendremos Fo y Qz coexistiendo en equilibrio como resultado del descenso de T.

JAMÁS SON ESTABLES FO Y QZ JUNTOS

El diagrama de fases del sistema Fo-En-An-Qz sirve como un modelo de cómo cristaliza un magma basáltico.

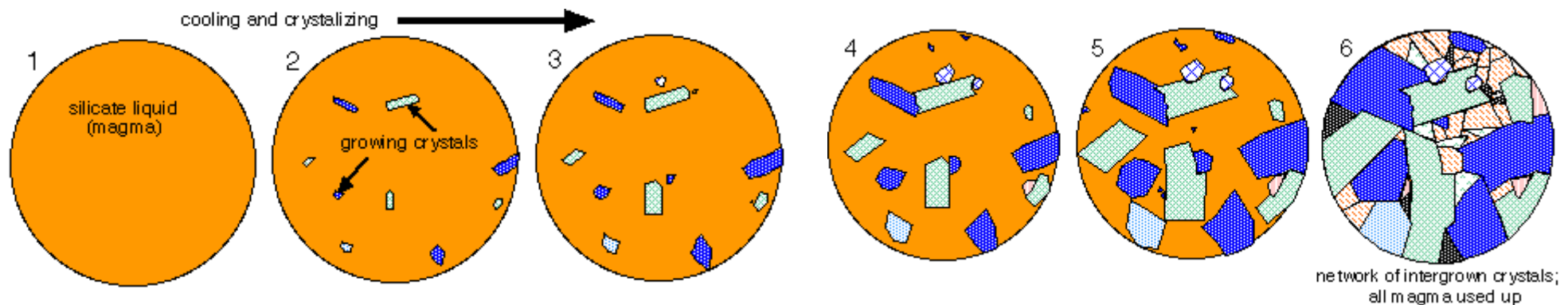


Cristalización en equilibrio

- ✓ Los minerales que cristalizan están en equilibrio con el fundido.
- ✓ Los cristales reaccionan con el líquido continuamente para reequilibrarse continuamente a medida que las condiciones P-T-X cambian.
- ✓ Como es un sistema cerrado, la composición del sistema no varía.



en la cristalización en equilibrio la composición de todo el sistema
no varía

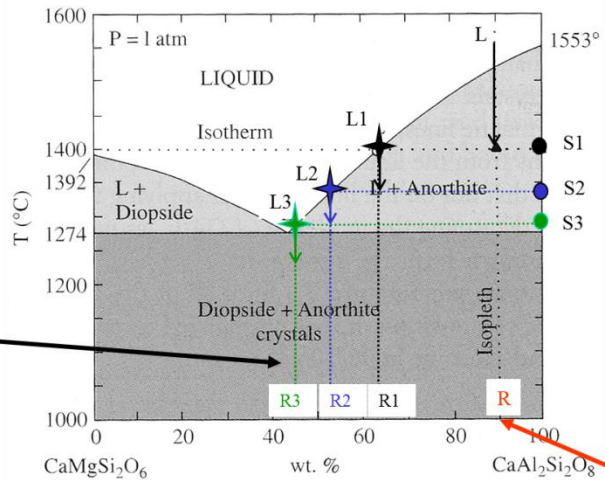


SISTEMAS PLUTÓNICOS EN PROFUNDIDAD QUE SE ENFRÍAN MUY LENTAMENTE

Cristalización fraccionada

- ✓ Los cristales son separados/aislados físicamente del fundido en el que cristalizaron apenas se forman.
- ✓ El fundido y los cristales ya no pueden reaccionar más entre sí porque no están en contacto y no pueden reequilibrarse ante los cambios en las variables intensivas.
- ✓ Como el sistema es abierto, la composición del sistema sí varía.

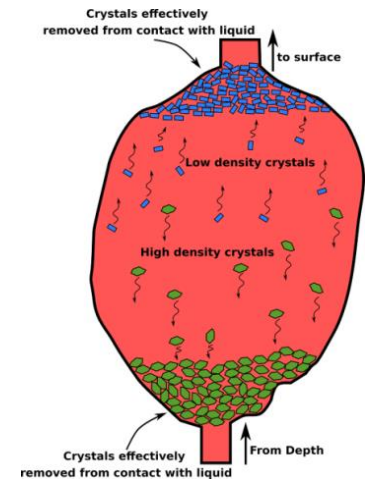
en la cristalización fraccionada la composición de todo el sistema sí varía



Cristalización fraccionada
Composición de rocas ≠
Composición líquido inicial

Cristalización en equilibrio
Composición de rocas =
Composición líquido inicial

A la extracción de cristales la llamamos fraccionamiento y conduce a la diferenciación del magma



Ya sabemos cómo está formado el manto, qué factores propician el inicio de su fusión y dónde se dan las condiciones para la generación de magmas en el planeta. Ahora debemos entender cómo ocurre la fusión y cómo se generan diferentes composiciones de magmas basálticos...

