

**¿Qué es el hueso y cómo podemos
substituirlo?**

Dra. María Cristina Piña Barba

Instituto de Investigaciones en Materiales

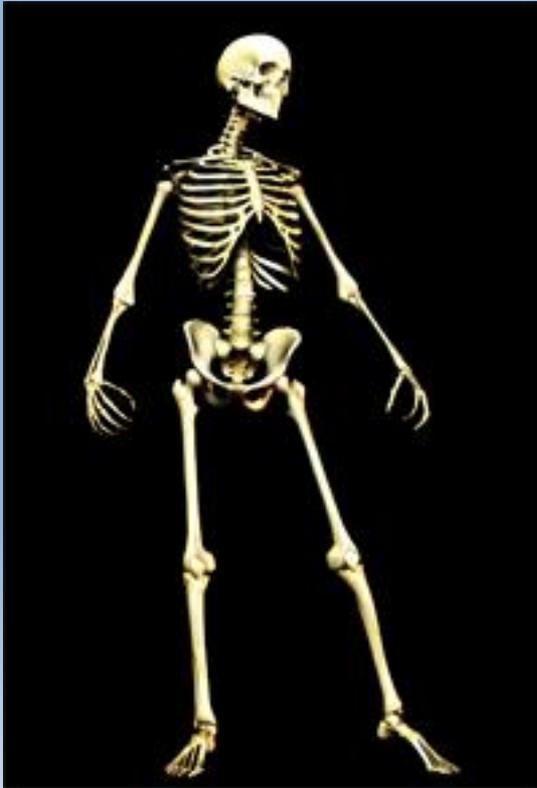
Universidad Nacional Autónoma de México



¿Qué encontramos de
nuestros antepasados?

¿vestigios de vida?





Funciones de los huesos: soporte, locomoción, protección de órganos, almacén de químicos, nutricional, transmisión del sonido.



FUNCIONES DEL HUESO

Biológicas

Regulación del metabolismo de ciertos iones: Ca, Na, H, Mg, P y es principal depósito de algunos de ellos.

Hematopoyesis: producción de células sanguíneas.

Mecánicas

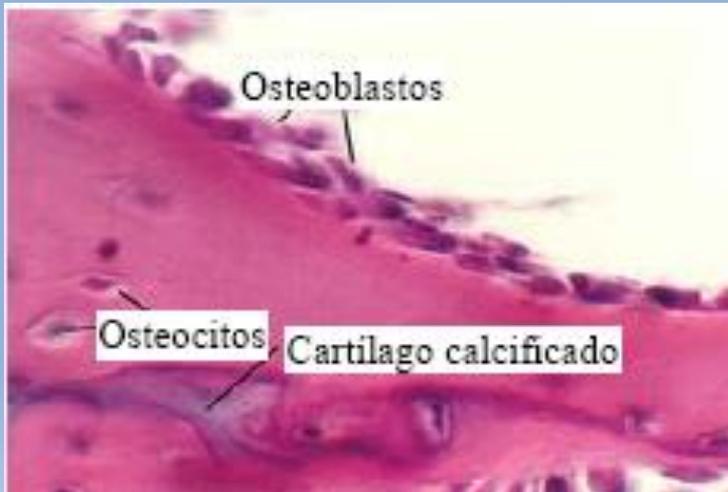
Protección de órganos principales

Estabilidad

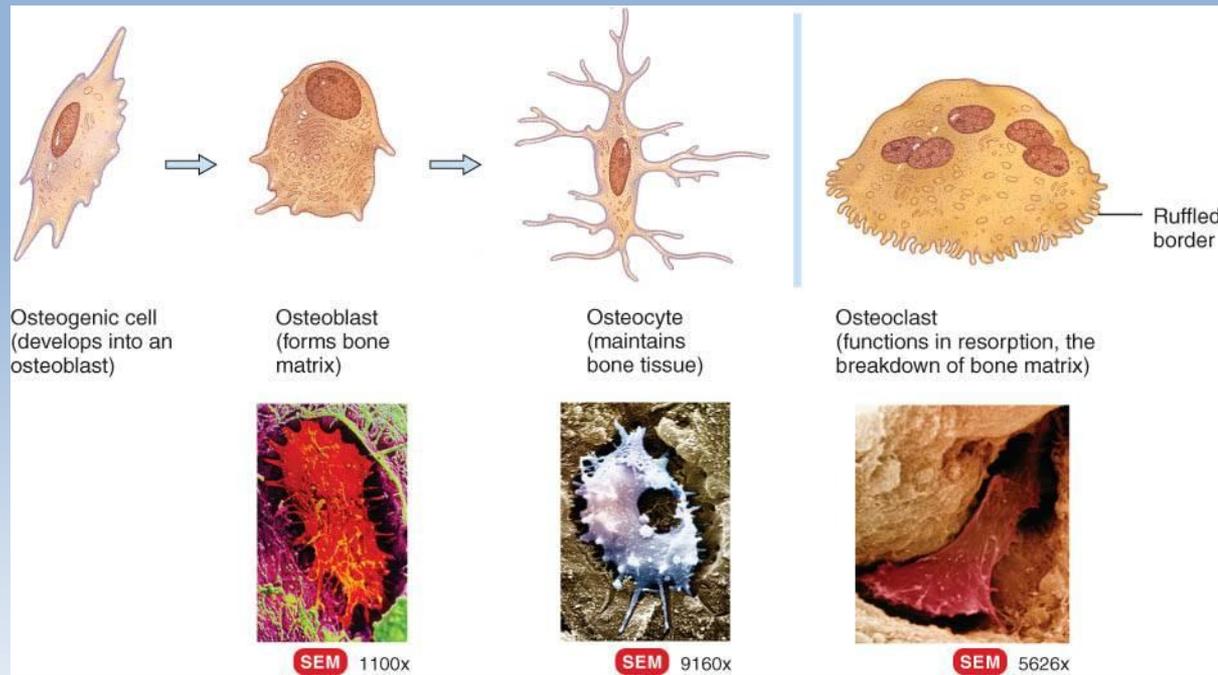
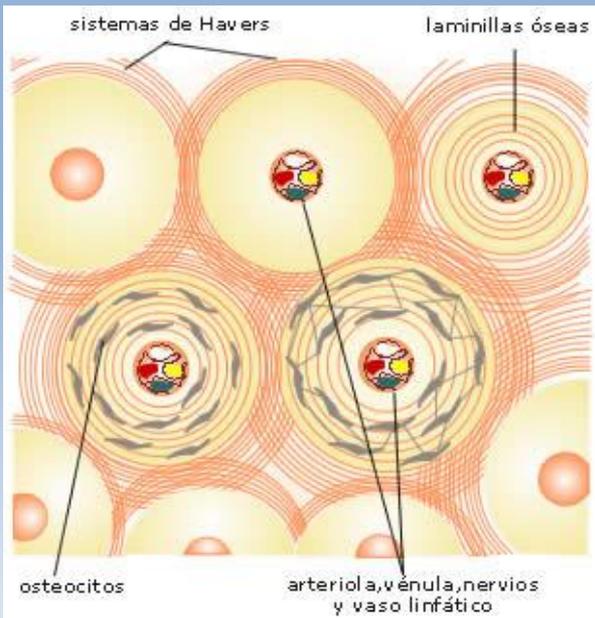
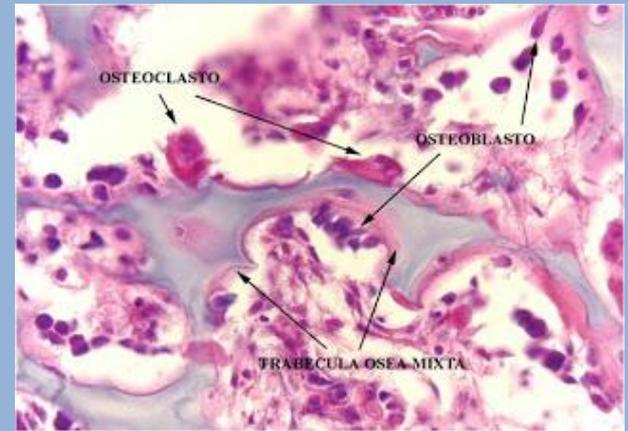
Movilidad

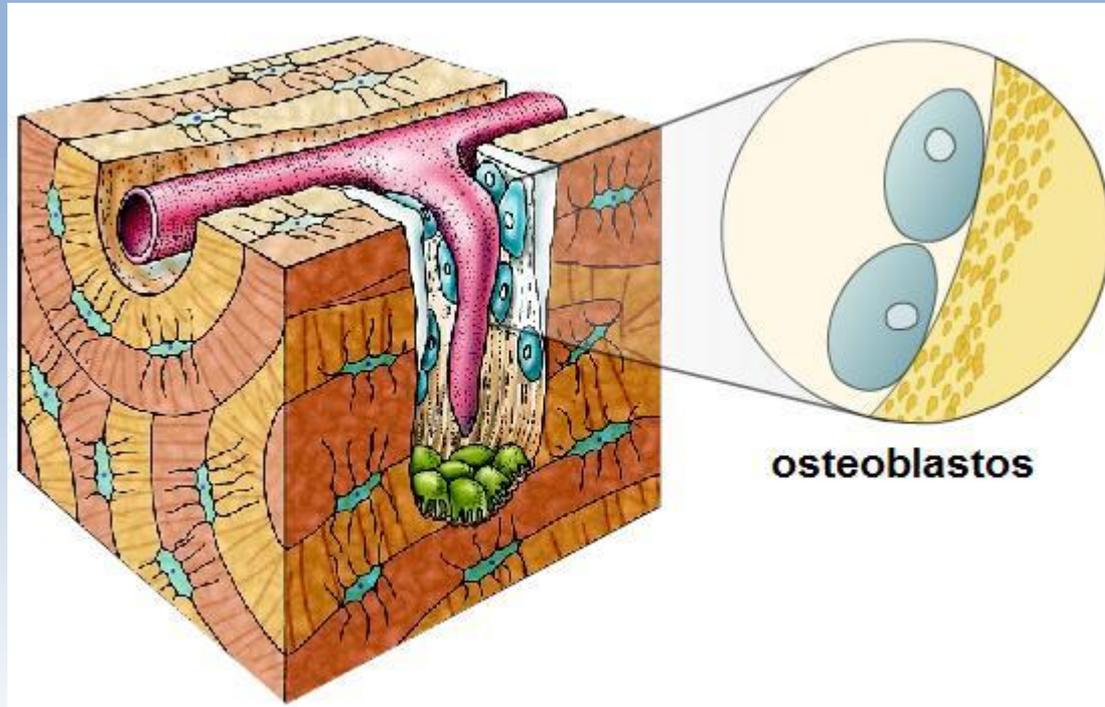
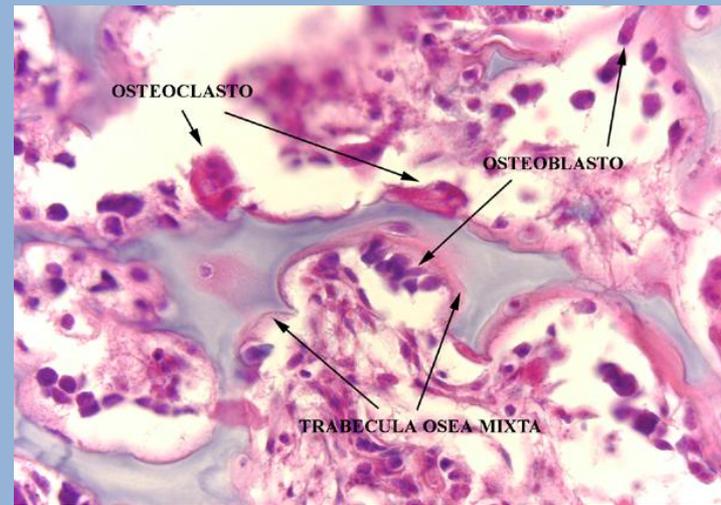
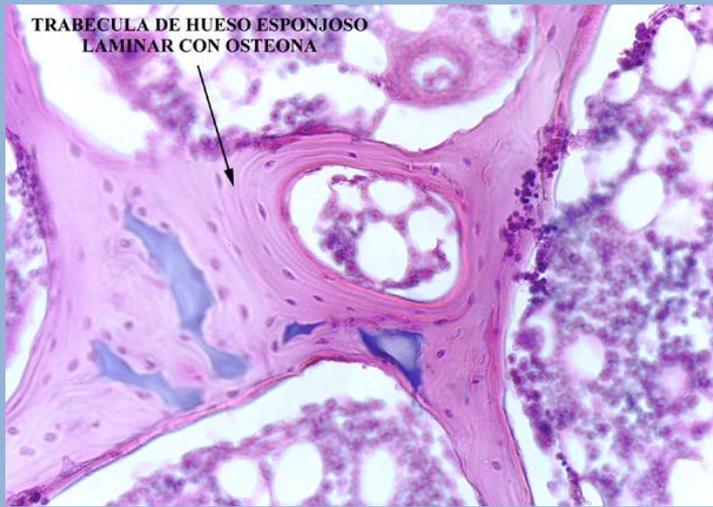
Trasmisión del sonido

El hueso es un tejido VIVO, las células que segregan la matriz extracelular son los fibroblastos y los osteoblastos, estos últimos evolucionan a osteocitos. Los osteoclastos son las células que reabsorben la matriz ósea.



