

A photomicrograph showing several elongated, reddish-brown enstatite crystals embedded in a light-colored, granular matrix. The crystals have a distinct prismatic habit. The text 'INOSILICATOS-2' is overlaid in large orange letters across the center of the image.

# INOSILICATOS-2

M. Rodas

Enstatita del Vesuvio

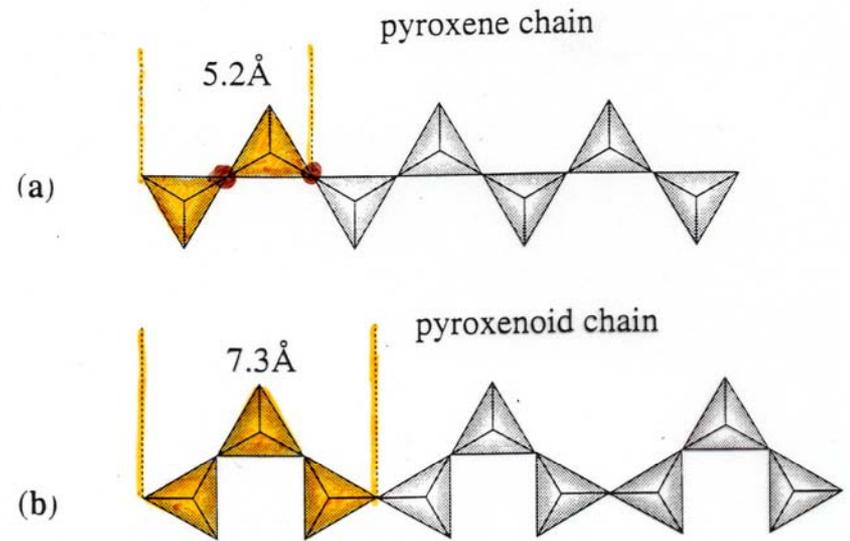
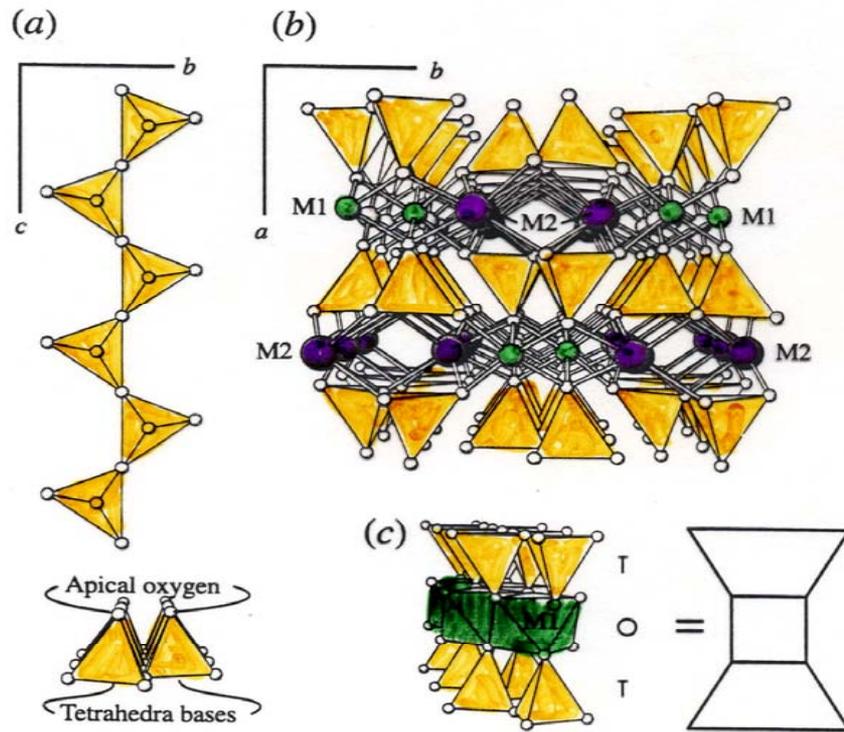
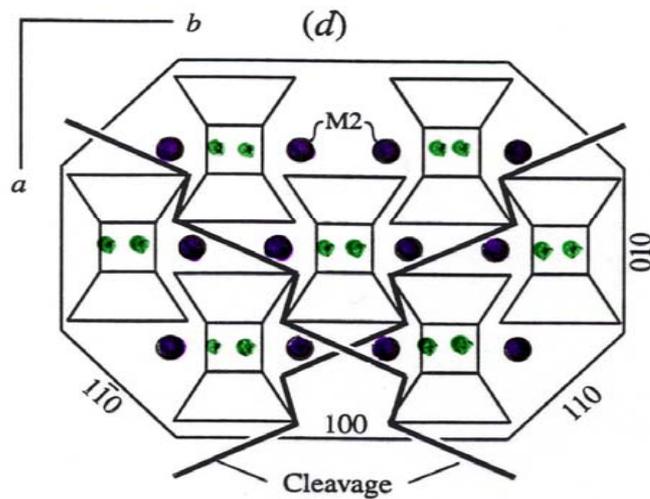
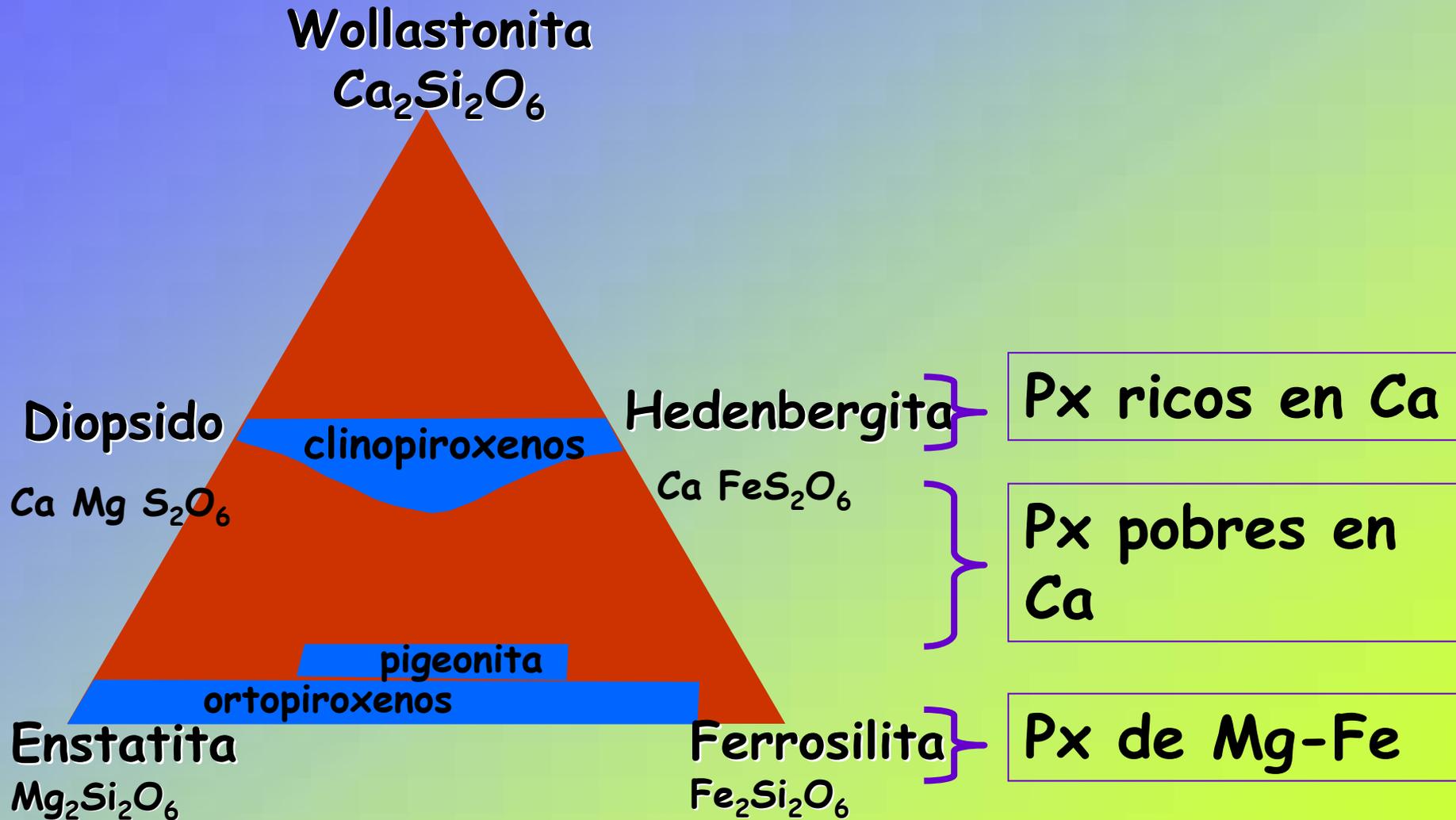