LA FUSIÓN

“Modelaremos” la fusión, experimentando con una fuente uniforme en su composición.

Para obtener distintas composiciones, entonces, hay que variar las condiciones P, T, H₂O.

**Como la roca que forma el manto es la peridotita, que está formada mayormente por:
olivino (forsterita) + piroxenos (diópsido y enstatita) ricos en Mg,
analizaremos el sistema ternario $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ (Di) - Mg_2SiO_4 (Fo) - $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ (En).**

Pero pensemos primero la fusión en un sistema de dos componentes...

* En un sistema de solución sólida completa...

Solidus: Composición del sólido que coexiste con un líquido a determinada T. Debajo de la curva del *solidus* (*subsolidus*), el sistema consiste en un sólido.

Liquidus: Composición del líquido que coexiste con un sólido a determinada T. Por encima de la T del *liquidus* sólo hay líquido.

Por encima de la T del *solidus* y por debajo de la del *liquidus* coexisten fase sólida y fase líquida.



Así, la curva del *solidus* indica la **T MÍNIMA** a la que se inicia la fusión.

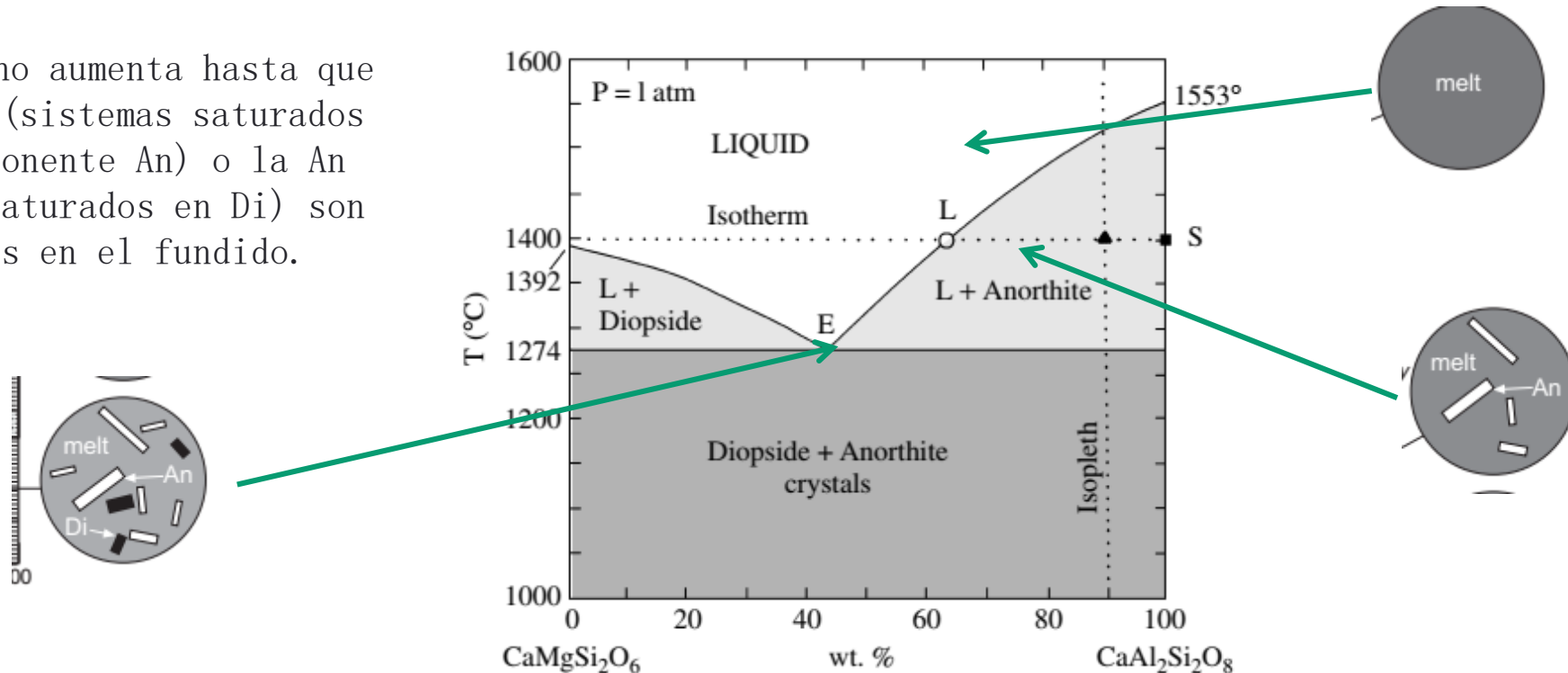
* En un sistema de eutéctico binario...