Está formado por la matriz ósea, que es un material intercelular calcificado (Fig.1) y por células características del tejido: osteoblastos, osteocitos y osteoclastos.



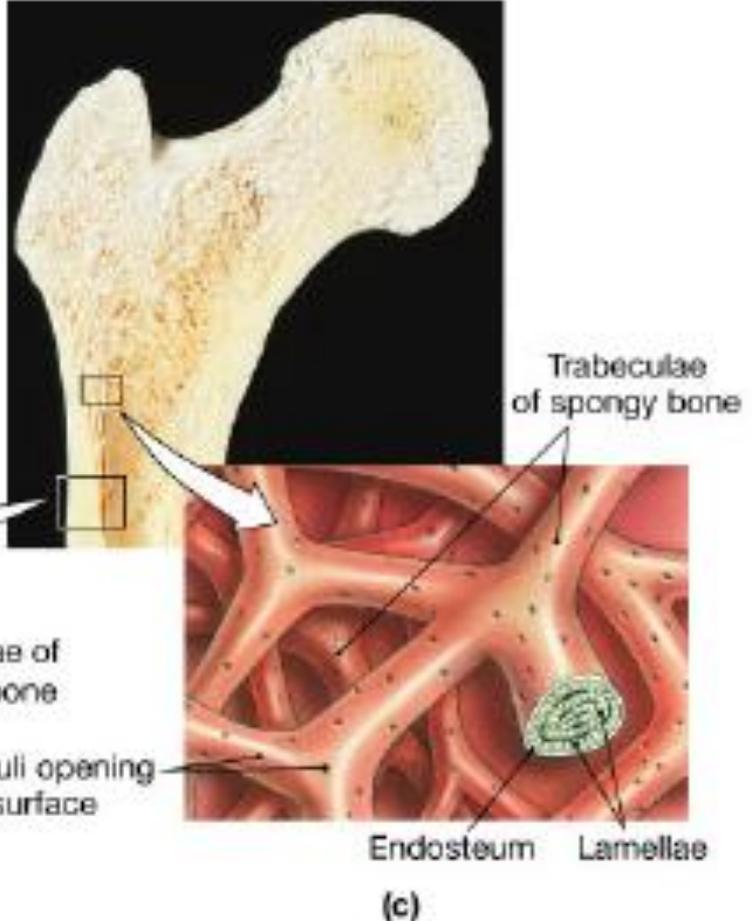
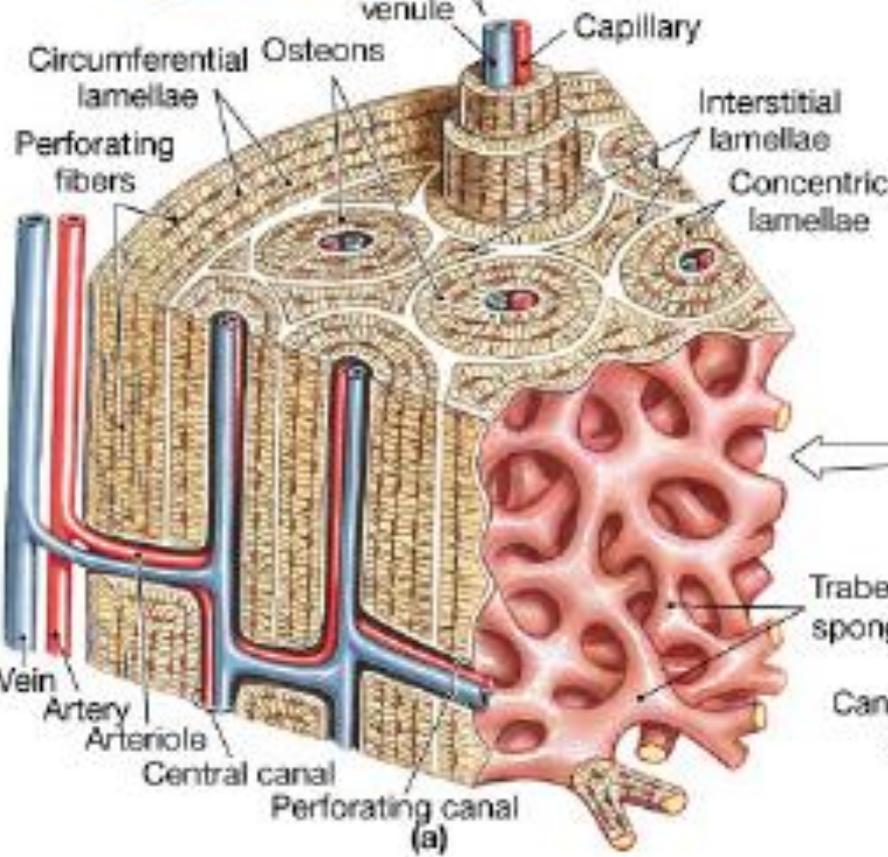
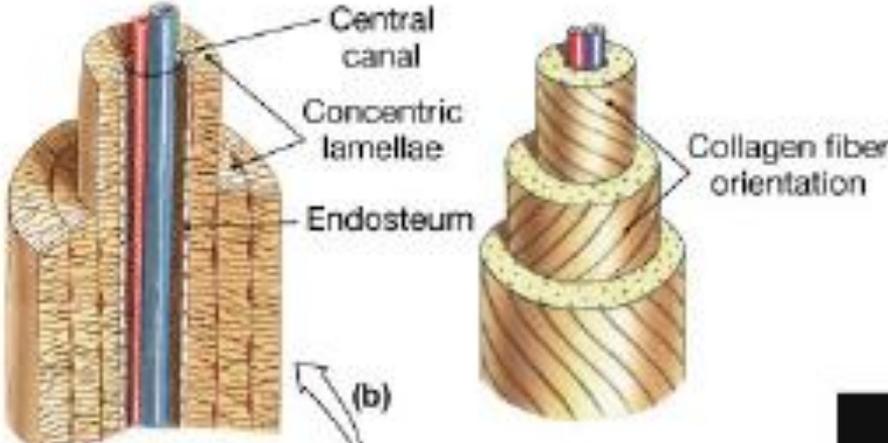


Osteoblastos: son las células encargadas de sintetizar la matriz ósea. Se ubican siempre en la superficie del tejido óseo ya que este sólo puede crecer por aposición.

Osteocitos, responsables de la manutención de la matriz ósea, se ubican en cavidades o lagunas rodeadas por material intercelular calcificado, su nutrición depende de canalículos que penetran la matriz ósea y conectan a los osteocitos vecinos entre sí y con canales vasculares que penetran al hueso o que se ubican en las membranas conjuntivas que revisten la superficies del hueso (periosteo y endostio). De hecho ningún osteocito se encuentra a más de una fracción de mm de un capilar sanguíneo.

Osteoclastos, células responsables de la reabsorción del tejido óseo, participan en los procesos de remodelación de los huesos y pueden encontrarse en depresiones superficiales de la matriz ósea llamadas lagunas de Howship.

¿Cómo está hecho el hueso?



Colágena tipo 1.