Figure 6.10. A comparison of the single  $\text{SiO}_4$  chains in (a) pyroxenes with periodicity of 2 tetrahedra, and (b) pyroxenoids with periodicity 3 tetrahedra.

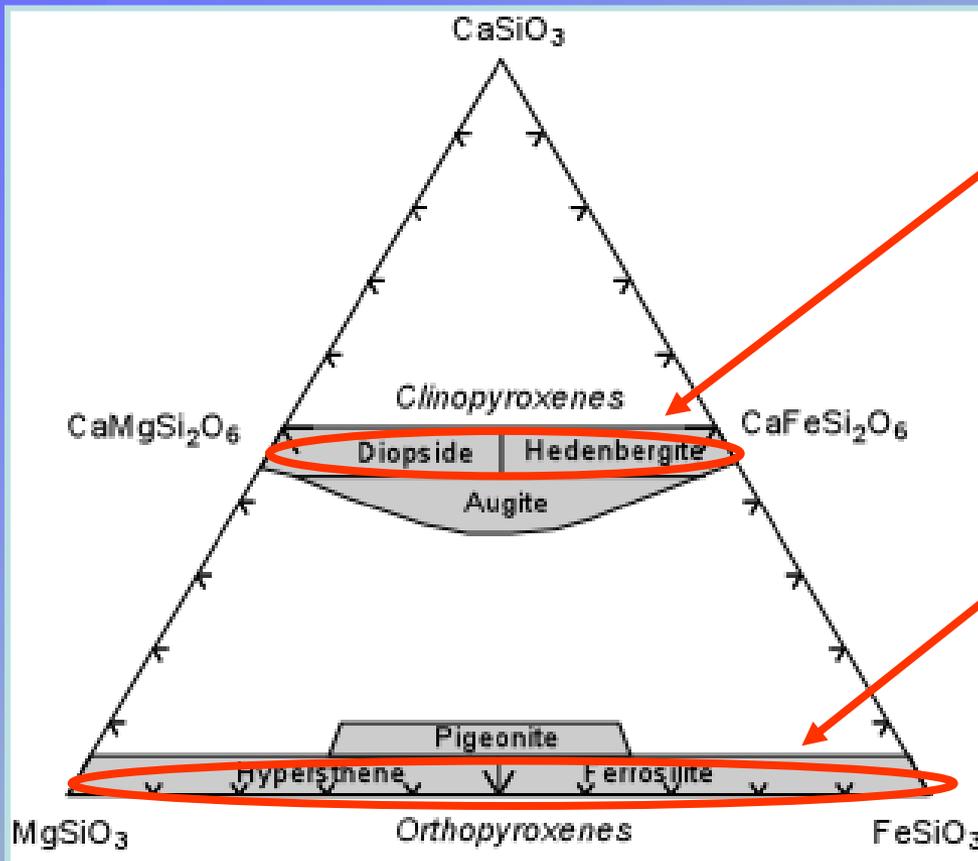


**CARACTERISTICAS  
ESTRUCTURALES DE  
PIROXENOS**

# GEOQUÍMICA DE LOS PIROXENOS



# Composiciones de piroxenos

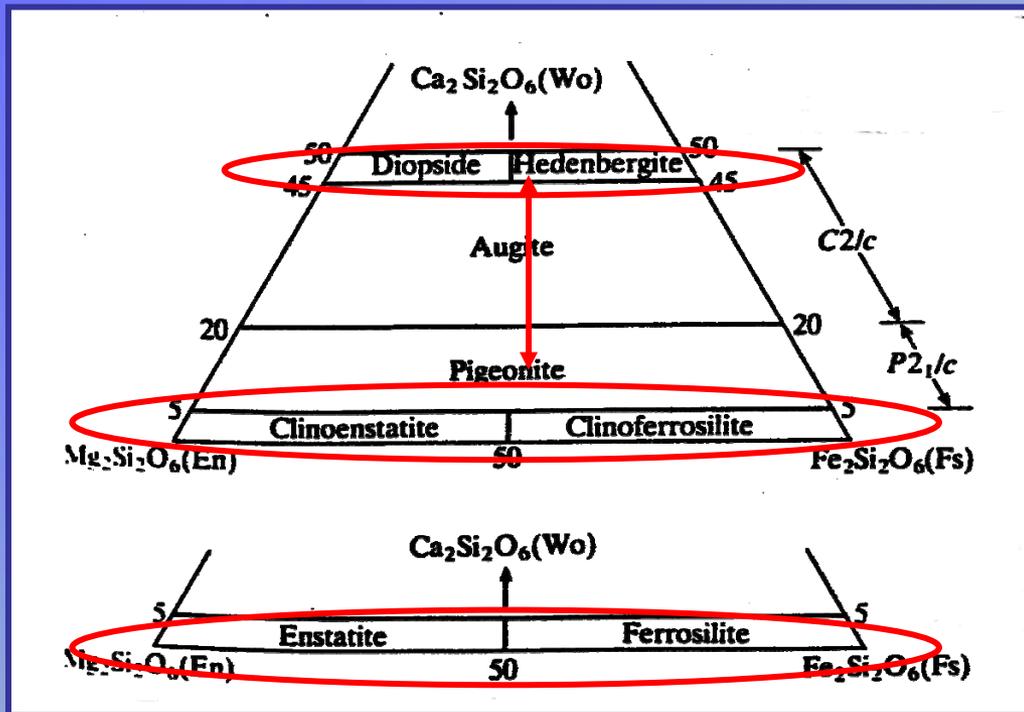


En **CLPX** a altas T existen soluciones sólidas completas entre los miembros finales con estructuras similares (Diópsido-Hedenbergita, y Clinonestatita-Clinoferrosilita).