La roca fuente tiene la composición de cualquier punto debajo del *solidus*.

La FUSIÓN comienza siempre en el punto EUTÉCTICO, a la T_E y a la X_E

Fusión de una roca compuesta por clinopiroxeno (Di) y plagioclasa (An) para dar un magma basáltico

En E, la T no aumenta hasta que todo el Di (sistemas saturados en el componente An) o la An (sistemas saturados en Di) son disueltos en el fundido.



Ahora sí, veamos cómo ocurre la fusión en un sistema ternario (más parecido a un magma real)...

* En un sistema de eutéctico ternario...

Como decíamos antes, este sistema se aproxima a la composición del

MANTO

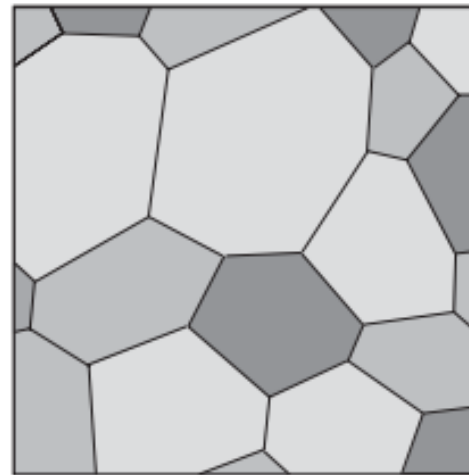
Pero cuidado que ignora ...

- ✓ a las fases aluminosas
- ✓ a las fases metasomáticas
- ✓ las soluciones sólidas (esencialmente el intercambio Fe-Mg en Di y Fo)

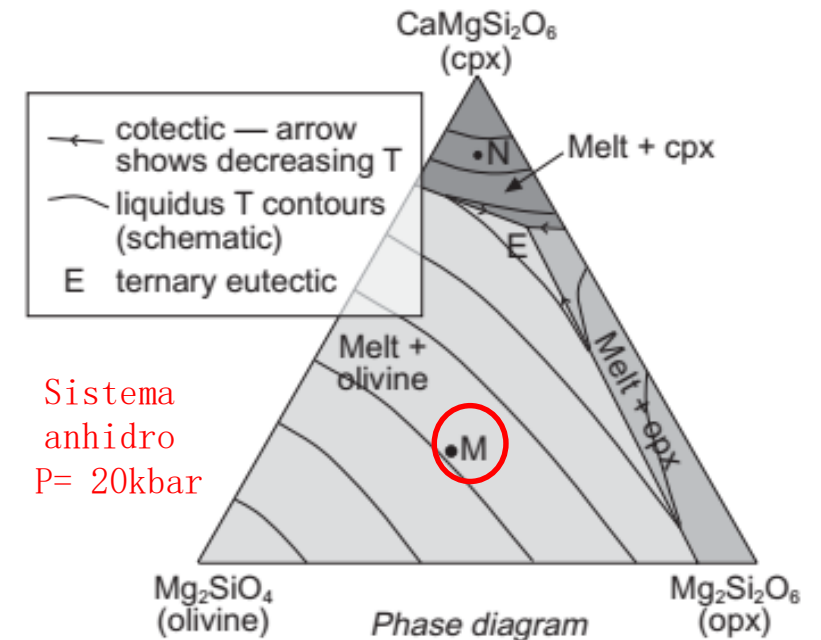
Fusión de una lherzolita (Sistema Di-Fo-En)

- ✓ La roca fuente está formada por una asociación de ol+opx+cpx (punto E) (*subsolidus*).