Aminoácidos libres

Cadena molecular

Cadena molecular de:
hélice simple
de: doble hélice

de: triple hélice

Tropocolágena

Fibrilla de colágena

Tejido conectivo

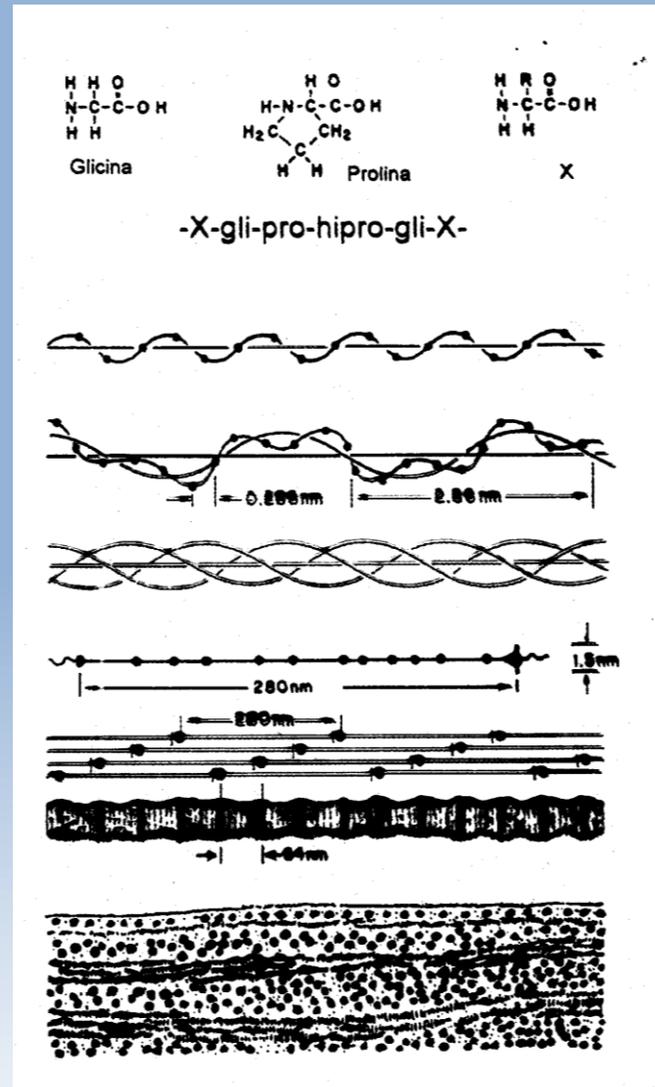
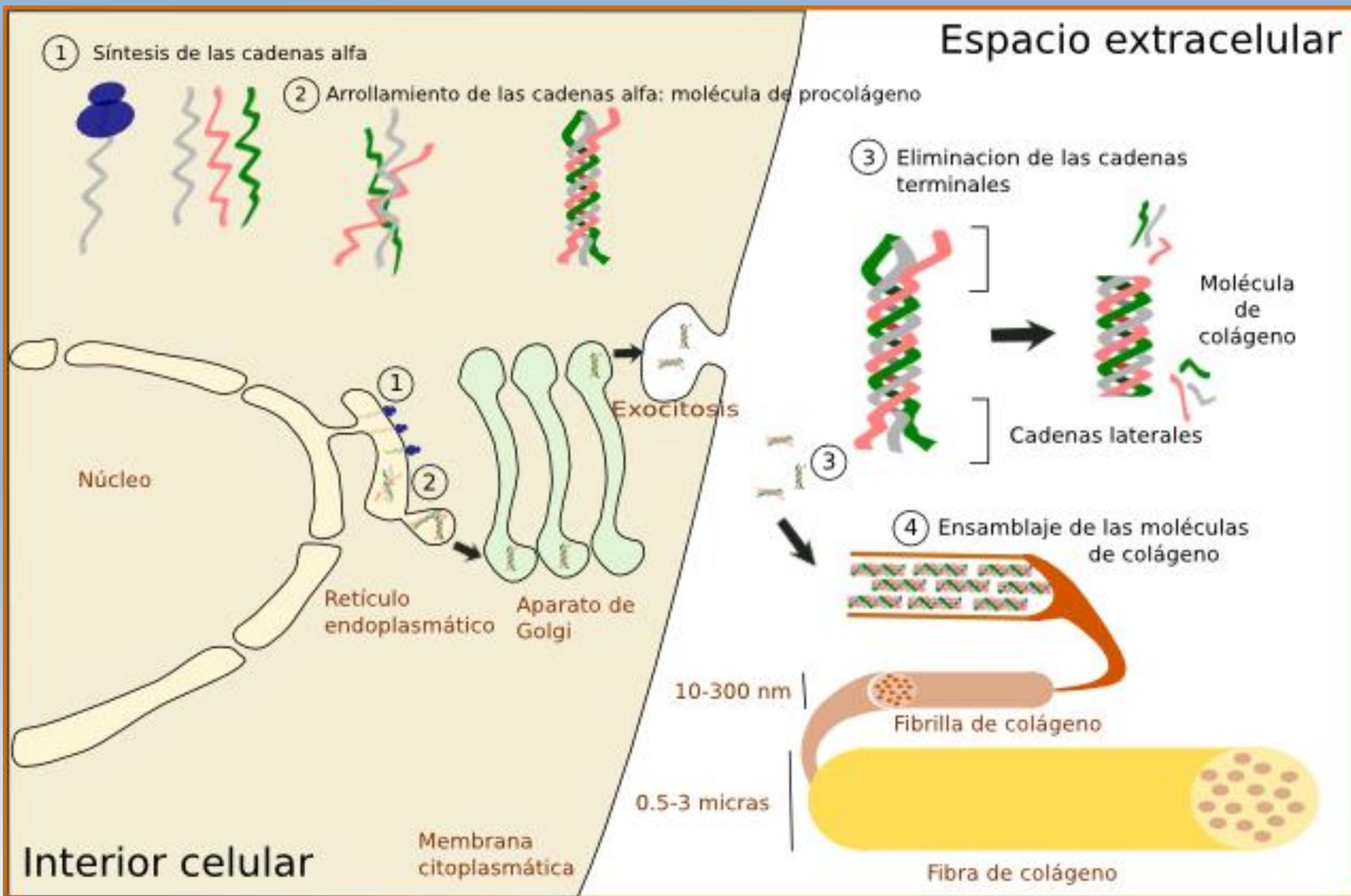


Diagrama que muestra la formación de colágena, visualizada en 7 pasos, a partir de los aminoácidos.



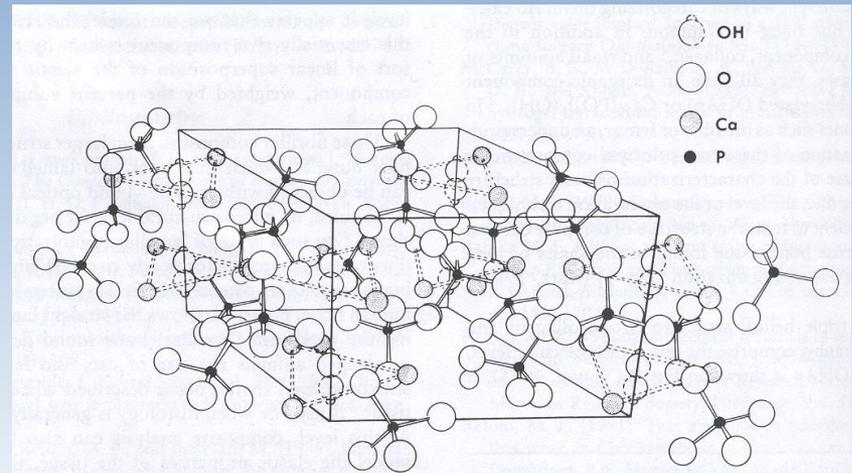
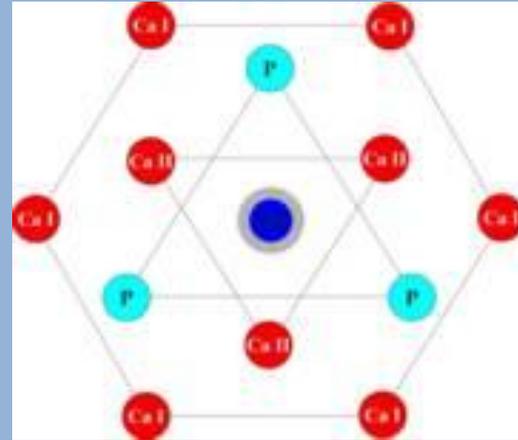
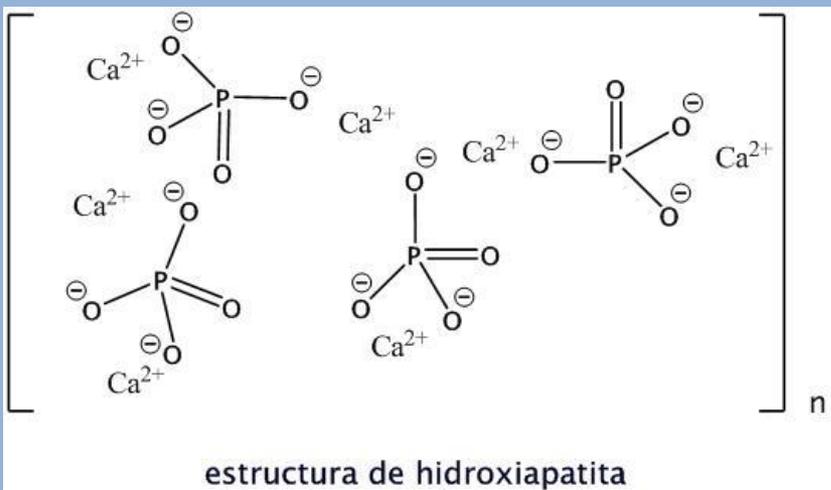
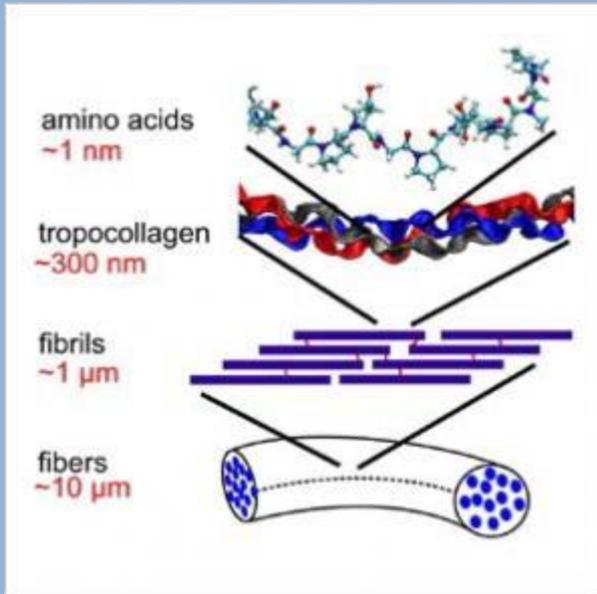
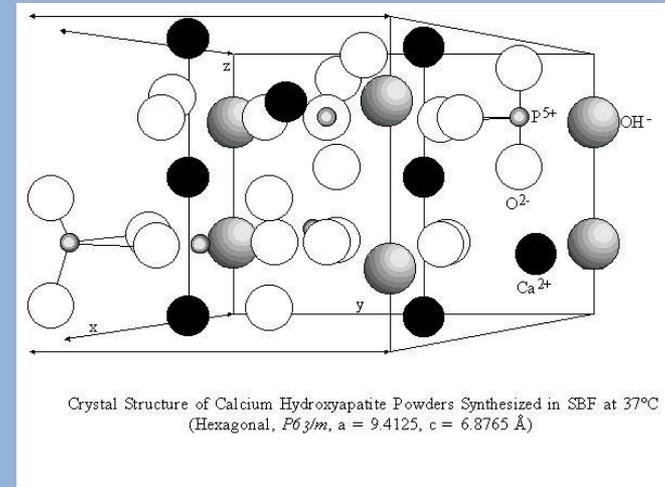


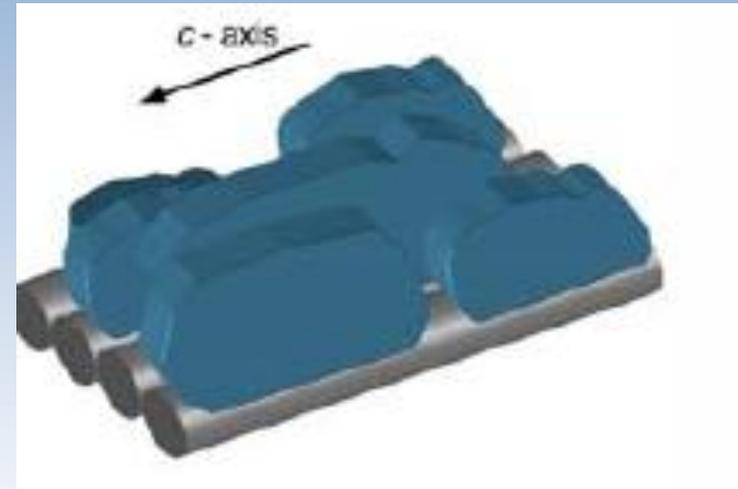
FIG. 2. Hexagonal hydroxyapatite. Each OH position is statistically only 50% occupied, as indicated by the dotted outline of half of each OH group. (Reproduced courtesy of the Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, from R. A. Young in *Physico-chimie et Cristallographie des Apatites d'Interest Biologique*, CNSR Publ. No. 230, 1975.)