En los **Opx**, los dos miembros finales, tienen Mg y Fe en M1 y M2, existiendo una solución sólida completa. La solución sólida entre Fe y Mg no es ideal, y a bajas T existe una tendencia al ordenamiento de Fe en M2 y Mg en M1.

**Cambios estructurales** → f catión presente, las s.s. llegan a ser **tan limitadas** como lo sean las diferencias estructurales entre los miembros finales  
→ transformaciones complejas, → procesos de exolución durante el enfriamiento.

# SOLUCIONES SÓLIDAS



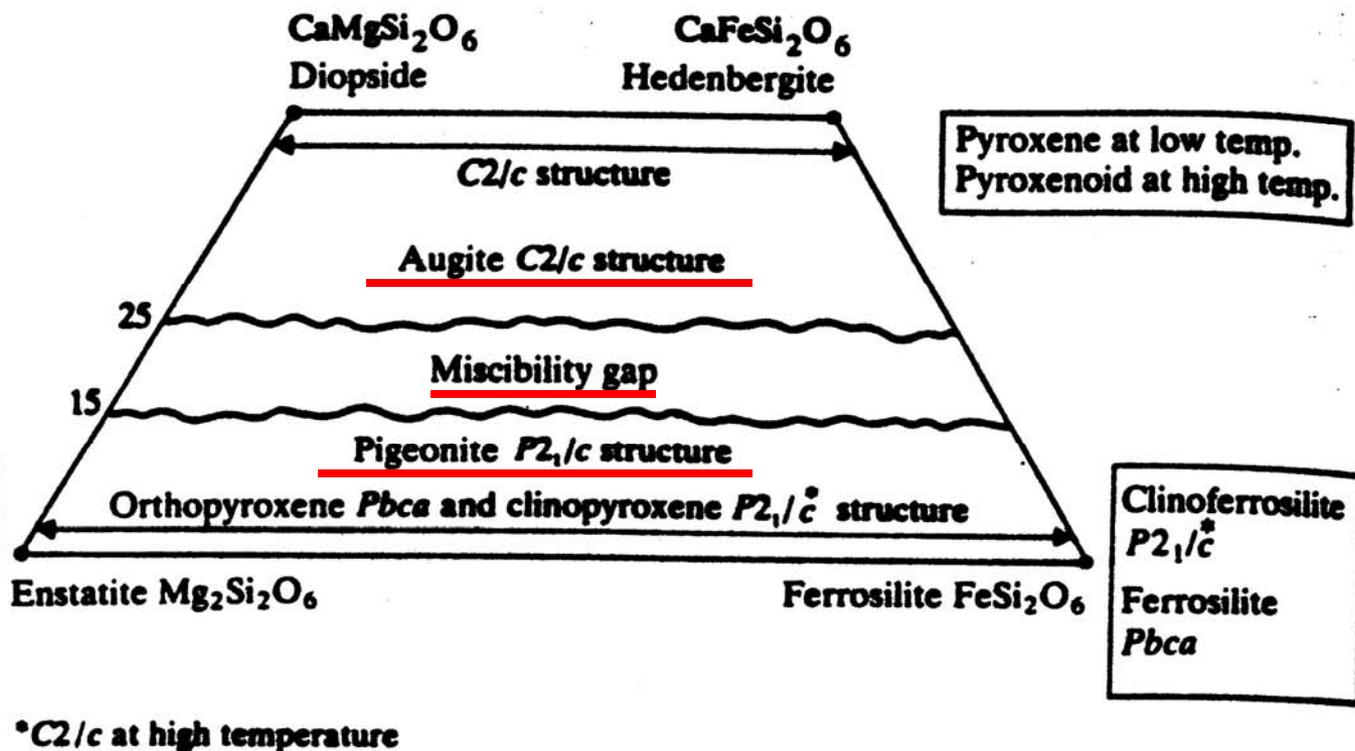
- Los Px de Mg-Fe son una sol.sol. completa

Hay **CLINO Y ORTO**

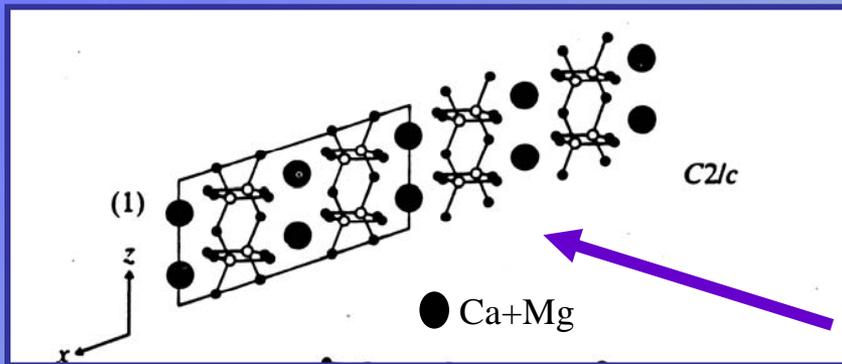
- Los Px pobres en Ca tienen sol.sol. entre Mg y Fe, **NO** hasta los ricos en Ca

- Los Px ricos en Ca tienen sol.sol. entre Mg y Fe, pero limitada con los pobres en Ca

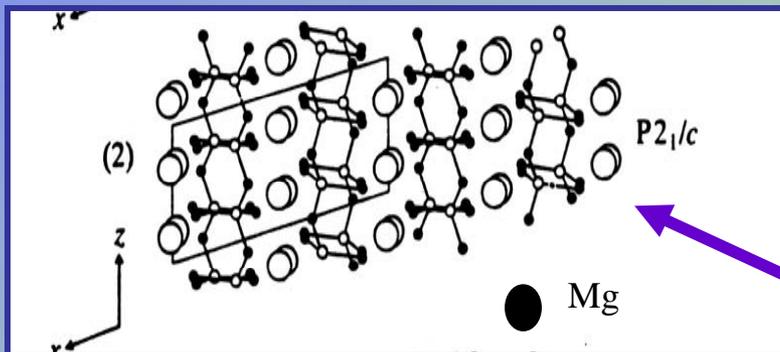
# ¿Qué sucede cuando las estructuras de los Piroxenos van siendo mas pobres en Ca



# Diferencias estructurales entre Piroxenos ricos y pobres en Ca



- **M1** ocupado por Mg (o Fe) en  $NC=6$ . **M2** por Ca en  $NC=8$   
ESTRUCTURA TIPO  
DIOPSIDO  $C2/c$  - PX RICOS  
EN Ca **MONOCLÍNICOS**