(a) Prior to melting

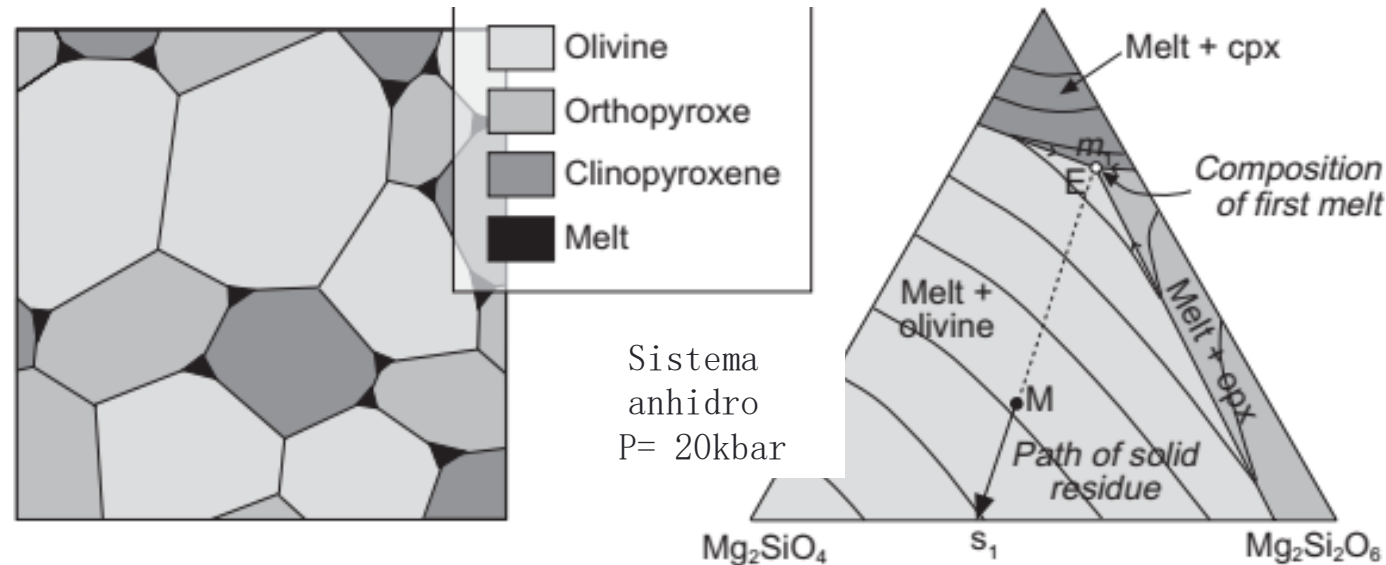


Magnified view of 'rock'



Inicia el aumento de la temperatura...

- ✓ **La fusión comienza en E**, en el eutéctico ternario, a la temperatura de E.
- ✓ La primera gota de líquido tendrá la **composición definida** en el punto eutéctico, en E (sin importar la proporción entre las fases en la fuente). Observen que el líquido inicial eutéctico es más rico en el componente Di que en En o Fo. Existe entonces una fusión preferencial del cpx!!!
- ✓ **La fusión es INCONGRUENTE: el producto tiene diferente composición que la fuente y que las fases residuales.**



¡El líquido que se forma tiene composición basáltica!