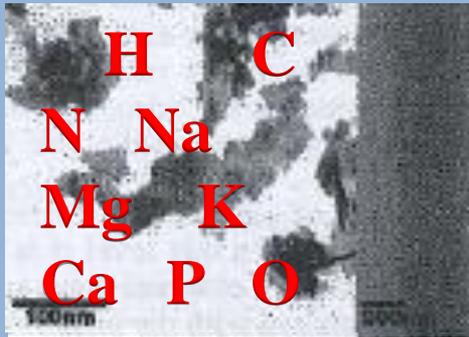


Fibras de colágena



Cristal de Hidroxiapatita

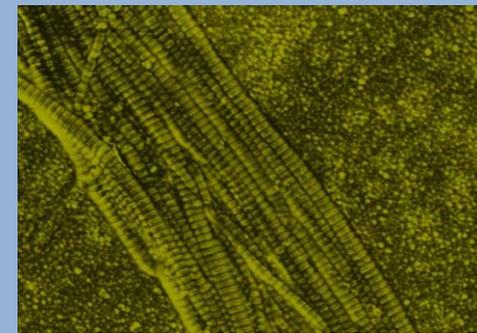




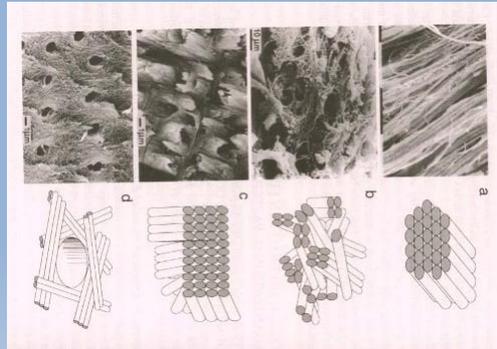
1. Componentes



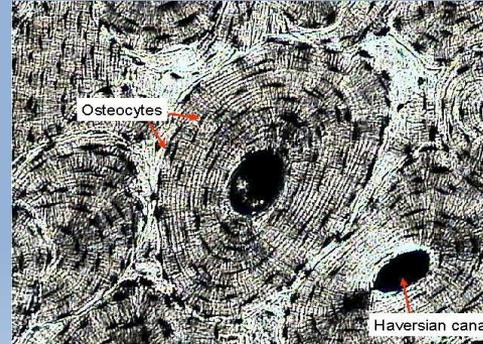
2. Fibra de colágena



3. Arreglos de fibras



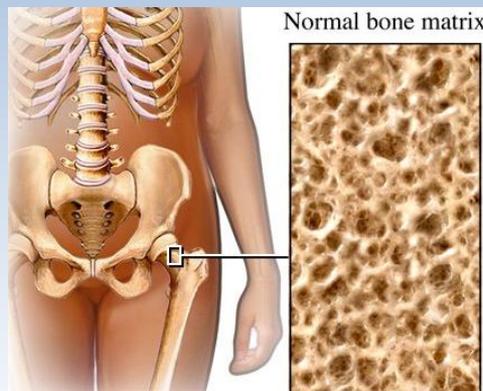
4. Patrones de arreglos



5. Osteonas



6. Hueso poroso

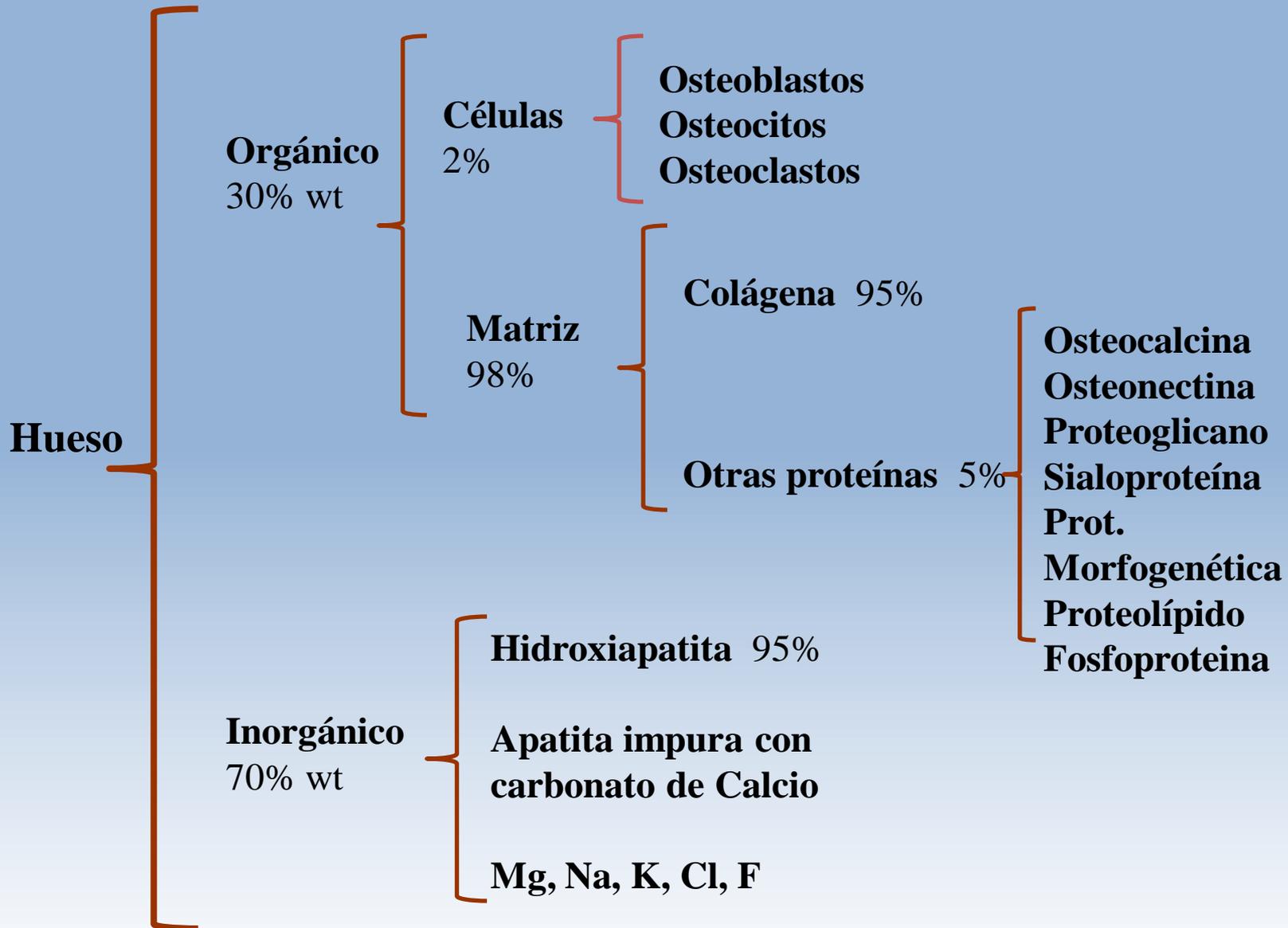


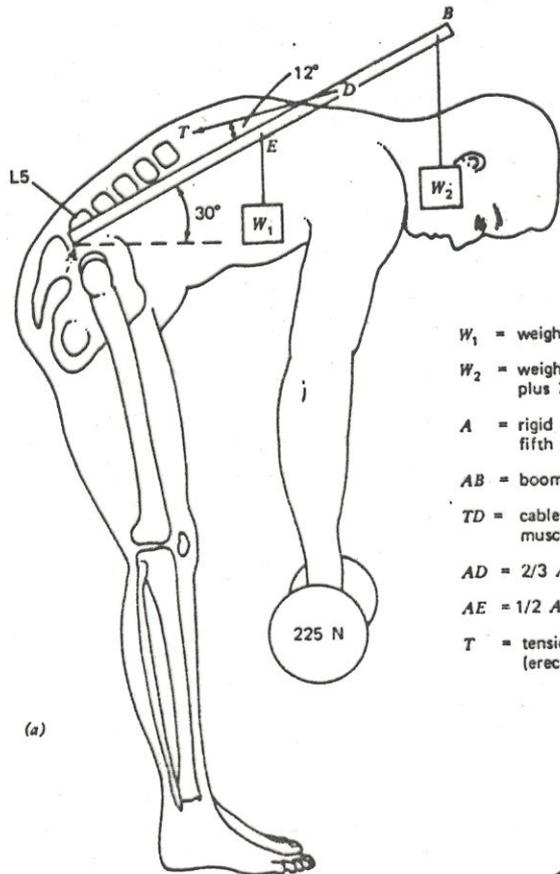
7. Hueso completo

El hueso es un material nanocompuesto, lo forman fibras de colágena, cristales de apatita (nm) y materiales biológicos.

Se encuentra organizado en distintos niveles estructurales.

COMPOSICIÓN DEL HUESO

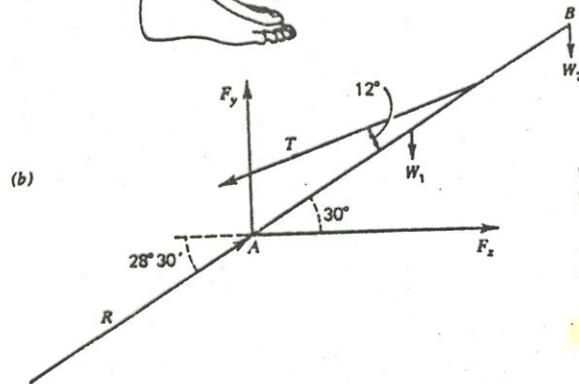




- W_1 = weight of body trunk
- W_2 = weight of arms and head plus 225 N
- A = rigid fulcrum at about fifth lumbar vertebra
- AB = boom (body trunk)
- TD = cable representing effective muscle
- AD = $\frac{2}{3}$ AB
- AE = $\frac{1}{2}$ AB
- T = tension in the muscle (erector spinalis)

$225 \text{ N} \sim 25 \text{ kg}$

(a)



$$\begin{aligned}
 W_1 &= 320 \text{ N} \\
 W_2 &= 382 \text{ N} \\
 T &= 3380 \text{ N} \\
 F_x &= 3225 \text{ N} \\
 F_y &= 1748 \text{ N} \\
 R &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\
 R &= 3803 \text{ N}
 \end{aligned}$$