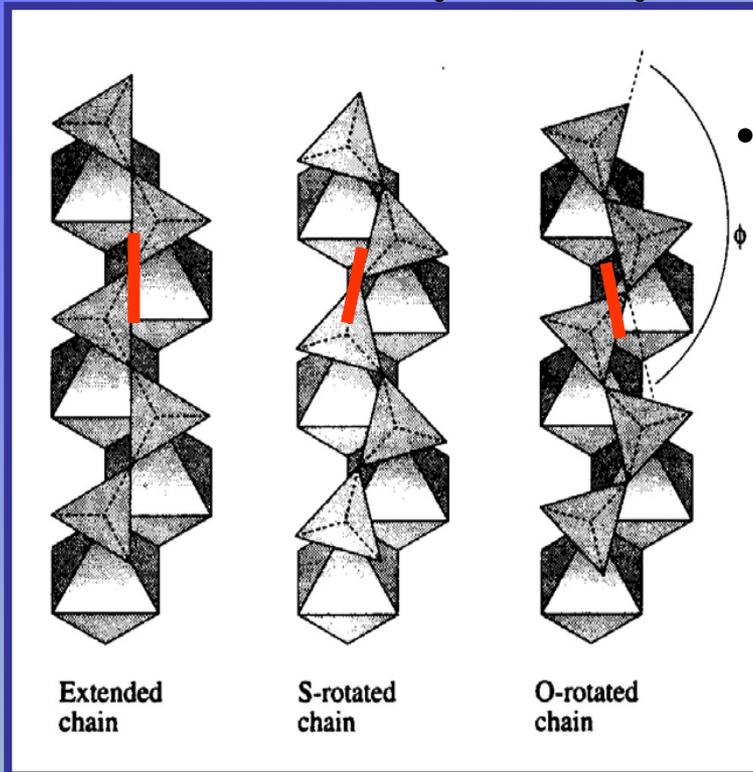


- Si ambas posiciones **M1** y **M2** están ocupadas por **Mg** (o Fe) en  $NC=6$  PX de Mg-Fe. Las cadenas se acortan

¿ POR QUÉ?

LA SIMETRÍA SE REDUCE PASANDO AL GRUPO ESPACIAL  $P2_1/c$

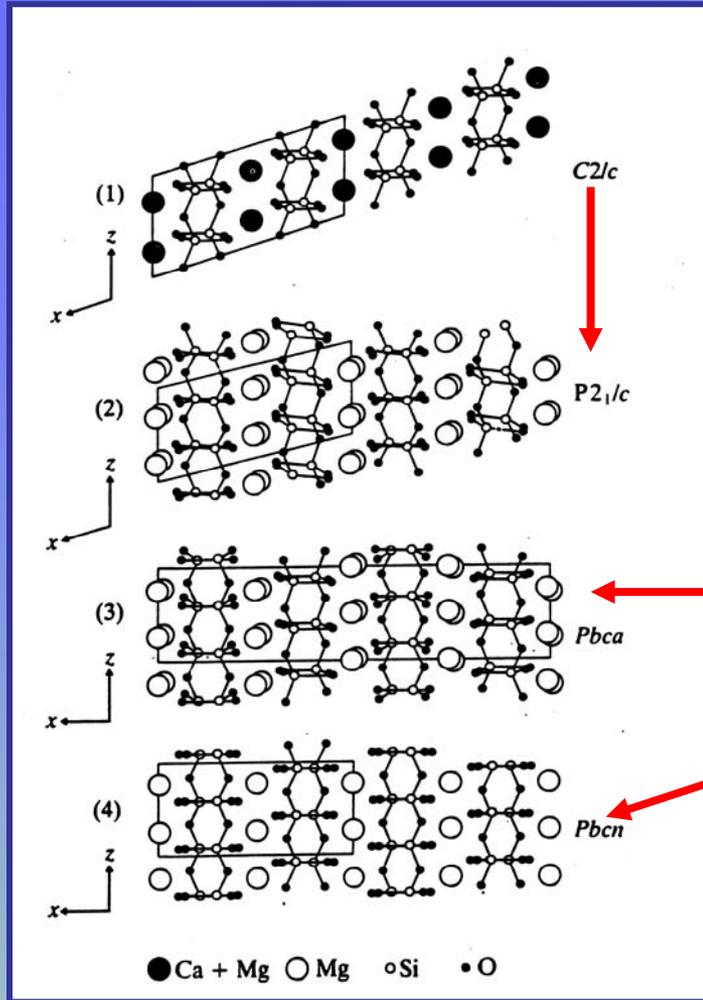
- Las cadenas Si-O se acortan para adaptarse a la posición M2, que es ahora más pequeña por estar ocupada por Mg



- Para acortarse (un 4%) las cadenas rotan, unas hacia un lado (**Cadena S**) y otras al otro (**Cadena O**)

**LAS CADENAS YA NO SON IGUALES: SE PIERDE SIMETRÍA**

# RESULTADO



1) Se reduce la simetría del grupo espacial de los Px ricos en Ca ( $C2/c$ )

a: ( $P2_1/c$ )

PX pobres en Ca: Pigeonita

Px de Mg-Fe: Clinoenstatita-Clinoferrosilita ( $P2_1/c$ )

2) Se resuelve la estructura adoptando simetría rómbica: ORTOPIROXENOS

Enstatita-Ferrosilita ( $Pbca$ )

- **RICOS EN Ca** (Monoclínicos,  $C2/c$ )

**Aumento de la T**

-Cadenas más **rectas** que a bajas temperaturas.

-Cadenas **simétricamente equivalentes**.

→ **El resultado es una estructura monoclínica**

el Ca está en M2, con NC=8,

el Mg en M1, con NC=6.

**Descenso de la T**

-La presencia de Ca impide el acortamiento de las cadenas.

-Las composiciones ricas en Ca presentan tanto a bajas como a altas temperaturas el mismo grupo espacial →  $C2/c$ .

# • POBRES EN Ca (Ortorrómicos, Pbc<sub>a</sub>)

## Aumento de la T

-Las cadenas están curvadas y no son equivalentes.

\*En composiciones bajas en Ca, → M1 y M2 tienen coordinación octaédrica Fe (M2) y Mg (M1).

-A unos 500°C, el Fe y el Mg empiezan a desordenarse, expandiéndose los huecos M y pasando de estructuras rómbicas Pbc<sub>a</sub> a monoclinicas C2/c.

## Descenso de la T

- Las estructuras C2/c pasan a P2<sub>1</sub>/c, en lugar de a la original Pbc<sub>a</sub>. (la existencia de Ca impide el acortamiento de la cadena)

- Transformación es desplazativa y más sencilla en términos de energía.

# COMPOSICIONES INTERMEDIAS (AUGITA-PIGEONITA)

- El campo de estabilidad de las estructuras con grupo espacial  $C2/c$  se reduce con la disminución del contenido en Ca.

1) **Composiciones tipo augita:** conservan la estructura  $C2/c$  desde el punto de fusión hasta T ambiente. La presencia de Ca impide el colapso estructural.

2) **Composiciones tipo pigeonita:** presentan a altas temperaturas estructuras tipo augita  $C2/c$  y a bajas temperaturas estructuras tipo  $P21/c$ .