Evolución de la fusión

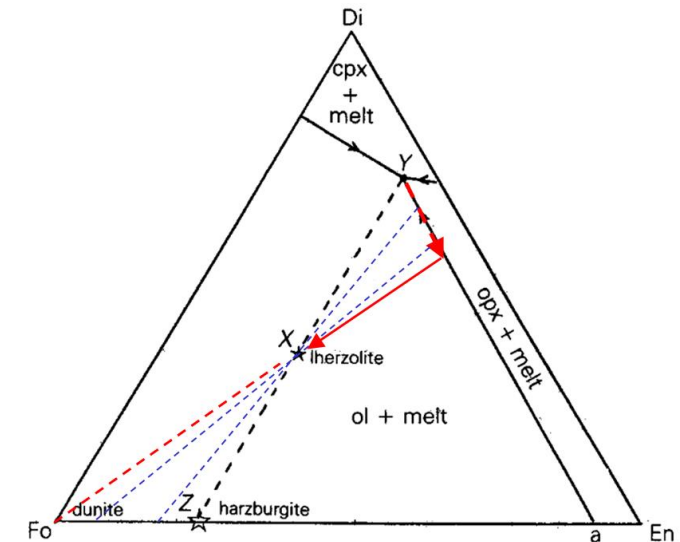
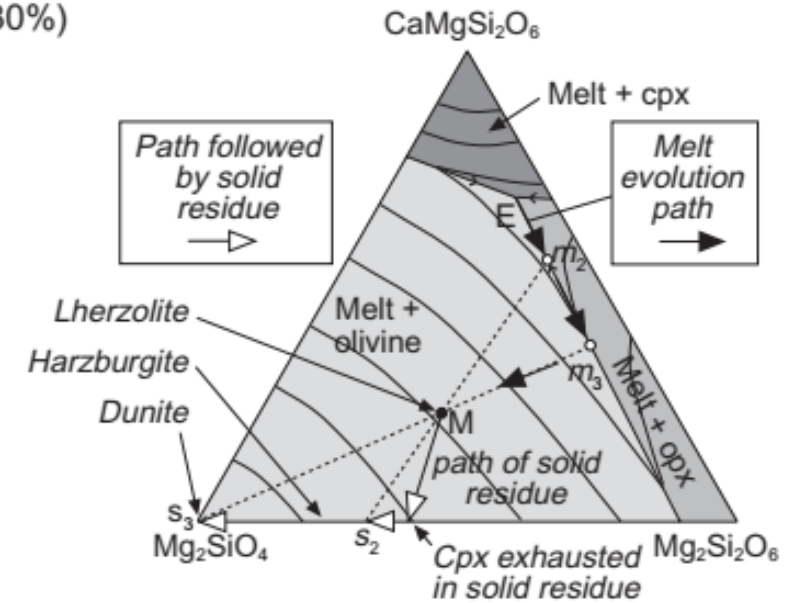
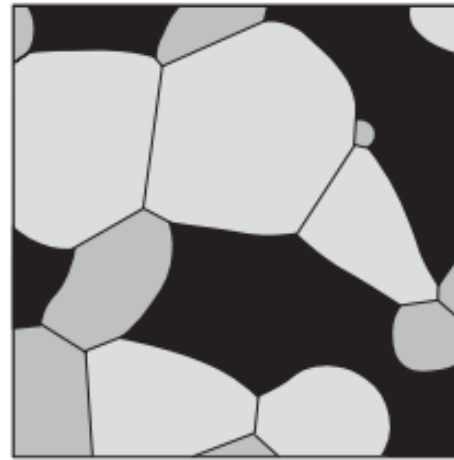
ESCENARIO 1: el líquido formado por la fusión coexiste en equilibrio con el sólido residual (roca fuente aún sin fundir). Sistema cerrado.

FUSIÓN EN EQUILIBRIO

- Después de agotarse el cpx, continúan fundiéndose el opx y el ol y la composición del líquido se desplaza por la línea cotéctica. Como los líquidos son más ricos en el componente En que en Fo, el opx será el siguiente mineral en agotarse.
- Al agotarse el opx, si se extrae todo el líquido, el residuo tendrá la composición de una Dunite (roca formada por >90 % de olivino).
- Es muy difícil que continúe la fusión porque se requiere elevar mucho la temperatura (se formarían magmas komatíticos o picríticos).
- Según la regla de la palanca, cuando el cpx se agota y el sólido residual es una harzburgita, la proporción sólido:líquido es 79-21 (porcentaje de fundido máximo: 21 %).

Fusión de una peridotita (Sistema Di-Fo-En)

(c) More advanced melting (~30%)

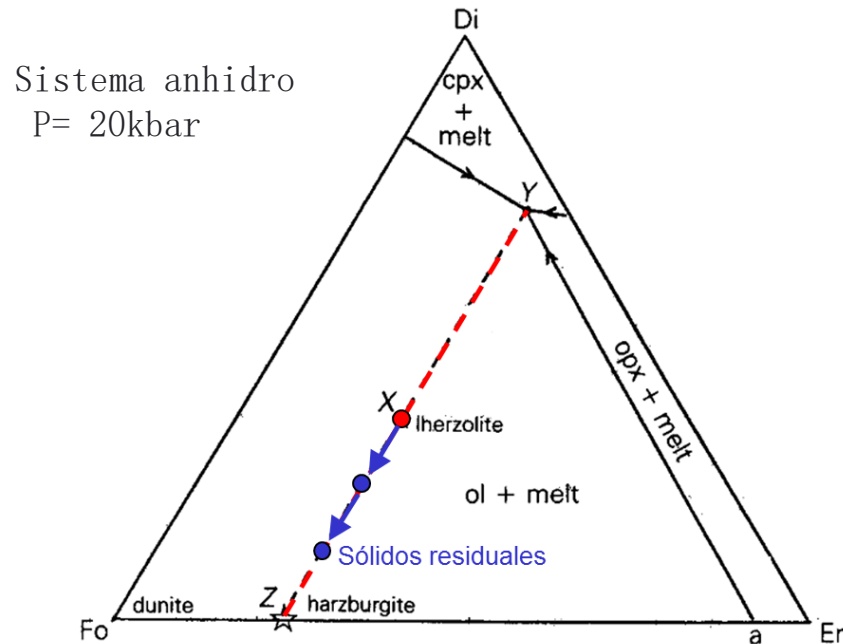


Evolución de la fusión

ESCENARIO 2: el líquido formado por la fusión se separa del sólido residual (roca fuente sin fundir). Proceso de desequilibrio.