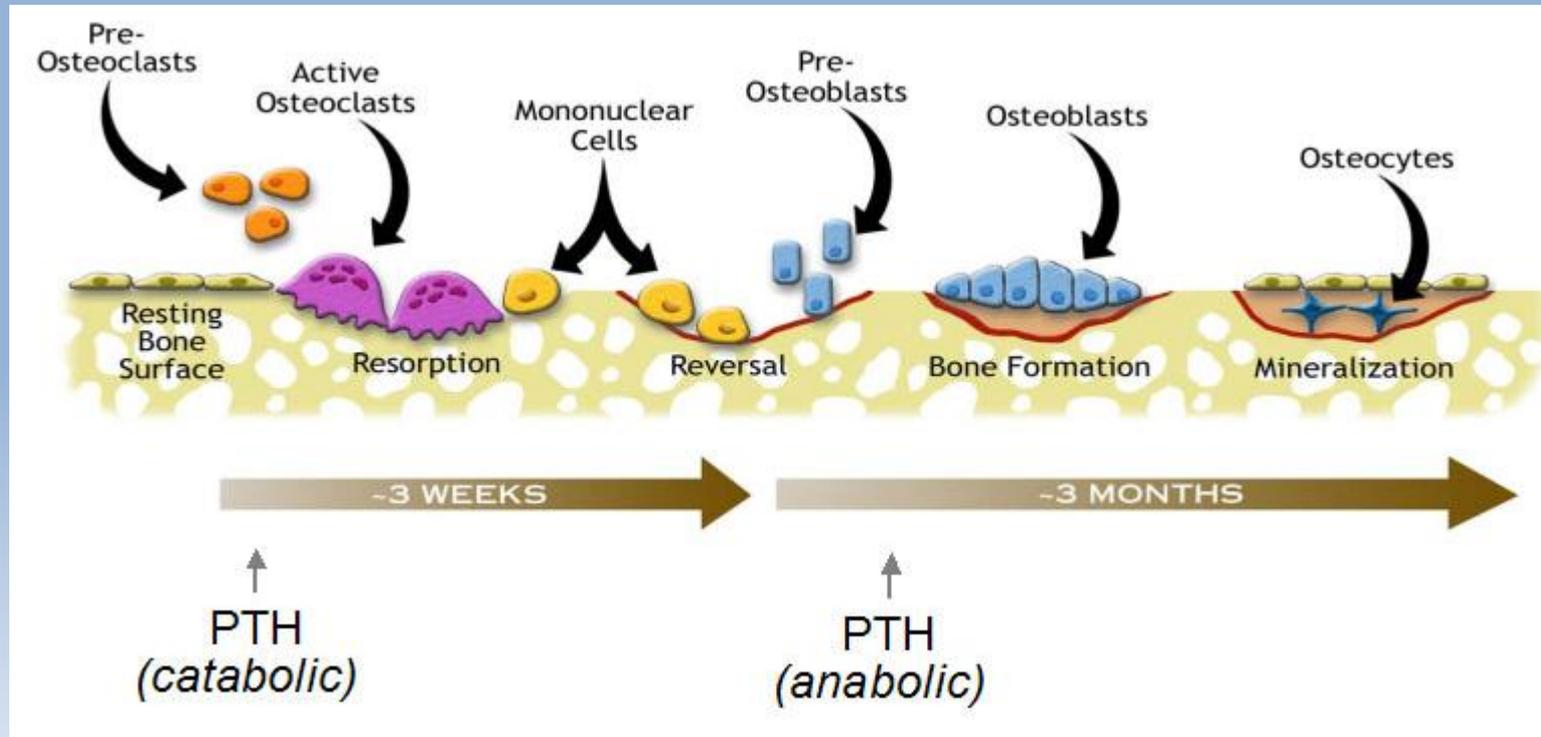
$R \sim 388 \text{ kg}$

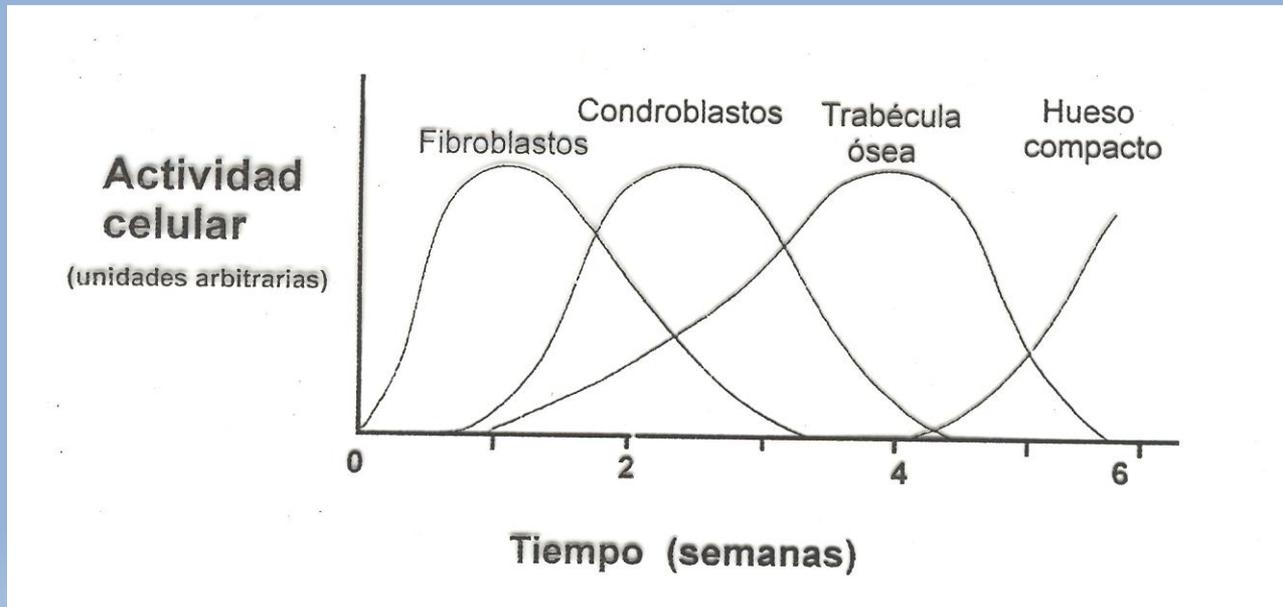
Lifting a weight. (a) Schematic of forces used. (b) The forces. Note that the reaction force R at the fifth lumbar vertebra is quite substantial. (Adapted from L.A. Strait, V.T. Inman, and H.J. Ralston, *Amer. J. Phys.*, 15, 1947, pp. 377-378.)

¿Qué sucede cuando se rompe un hueso o cuando nos falta un pedazo?



Ciclo de Remodelación del hueso





Secuencia de eventos que ocurren luego de la fractura de un hueso.

Procesos que dan lugar a la formación y remodelación del tejido óseo:

a)Crecimiento óseo

b)Consolidación natural de fracturas

Formación de un hematoma

Coagulación activada, coágulo de fibrina

Inflamación

Reparación

Remodelación

a)Integración de injertos óseos

El tejido óseo, cuando es dañado o herido no responde con la formación de una capa fibrosa, sino con la formación de tejido nuevo y su posterior remodelación en la dirección de las tensiones locales.

En ocasiones la dinámica del organismo es suficiente para reconstruir la continuidad del defecto, en otros casos, es necesario acudir a los injertos de tejido óseo o de un biomaterial.

El patrón oro en materiales para la reconstrucción del hueso es el mismo hueso trasplantado, ya que su incorporación a la estructura ósea sigue una secuencia similar a la de la regeneración ósea, después de una fractura, dando lugar a la formación de hueso nuevo que luego se remodela optimizando su función mecánica. Este es el objetivo de los materiales para la sustitución ósea.

BUSCAMOS REGENERAR EL HUESO EN VEZ DE SUBSTITUIRLO.

Para esto tenemos que conocer qué funciones lleva a cabo el hueso en el organismo y saber si podemos reemplazarlas o promover su restitución.

Sabemos que el hueso es capaz de regenerarse en función del tamaño del defecto óseo, la experiencia dice que si se rompe un hueso y se inmoviliza, con el tiempo se regenera.

La inmovilización tiene otros problemas para el paciente.



POR OTRO LADO

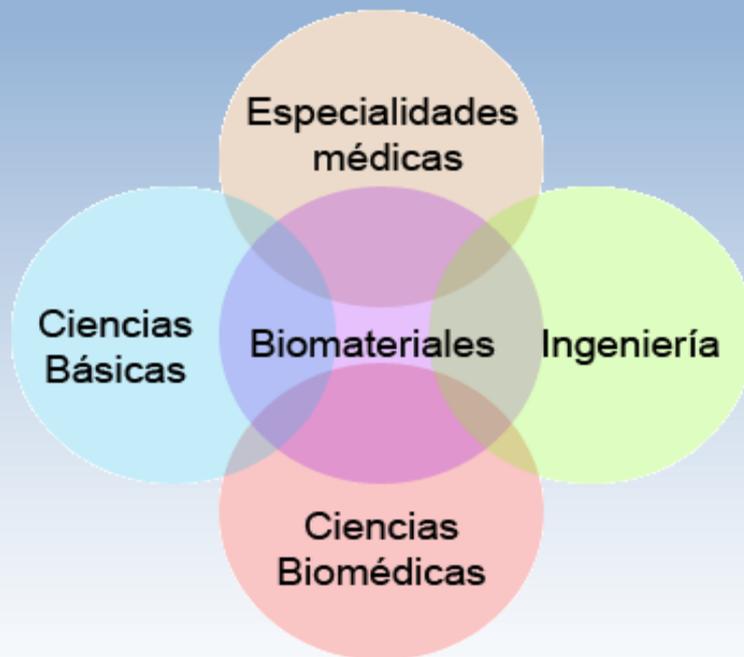
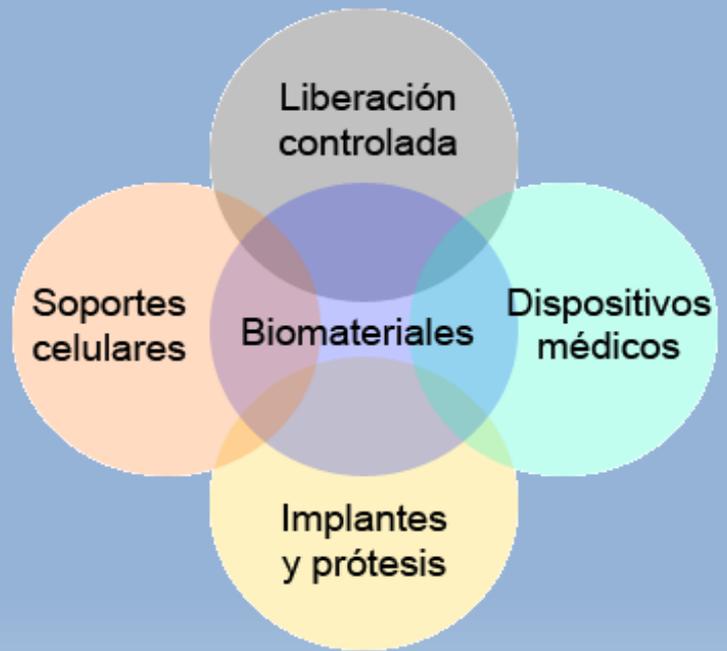
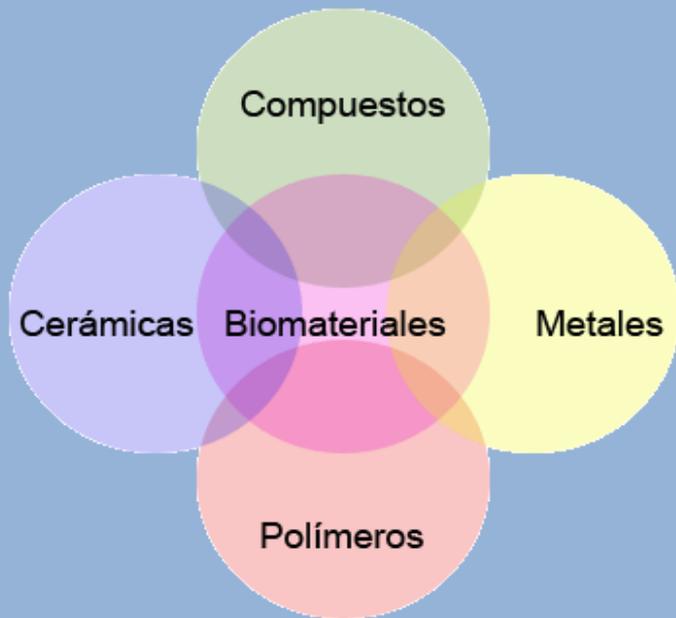


La Ciencia de los Biomateriales se basa en las propiedades físico químicas de estos y su comportamiento cuando se encuentran en el organismo, por lo que el estudio de la interacción entre el material y el medio biológico es fundamental para el desarrollo de esta Ciencia. De modo que para poder llevarla a cabo es importante determinar las propiedades físico químicas y las propiedades médico biológicas, siendo estas últimas las interacciones entre el material y el medio biológico en el cual se insertan.

Es claro que los materiales deben cubrir muchos requisitos para poder ser llamados BIOMATERIALES.

Un biomaterial es una sustancia o combinación de sustancias, diferente a un medicamento, de origen sintético o natural que puede ser usado por cualquier periodo de tiempo como una parte o un completo de un sistema que trata, aumenta o reemplaza cualquier tejido, órgano o función del cuerpo sin afectar al resto del organismo y sin resultar afectado por él, a menos que así sea diseñado.

C. Piña 2004.



El estudio de los materiales se puede dividir en tres grandes ramas:

Ciencia de los materiales: composición, estructura, propiedades.

Tecnología de materiales: preparación, procesamiento, calidad.

Aplicaciones de los materiales: médicas, industriales, comerciales.