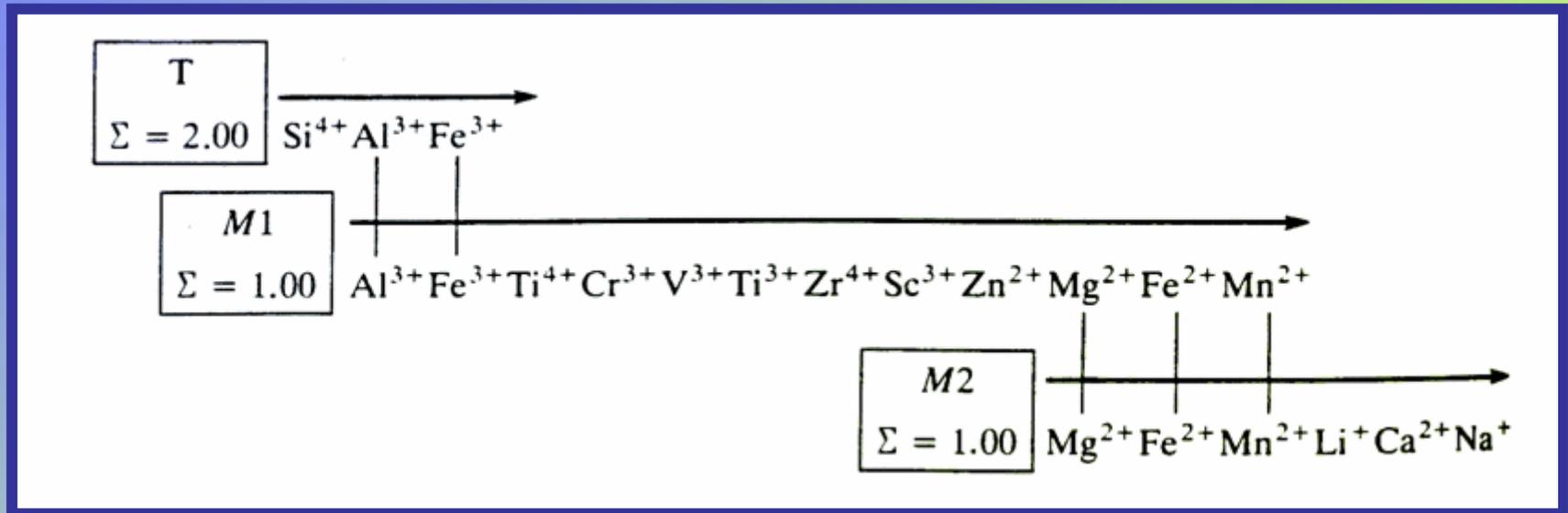
LAS s.s ENTRE AUGITA Y PIGEONITA SON SOLO  
POSIBLES A ALTAS TEMPERATURAS

# CONCLUSIONES SOBRE LOS CAMBIOS ESTRUCTURALES EN PIROXENOS

1. Los tetraedros de sílice permanecen inertes hasta  $T = 1000^{\circ}\text{C}$
2. Los huecos  $M$  son los que cambian de tamaño con la  $T$  y provocan la deformación de las cadenas.
3. Las cadenas de tetraedros más rectas se dan a altas  $T$  y/o para composiciones ricas en  $\text{Ca}$ , con grupos espaciales  $C2/c$ .

4. La presencia de **Ca en el hueco M2 impide el acortamiento** de las cadenas al descender la T, permaneciendo en coordinación 8 incluso a bajas T
5. Si un catión como el Fe ocupa el hueco M2 la coordinación se reduce a 6, incluso a altas T. **El catión que ocupa el M1 siempre tiene coordinación octaédrica.**
6. Los piroxenos con cationes pequeños en M1 y M2, presentan estructuras que se reorganizan fácilmente a bajas T, desplazándose unas respecto a otras a lo largo de su longitud.

# Fórmula general de los piroxenos



# CLASIFICACION DE LOS PIROXENOS

- La clasificación de los Px se basa en:
- el catión que ocupa la posición **M2**
- en la simetría: términos **CLINO Y ORTO**

# CLASIFICACIÓN DE PIROXENOS



**Table 14.1** Pyroxene Classification<sup>a</sup>

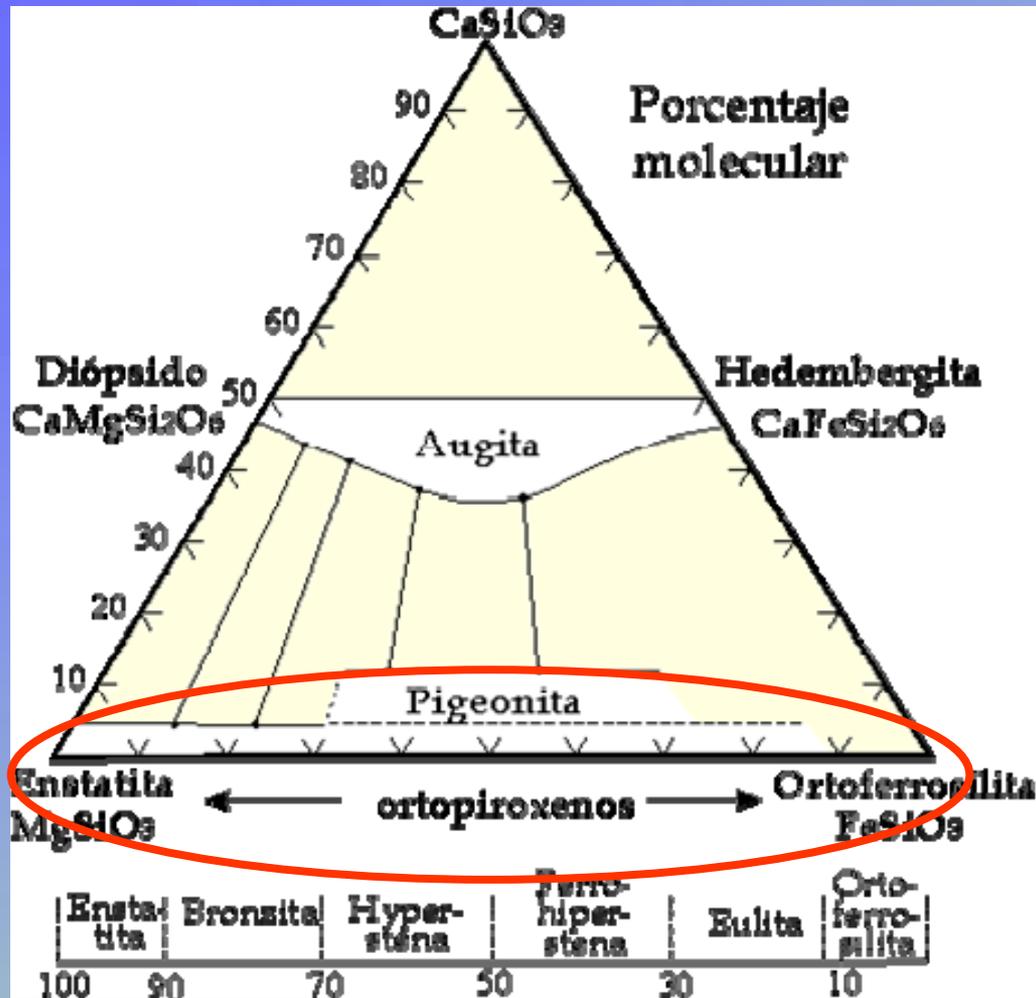
Group	X <b>M2</b>	Y <b>M1</b>	Z <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Mineral(s)	Symmetry	Comment
Magnesium–iron	Mg, Fe	Mg, Fe	Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Enstatite–ferrosilite	Orthorhombic	Orthopyroxene (opx)
	Mg, Fe, Ca	Mg, Fe	Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Pigeonite	Monoclinic	Low-Ca clinopyroxene
Calcium	Ca	Mg, Fe	Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Diopside–hedenbergite		Ca clinopyroxene (Ca-cpx or cpx)
		Mg, Fe, Al	(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Augite		
Calcium–sodium	Ca, Na	Mg, Fe <sup>2+</sup> , Al, Fe <sup>3+</sup>	Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Omphacite		Sodic–calcic clinopyroxene
		Mg, Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Aegirine–augite		
Sodium	Na	Al	Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Jadeite		Sodic clinopyroxene
		Fe <sup>3+</sup>	Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Aegirine		
Lithium	Li	Al	Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Spodumene		Lithian clinopyroxene