FUSIÓN FRACCIONADA

- La composición del fundido es siempre la del eutéctico ternario (Y=E) porque siempre estoy como empezando de nuevo! Esto hasta que se funde completamente uno de los componentes y el sistema pase a ser binario.
- La composición del sólido residual se moverá en dirección contraria al eutéctico triple, a lo largo de una línea que pasa por la composición original de la roca fuente, X (lherzolita).
- Una vez consumido el Di, la composición total del sistema será Z (harzburgita) y la fusión parcial sólo podrá continuar si se alcanza la temperatura del eutéctico binario entre Fo y En. Pero esta T es más alta que la T en Y!!

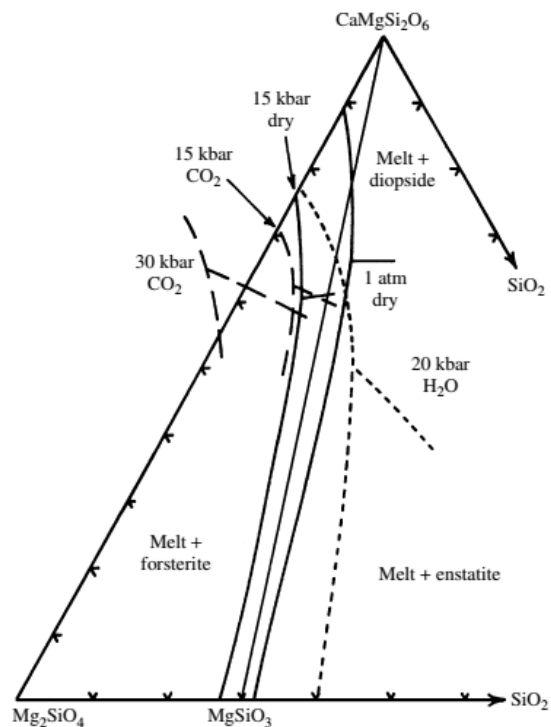


Fusión parcial:
antes de que se funda toda la roca fuente, el fundido se separa

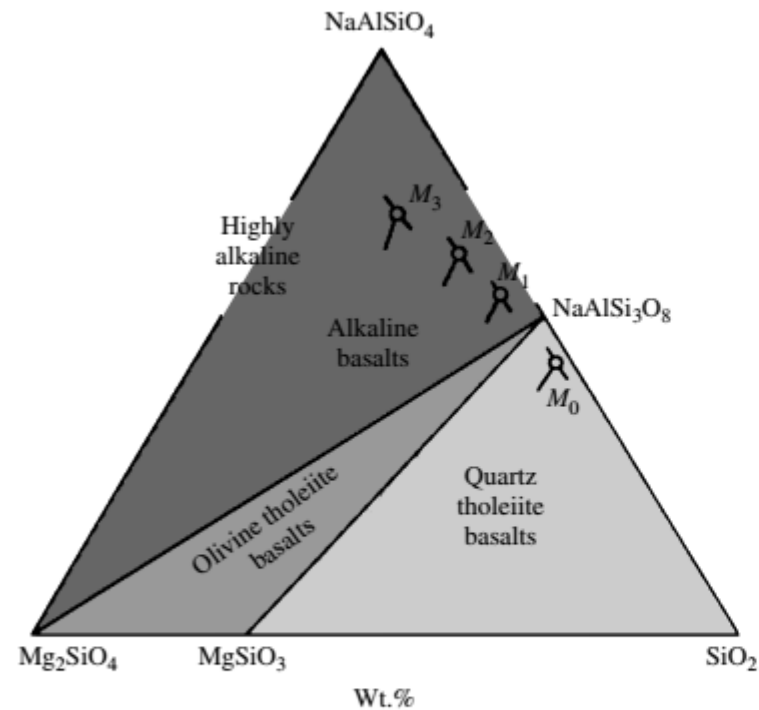
El fundido será rico en los elementos de menor T de fusión mientras el sólido residual se enriquecerá en los de mayor T de fusión.

Variaciones en la presión y en el contenido de agua...