Clasificación de Biomateriales

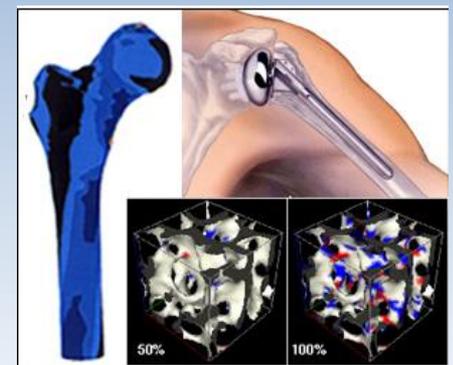
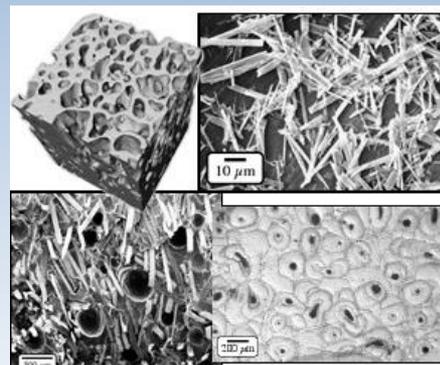
Inertes : Alúmina, Acero inox. 316L

Porosos: HA, superficies especiales

Bioactivos: Hidroxiapatita

Bioabsorbibles: TCP, biovidrios

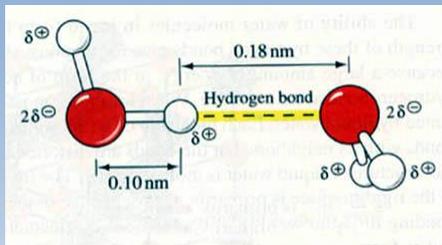
Biocompatibles: Acero inox. 316L, Ti, HA



Es importante tener en cuenta que el proceso de obtención de un material determinará sus propiedades.

De acuerdo con la aplicación que se le de al material, se determinará el grado de pureza que se requiere del mismo, la técnica de obtención y su caracterización.

En cuanto a implantes se refiere, el terminado de la superficie de los mismos juega un papel importante en su biofuncionalidad.



Dos parámetros son importantes para prótesis e implantes:
biocompatibilidad y biofuncionalidad

Ninguno se determina con una sola prueba, se requiere una batería de pruebas para cada uno que implican técnicas de frontera.

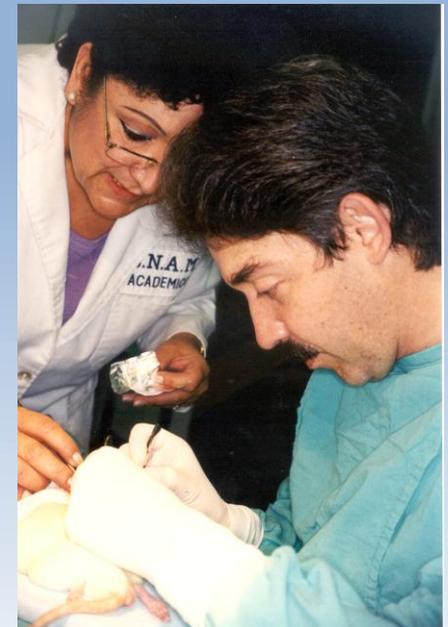
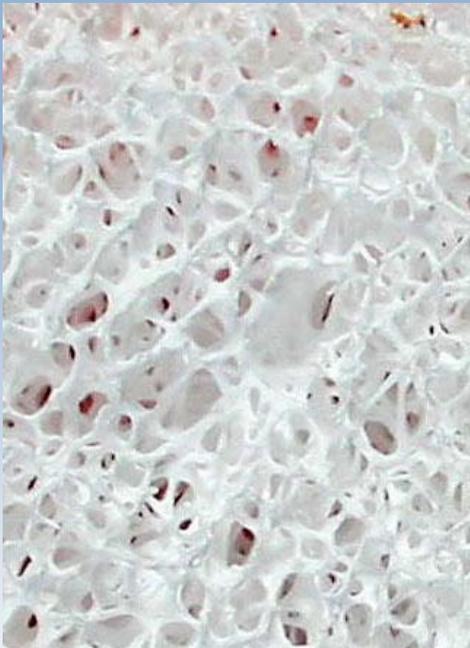


EL ÉXITO DE UN IMPLANTE DEPENDE DE:

El **MATERIAL**: el grado de biocompatibilidad y de biofuncionalidad

El **PACIENTE**: sus condiciones de salud física y mental

y El **MÉDICO**: su habilidad para introducir el implante, para seguir su evolución y del equipo con el que cuente para esto.



Hay varias cerámicas de fosfatos de calcio que podemos considerar biocompatibles, de estas, la mayor parte se reabsorben y se disuelven cuando se exponen al ambiente fisiológico.

En orden de solubilidad, podemos mencionar a algunos de estos:

Tetracalcio Fosfato ($\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$) > Fosfato de calcio amorfo >

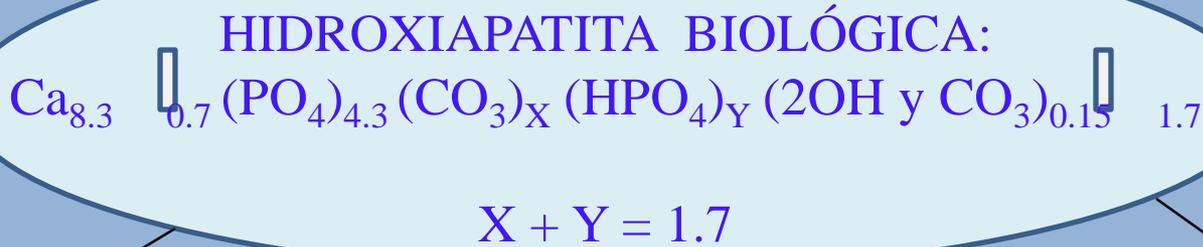
alfa-Tricalcio Fosfato ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) > beta-Tricalcio Fosfato ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)

>>

Hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$)

A diferencia de los otros fosfatos de calcio, la HA no se rompe bajo condiciones fisiológicas, de hecho es termodinámicamente estable a pH fisiológico y toma parte activa en los enlaces de hueso formando enlaces químicamente fuertes con el hueso que la rodea.

HIDROXIAPATITA ESTEQUIOMÉTRICA: $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$



Baja
cristalinidad
(25-50 3nm)

Superficie
específica elevada

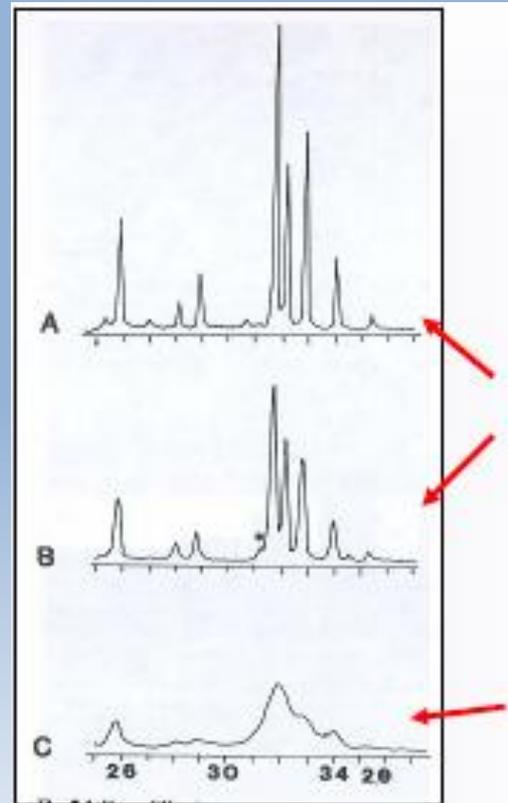
CO_3 en la estructura
(substitución por los
grupos PO_4^{3-} Tipo B) 4-8
% w/w

Composición no estequiométrica
Grupos HPO_4 y iones Na^+ ,
 Mg^{2+} , K^+ , F^- y Cl^-

Estructura cristalina
distorsionada

Sinterización a alta temperatura.

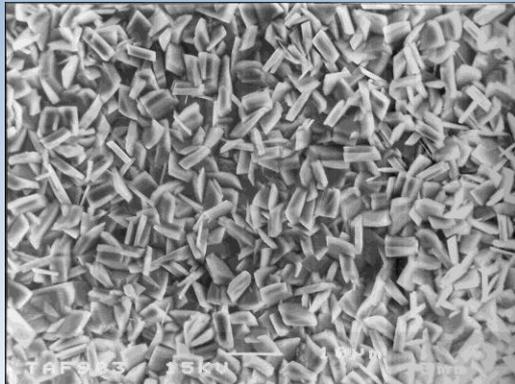
HA estequiométrica
no es reabsorbible.



HA sintéticas,
obtenidas a alta
temperatura

Fase mineral del
hueso

¿Es posible obtener materiales cerámicos de fosfatos de calcio, no estequiométricos con grupos carbonato y/o grupos HPO_4^{2-} , similares a la apatita biológica?



FOSFATOS DE CALCIO EN SISTEMAS BIOLÓGICOS

Fosfato de calcio	Fórmula química	Ocurrencia
Apatita	$(\text{Ca,Z})_{10}(\text{PO}_4\text{Y})_6(\text{OH,X})_2$	Esmalte, dentina hueso, cálculos, piedras urinarias, calcificaciones.
Octacalcio fosfato	$\text{CaHPO}_4(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Cálculos dentales y urinarios.
Fosfato de dicalcio dihidratado DCPD o Brushita	$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Cálculos dentales, condrocalcinosis cristaluria, descomposición ósea.
Fosfato tricalcio β -TCP Whitlockita	$(\text{Ca,Mg})_9(\text{PO}_4)_6$	Cálculos dentales y urinarios, piedras salivales, caries dental, cartílago artrítico, calcificaciones.
Fosfato de calcio amorfo	$(\text{Ca, Mg})_7(\text{PO}_4, \text{Y}')_7$	Calcificaciones de tejido suave.
Pirofosfato de calcio dihidratado CPPD	$\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Pseudo gota, depósitos en líquido sinovial.
Z: Na, Mg, K, Sr, etc.	Y: $\text{CO}_3, \text{HPO}_4$	X: Cl, F Y': $\text{P}_2\text{O}_7, \text{CO}_3$

¿LOS FOSFATOS DE CALCIO SON MATERIALES PARA REGENERACIÓN ÓSEA?