<sup>a</sup> Based on the general formula XYZ<sub>2</sub>O<sub>6</sub> where X cations occupy M2 sites, Y cations occupy M1 sites, and Z cations occupy tetrahedral sites.

La clasificación se establece en función de los cationes que ocupan el hueco **M2**, distinguiéndose 5 grupos

1. Piroxenos ferromagnesianos
2. Piroxenos cálcicos
3. Piroxenos calco-sódicos
4. Piroxenos sódicos
5. Piroxenos líticos

# 1. PIROXENOS FERROMAGNESIANOS



Enstatita ( $Mg_2Si_2O_6$ )-  
Ferrosilita ( $Fe^{2+}_2Si_2O_6$ ).

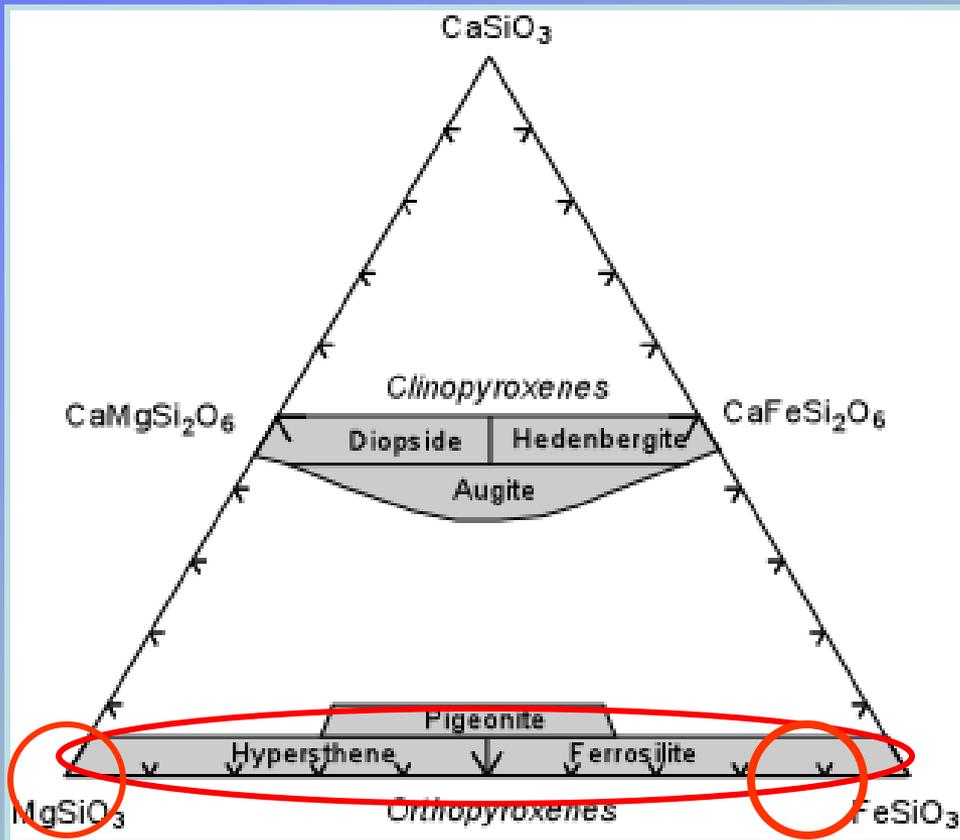
piroxenos que virtualmente no contienen  $Ca^{2+}$  en los huecos M.

También pertenece a esta familia la Pigeonita

( $Ca_{0.25}(Mg,Fe)_{1.75}Si_2O_6$ ).