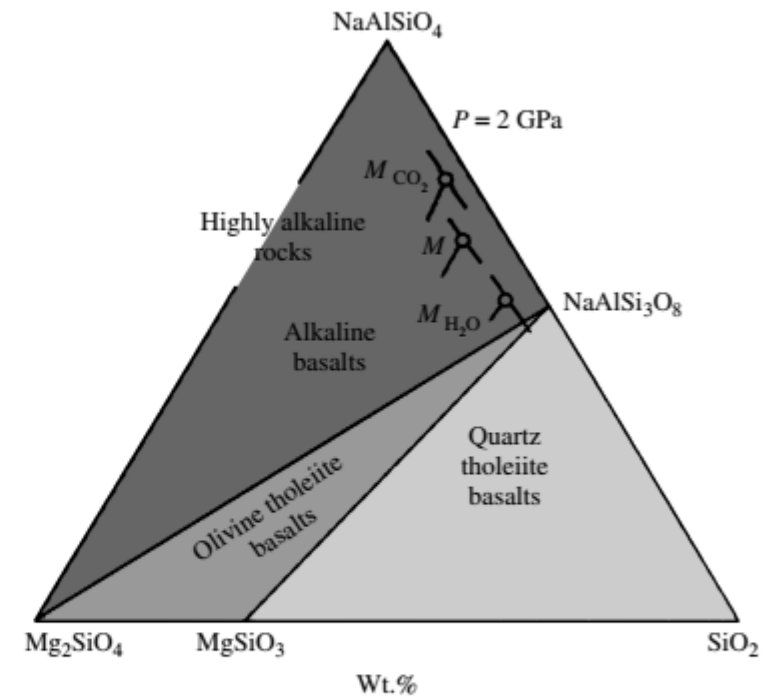
...Generan diferentes magmas primarios



11.10 Beginning-of-melting invariant points and associated liquidus boundary lines in the system Mg_2SiO_4 - $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ - SiO_2 . Solid lines, volatile-free (dry); short dashed lines, water-saturated; long dashed lines, CO_2 -saturated. (Redrawn from Eggler, 1974.)

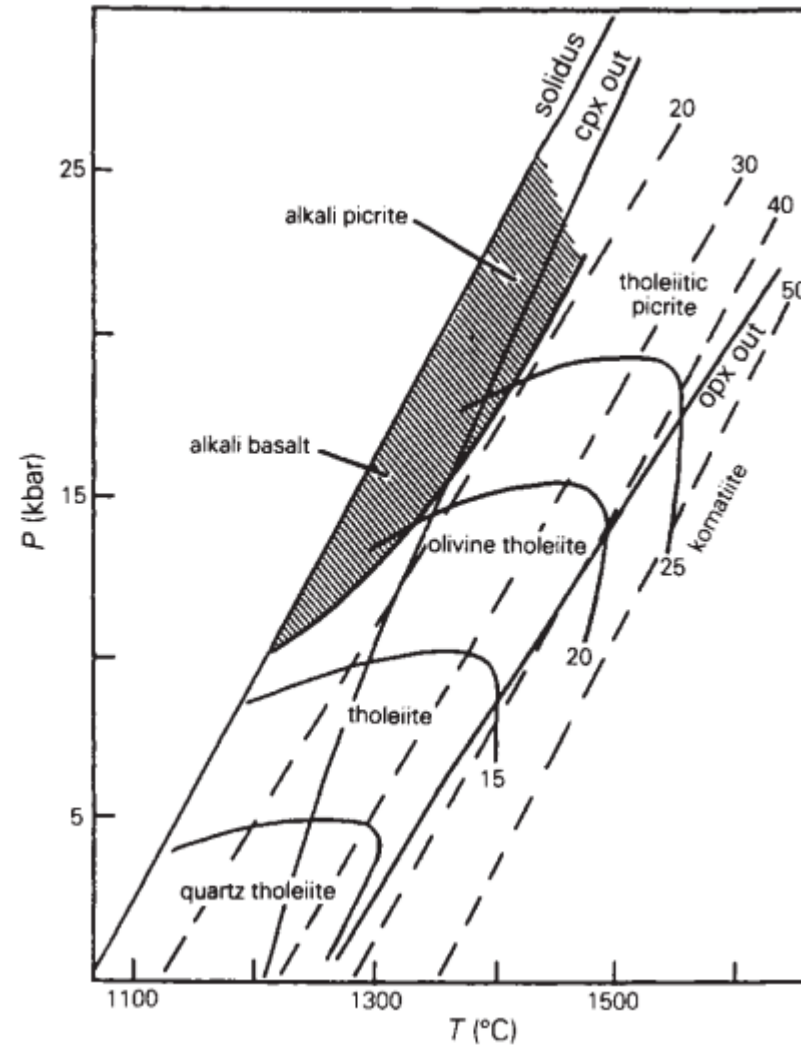
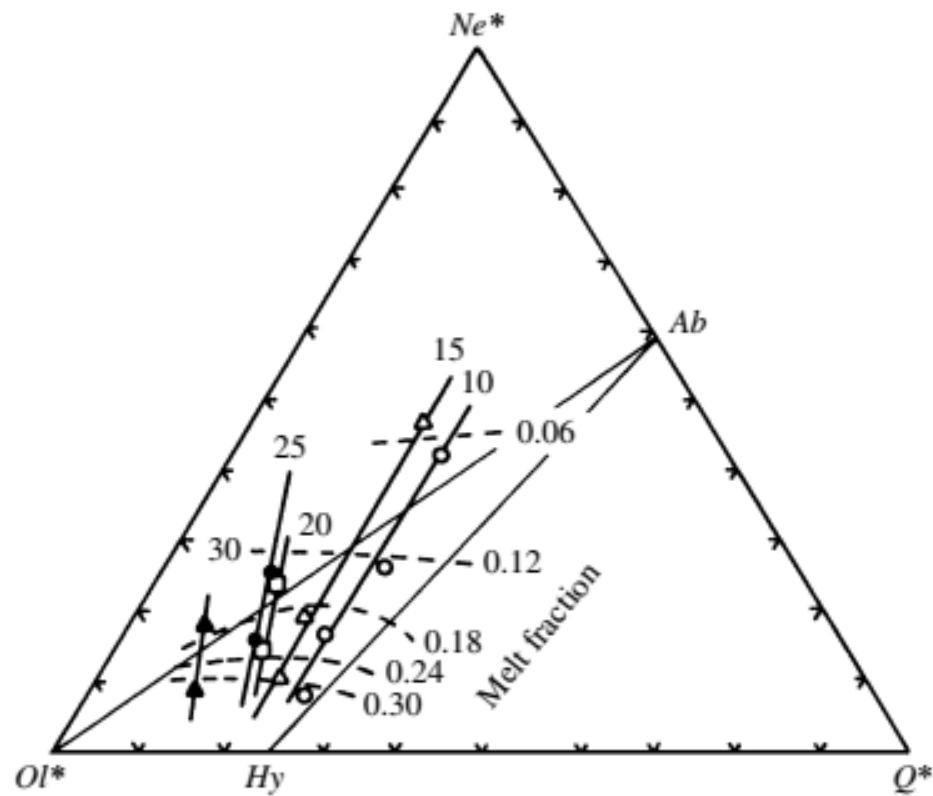