# ORTOPIROXENOS

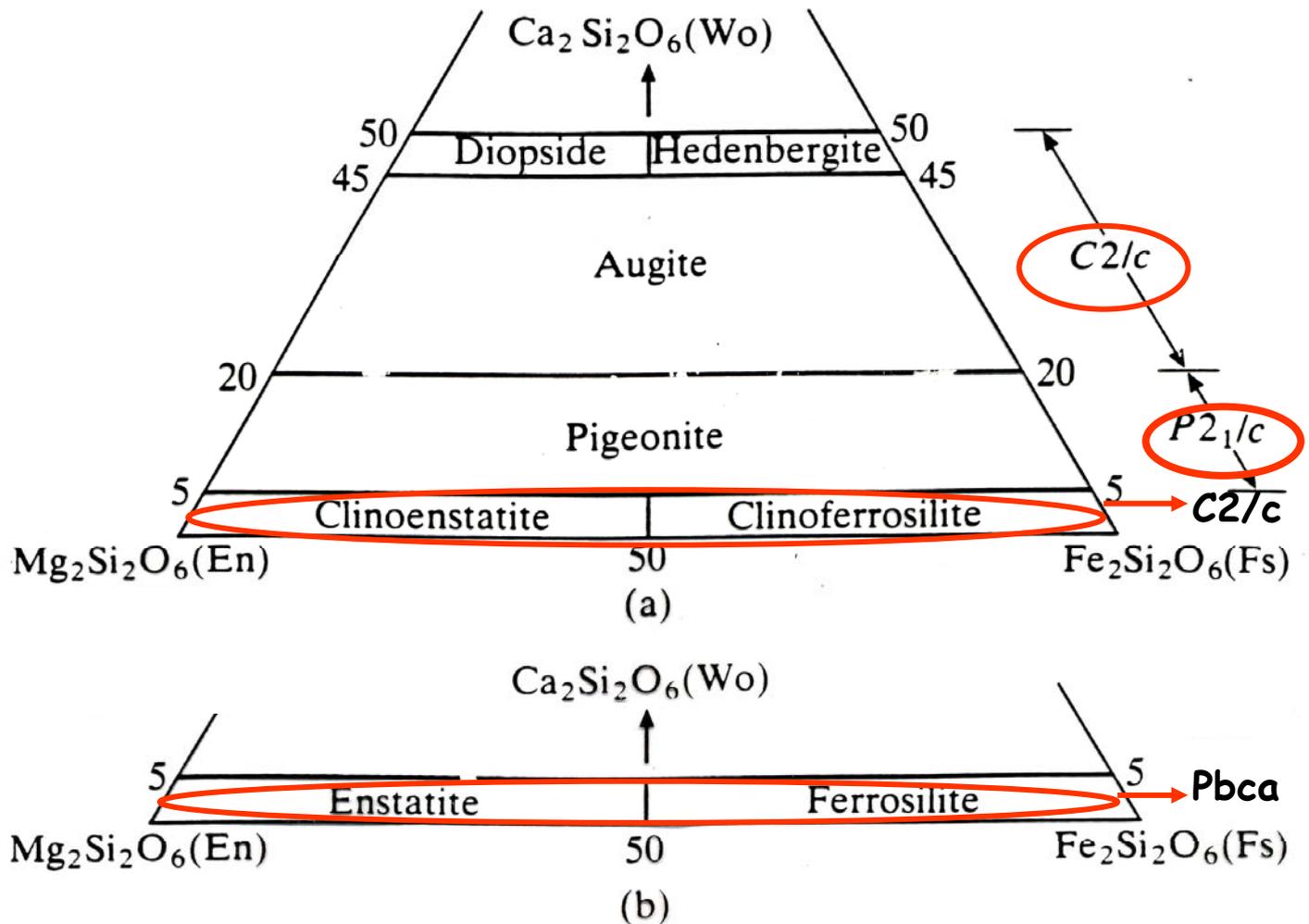
## Enstatita-Ferrosilita



- El término Ferrosilita es muy raro y lo habitual son los términos

Enstatita-Hypersthena

$\text{Mg}_{100}\text{Fe}_0 - \text{Mg}_{10}\text{Fe}_{90}$



**Fig. 50** Composition ranges and nomenclature of (a) the Ca–Mg–Fe clinopyroxenes, and (b) orthopyroxenes (after Morimoto, M., 1988, *Min. Mag.*, **52**, 535–50).

# La enstatita pura presenta cuatro tipos estructurales:

- **ORTORROMBICOS**

Enstatita (baja T) → Pbcn

Protoenstatita (alta T) → Pbcn

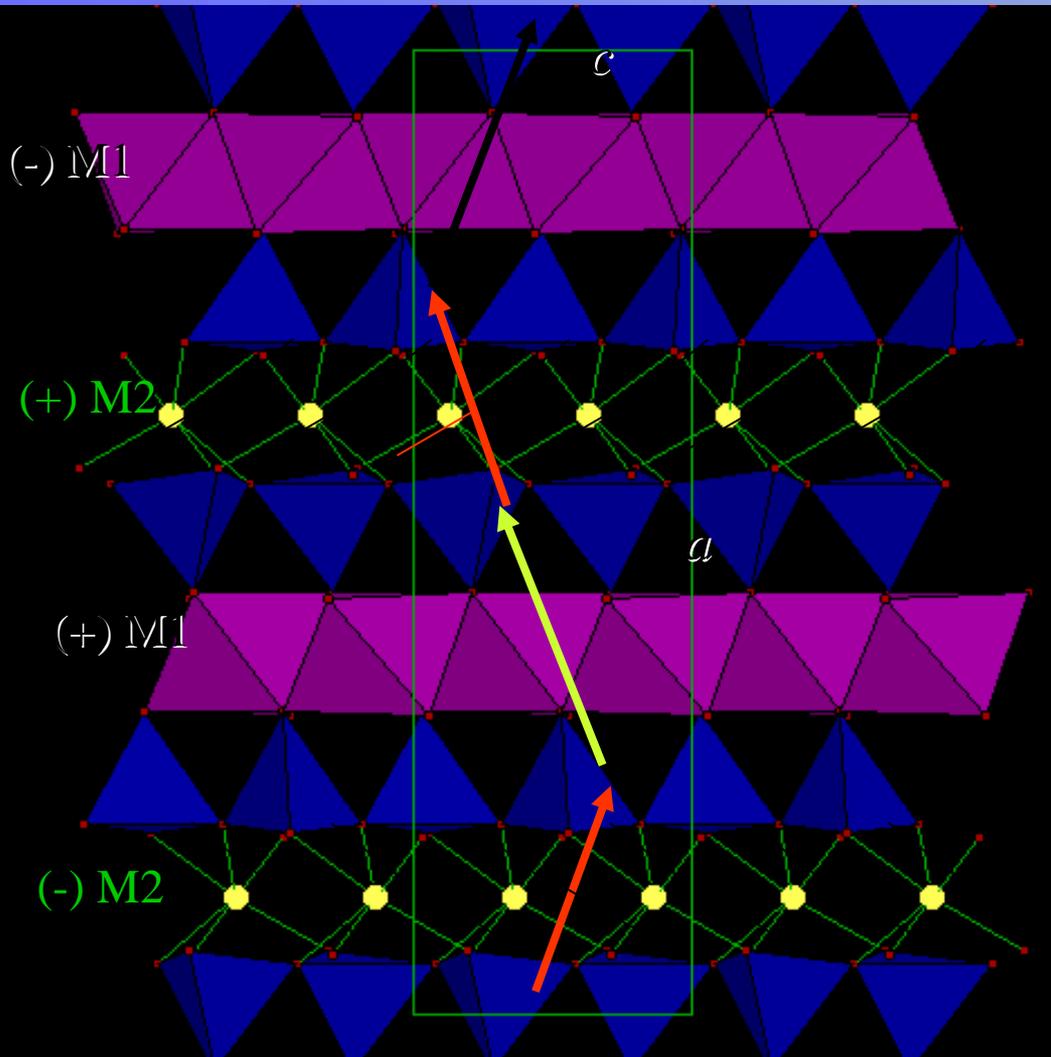
- **MONOCLINICOS**

Clinoenstatita (alta T) → C2/c

Clinoenstatita (baja T) → P21/c

La clinoenstatita y la clinoferrosilita no son Px comunes, apareciendo sólo en algunas rocas ígneas y metamórficas y en meteoritos.

# Ortopiroxenos



El grupo espacial es **Pbca** y las cadenas no son equivalentes.

Las rotaciones de las cadenas son **siempre en el mismo sentido** pero con distinta curvatura en "capas" alternas.

Los huecos M2 contienen cationes pequeños con  $NC=6$ . Al ser este hueco demasiado pequeño para el Ca, **no existe solución sólida** entre orto- y clinopiroxenos.

# Composición química

- Aunque los ortopiroxenos son básicamente silicatos ferromagnesianos, pueden contener otros cationes como: **Al, Ca, Mn, Fe<sup>3+</sup>, Ti, Cr y Ni.**
- **El Ca siempre en cantidades inferiores al 5%.**
- Los piroxenos con Cr y Ni se encuentran en rocas ígneas básicas y ultrabásicas.

# ORTOPIROXENOS: Enstatita-Ferrosilita



## PROPIEDADES FÍSICAS

**Hábito:** Prismático. **Color:** Pardo verdoso a castaño. También grisáceo, amarillento, blanco.

**Brillo:** Vítreo (submetálico en broncita).

**Dureza:** Media.

**Densidad:** Media-alta.



## Microscopio electrónico de Transmisión (HRTEM)

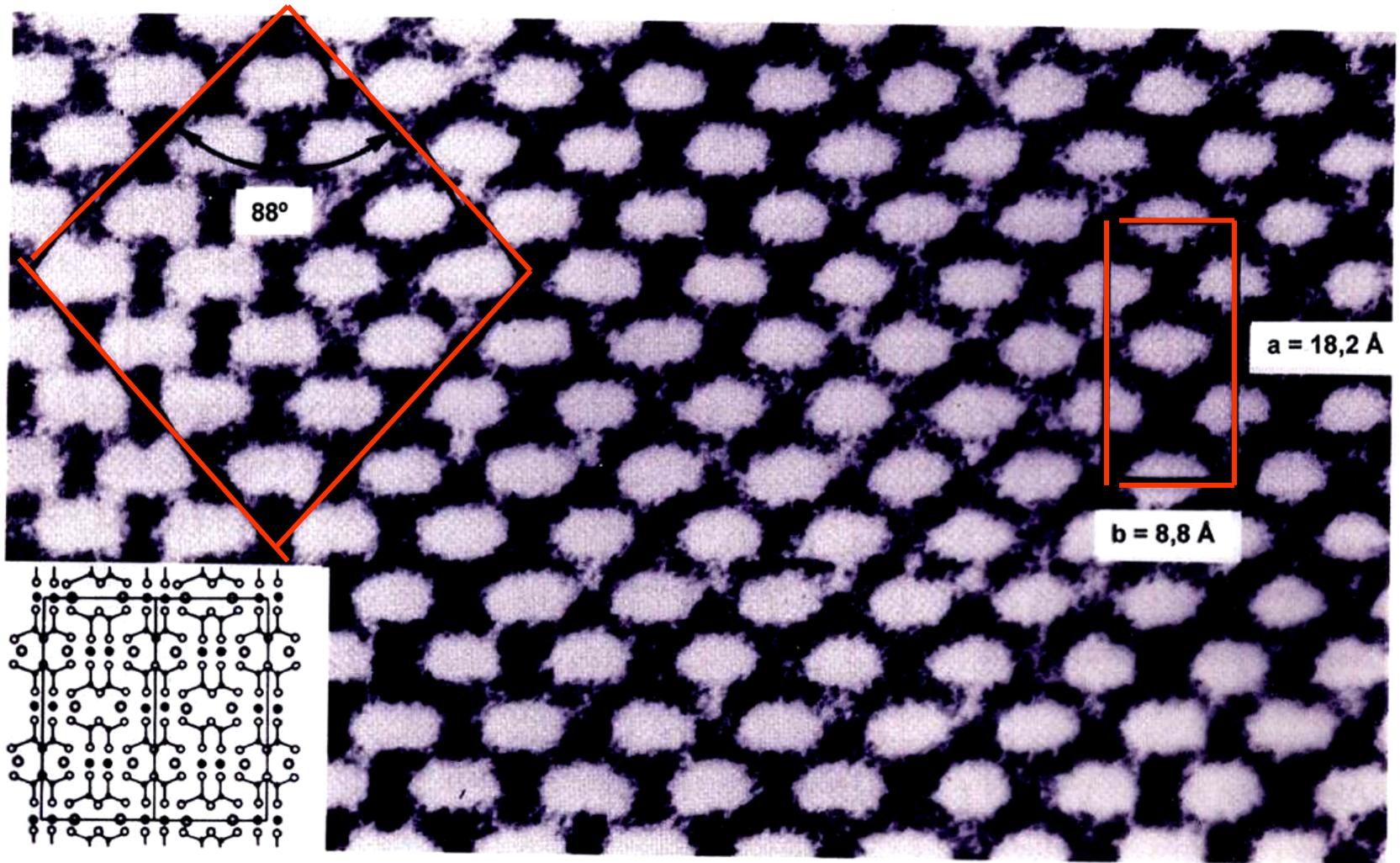


Imagen HRTEM de una sección a-b de enstatita. Las zonas en blanco corresponden a los huecos M2 en la estructura. (Buseck y Lijima, 1974).

# CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS

**Hábito:** Prismático // a c. Las secciones basales son octogonales o cuadradas.

**Exfoliación:** En secciones basales, dos direcciones, formando ángulos de  $93-87^\circ$ . Las secciones longitudinales presentan una dirección de líneas de exfoliación.

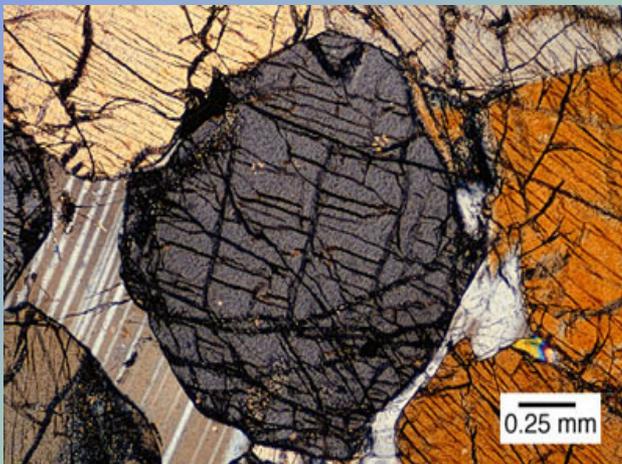
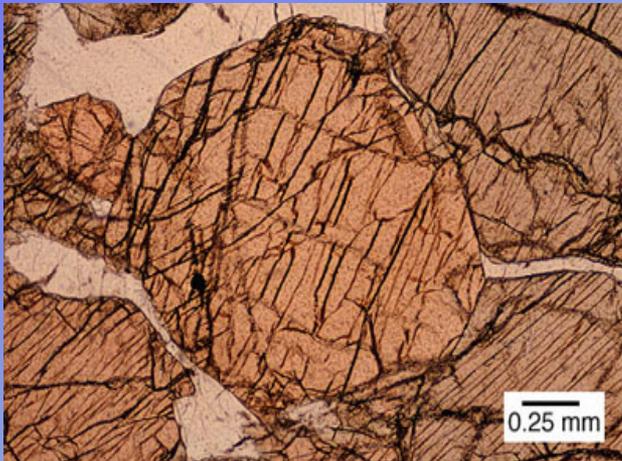
**Color:** Incoloro a verde pálido (variedades férricas).

**Pleocroísmo:** No suelen presentar o es muy débil. **Relieve:** Alto. **Extinción:** Recta.

**Birrefringencia:** Media-baja.

**Carácter óptico:** Biáxico (-) o (+).

**Alteraciones:** A serpentina, anfíboles.



La sustitución de Mg por Fe aumenta los parámetros de celdilla, sobre todo a y b.

# Génesis

- **Rocas ígneas básicas** (gabros, noritas,...) y **ultrabásicas** (asociado a diópsido, olivino, espinela,...). Son componentes mayoritarios en algunas piroxenitas.
- **Rocas metamórficas** de la facies de las granulitas.
  - Metamorfismo de grado medio de rocas arcillosas con altos contenidos en clorita y bajo contenido en Ca.