11.11 Shift of beginning-of-melting invariant points M_0 , M_1 , M_2 , and M_3 at 1 atm, 1, 2, and 3 GPa, under volatile-free conditions. Basaltic melts modeled by this ternary system are indicated. (Redrawn from Kushiro, 1968.)



11.12 Shift of beginning-of-melting invariant points at 3 GPa under indicated volatile-saturated conditions. M is the volatile-free dry system. (Redrawn from Eggler and Holloway, 1977.)

Variaciones en el porcentaje de fusión



¡Algunos principios que podemos enunciar!

La regla de las fases y los diagramas resultantes nos permiten entender la cristalización de los magmas y su evolución.

Sobre la cristalización:

- ✓ Los minerales cristalizan a determinadas condiciones de P, T y X del líquido.
- ✓ La cantidad de minerales que se forman aumenta con el descenso de T.
- ✓ La presión afecta el rango de estabilidad (T de cristalización) de los minerales.
- ✓ El agua (y otros volátiles) afecta el rango de estabilidad (T y P de cristalización) de los minerales.
- ✓ La composición del fundido y de la mayoría de los minerales cambia con la cristalización.

¡Algunos principios que podemos enunciar!

Sobre la fusión:

- ✓ Una asociación de minerales o un mineral se funde a determinadas condiciones de P, T y X del líquido.
- ✓ Sin importar la composición original del sistema, el fundido parcial INICIAL tendrá siempre la composición del eutéctico.
- ✓ A medida que avanza la fusión, la fuente del manto se agotará progresivamente en los componentes de bajo punto de fusión, requiriendo temperaturas sucesivamente más altas para fundirse (se vuelve más refractaria).
- ✓ Una forma de obtener diferentes composiciones de los magmas (y por lo tanto de las rocas derivadas de su enfriamiento) deriva de la variación del porcentaje de fusión parcial o grado de fusión de una misma roca fuente, de la presión de fusión y del contenido de volátiles.

Bibliografía recomendada para esta clase

- * Best: capítulos... 3, 6 (pág. 133-139), 11.
- * Winter: capítulo 3 (pág. 27-31), 5, 6, 10.
- * Wilson: capítulo 3.