Propiedades que debe tener:

- Biocompatibilidad
- Bioactividad
- Biodegradabilidad
- Porosidad adecuada

Pueden ser cerámicas y/o compuestos de fosfatos de Calcio:

- Cerámicas porosas
- Gránulos
- Bloques
- Cementos

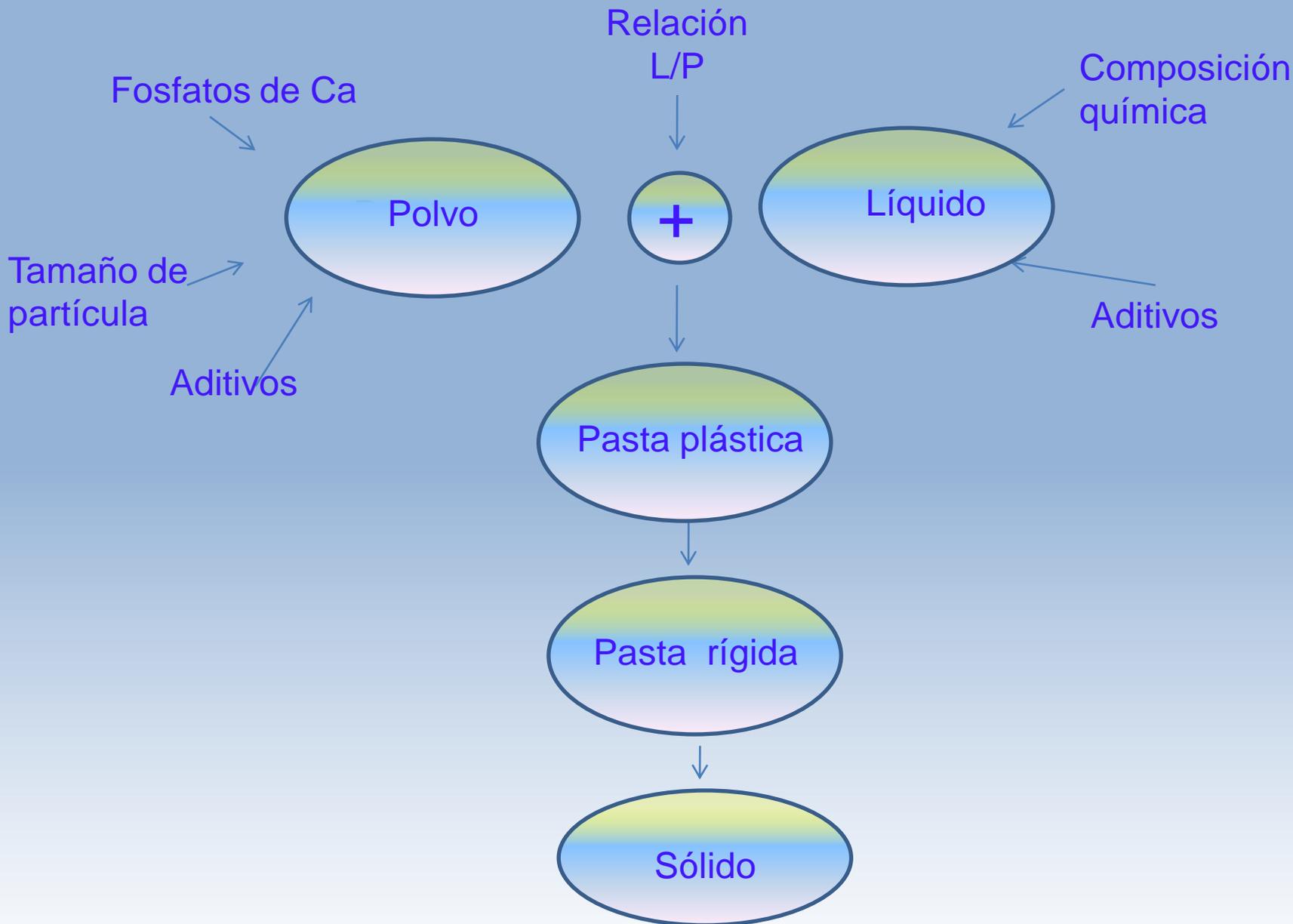
Material como plantilla, guía para el crecimiento tisular.

- Estructura
- Soporte
- Volumen

Cementos de Fosfatos de Calcio.

Posibilidades de obtener HA u otros fosfatos de Calcio (CaP o CP) en forma monolítica a temperatura ambiente o fisiológica a partir de una reacción cementante entre:

- a) Una fase sólida en polvo (formada por uno o más fosfatos de calcio)
- b) Una fase líquida (agua o solución acuosa)



Cementos que forman apatita como producto de la reacción de fraguado.

1. Hidrólisis de un único fosfato de calcio:



2. Mezclas de TTCP ($\text{Ca/P} > 1.67$) y otro fosfato de calcio ($\text{Ca/P} < 1.67$):

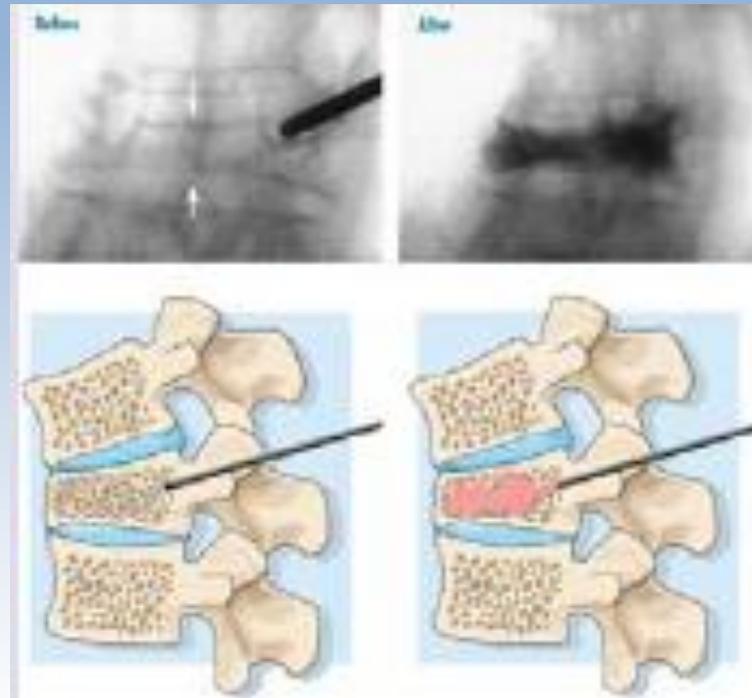
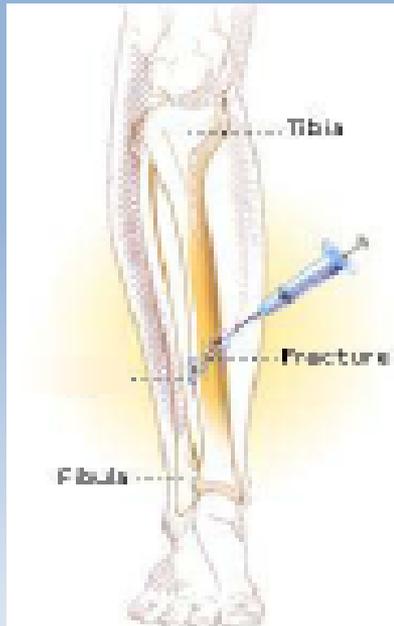


3. Mezclas de dos fosfatos de calcio con $\text{Ca/P} < 1.67$ con una fuente adicional de calcio, por ejemplo:



Inyectabilidad.

Cirugía mínimamente invasiva.



Requisitos Clínicos de Diseño de un Cemento de Fosfatos de Calcio

Aspectos Tecnológicos:

Capacidad de fraguar en contacto con los fluidos corporales (cohesión)

Tiempos de fraguado y endurecimiento razonables (minutos).

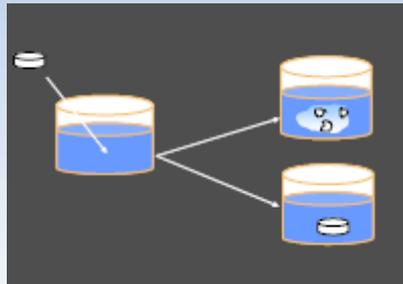
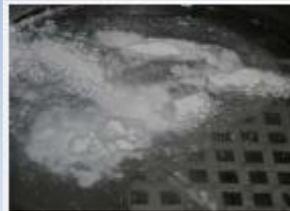
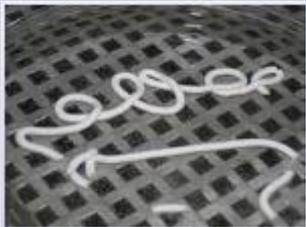
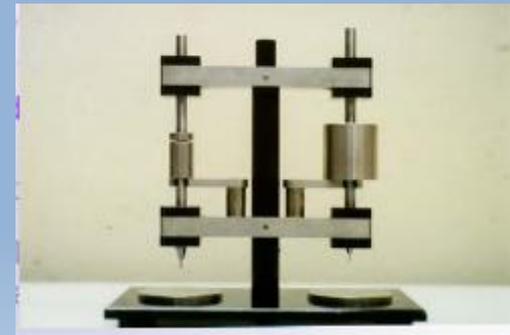
Resistencia mecánica aceptable en condiciones fisiológicas en función de la aplicación.

Propiedades reológicas adecuadas.

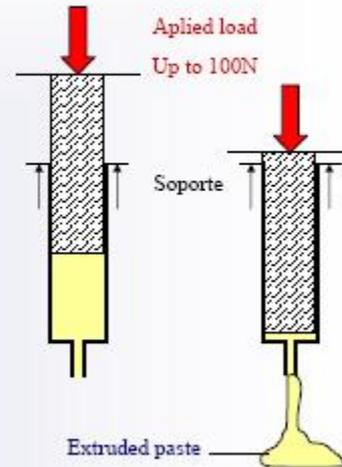
Aspectos Biológicos:

Biocompatibilidad.

Velocidad de absorción adecuada.



Injectability

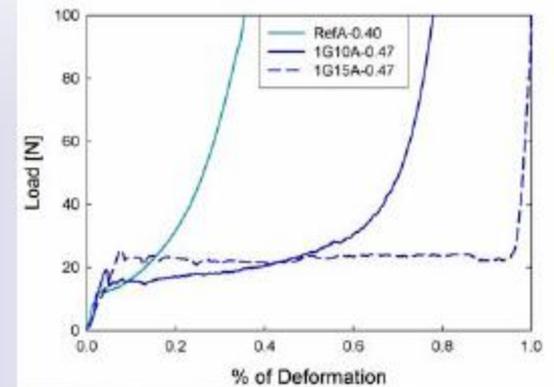


Testing conditions

- Extrusion 150 s after mixing
- Extrusion rate: 15 mm.min⁻¹
- Maximum force: 100N

$$Injectability(\%) = \frac{m_{injected}}{m_{initial}} \times 100$$

Injectability



Caracterización de la reacción y los mecanismos de fraguado de un cemento tipo 1 (hidrólisis del fosfato tricálcico α).



Mecanismos de fraguado y endurecimiento:

Disolución del fosfato tricálcico y formación y crecimiento de núcleos cristalinos:

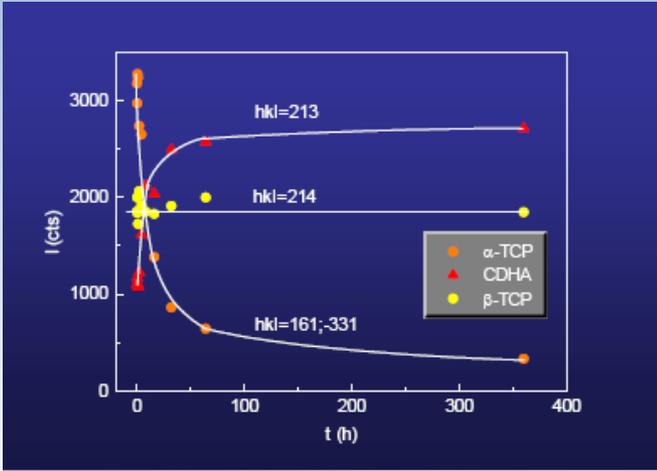
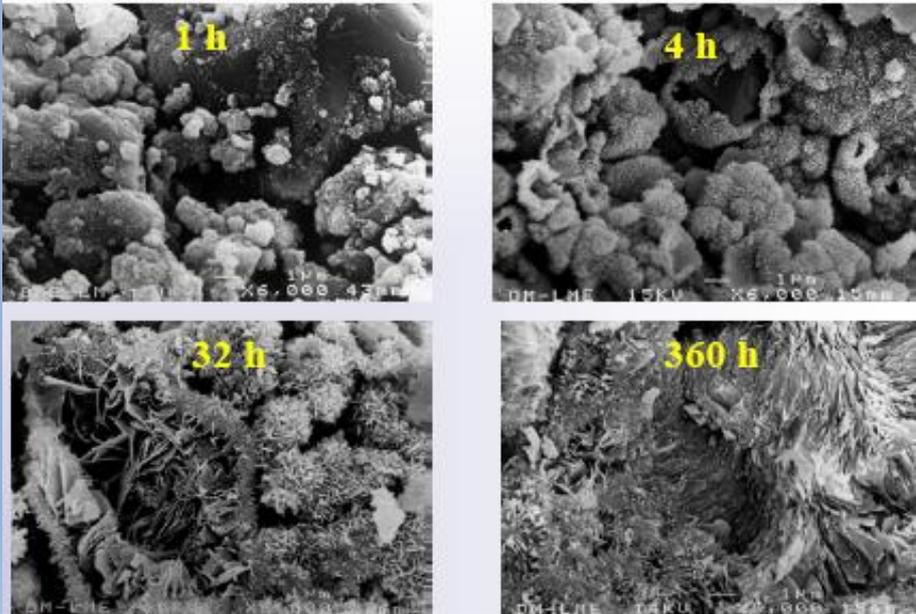
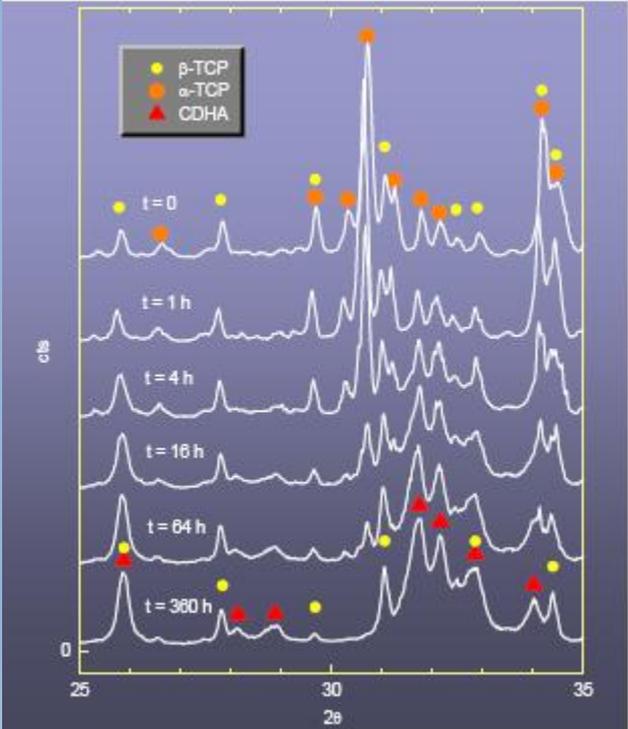
Aumento de la superficie específica

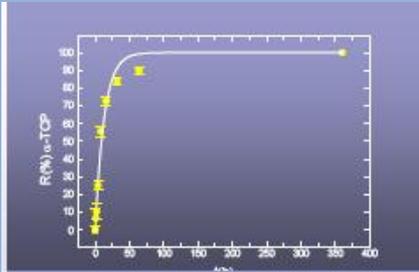
Establecimiento de contacto entre cristales:

Mecánico y/o Químico

Cambios químicos microestructurales generan cambios mecánicos.

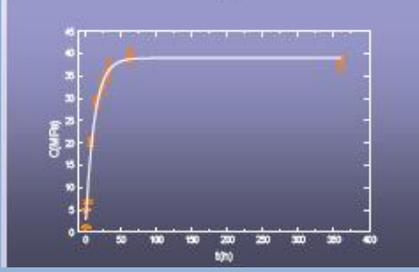
Evolución microestructural del cemento.





$$R(\%) = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) 100$$

con $\tau = (13.0 \pm 0.6) \text{ h}$
 $r^2 = 0.8847$

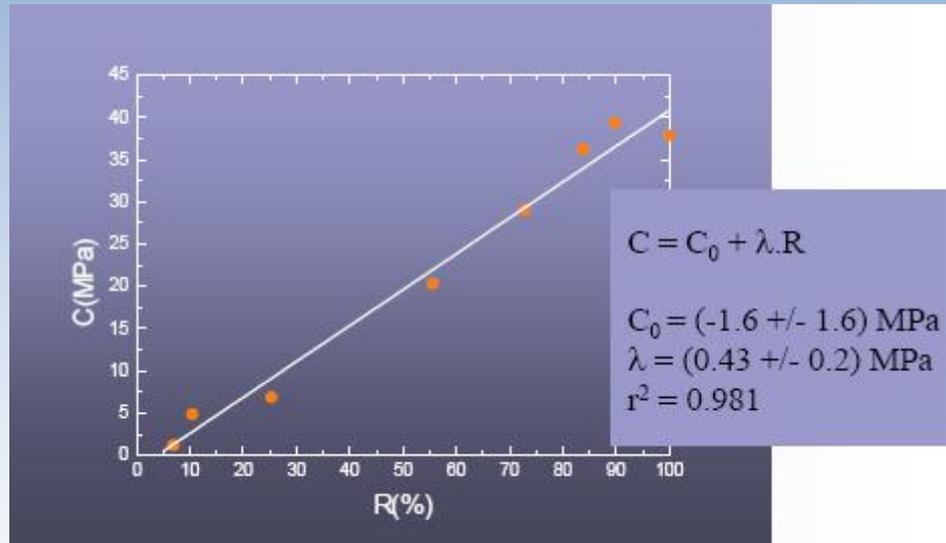


$$C(t) = C_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

con $\tau = (12.7 \pm 1.3) \text{ h}$
 $C_{\infty} = (39.0 \pm 1.2) \text{ MPa}$
 $r^2 = 0.9943$

Evolución temporal del porcentaje de reacción y la resistencia a la compresión del cemento.

Relación entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la compresión.



$$C = C_0 + \lambda \cdot R$$

$C_0 = (-1.6 \pm 1.6) \text{ MPa}$
 $\lambda = (0.43 \pm 0.2) \text{ MPa}$
 $r^2 = 0.981$

Y sigue, y sigue, y



**Gracias por su
atención**



PERSPECTIVA HISTÓRICA.

1920:

Albee y cols. Emplean TCP para reparar defectos óseos.

1950:

Ray y Ward. Reparar defectos óseos empleando diferentes fosfatos de Calcio.

1969:

Levitt y colaboradores. Publican la importancia de poner a punto métodos efectivos para obtener HA cerámica a partir de FA (fluoroapatita) para aplicaciones biomédicas.

1976-1980:

Jarcho y cols. (USA) Desarrollan un proceso para producir implantes de HA con valores de resistencia razonablemente elevados.

Aoki y cols. (Japón) demostraron que la HA densa podía ser utilizada para substituir raíces dentales en animales en aplicaciones clínicas.

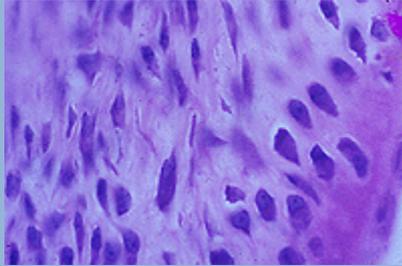
De Groot y cols., y Dennisen y cols (europa) Llevaron a cabo la síntesis y la caracterización de la HA.

Köster y cols. Demostraron que el B-TCP produce una buena respuesta biológica y que es reabsorbible.

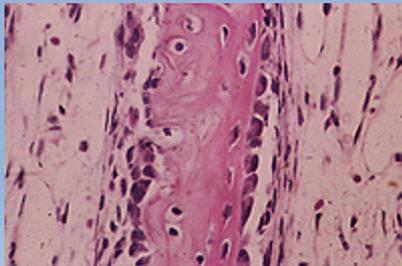
1980:

Se desarrollan recubrimientos de HA en sustratos metálicos para aplicaciones dentales y ortopédicas.

Osteoblastos



Los osteoblastos son células diferenciadas que sintetizan el colágeno y la sustancia fundamental ósea.

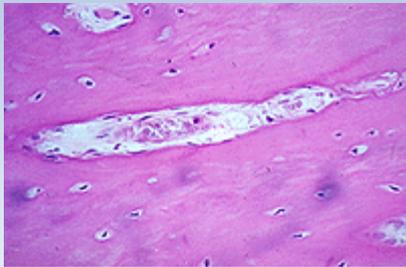
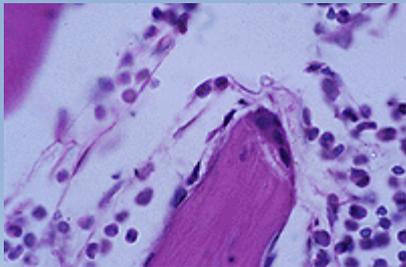
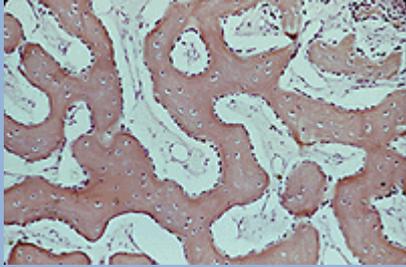


Cuando están en plena actividad su forma es cuboide con un citoplasma basófilo, tienen además un prominente aparato de Golgi. Son células polarizadas que vacían sus productos de secreción por la zona del citoplasma en contacto con la matriz ósea ya formada.



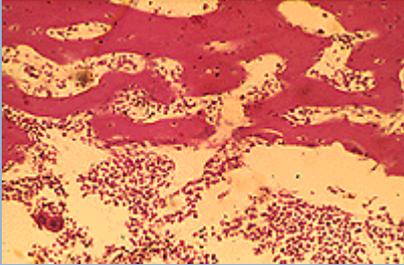
Los osteoblastos son células polihédricas con largas y delgadas prolongaciones citoplasmáticas que son rodeadas por el osteoide producido y que se asocian mediante uniones de comunicación con prolongaciones similares de los osteoblastos vecinos.

Células de revestimiento óseo



Son células aplanadas que revisten las superficies óseas del interior de los huesos, y en su mayor parte corresponden a osteoblastos inactivos (Fig. 1) que están asociados entre sí y con prolongaciones de los osteocitos (Figs. 2 y 3).

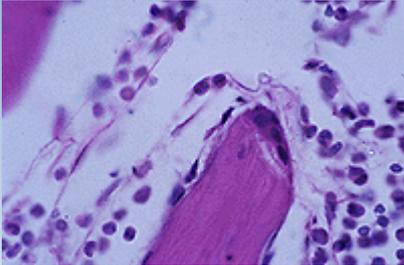
Osteoclastos



1

Son células móviles, gigantes y multinucleadas y se localizan adosadas a la superficie de tejido óseo que debe ser removido (1).

Se originan por fusión de monocitos que han abandonado la sangre circulante y pertenecen de hecho al sistema de fagocitos mononucleares.



2

Contienen numerosos lisosomas y en la superficie del osteoclasto que esta en contacto con la matriz a remover se distinguen dos zonas distintas (2).

Funciones del tejido óseo:

1. Es la principal reserva de Ca en el organismo, lo intercambia con los fluidos extracelulares actuando como un factor regulador de la concentración de Ca en ellos y mantiene el equilibrio necesario para el buen funcionamiento de algunos procesos físico – químicos vitales
2. La médula ósea suministra al organismo los glóbulos rojos que aportan los nutrientes para las células, tejidos y órganos y los glóbulos blancos fundamentales para el sistema inmunológico.
3. Realiza una función mecánica de soporte de los tejidos corporales, proporcionando además puntos de sujeción de los músculos, responsables de la locomoción y el movimiento corporal.

Un defecto local no afecta ninguna de las dos primeras funciones, sin embargo la tercera, una vez perjudicada por una fractura o un defecto en el sistema esquelético, sólo puede ser restaurada mediante la reparación de la continuidad del tejido óseo en el lugar donde fue dañado.

TABLA 5. PROPIEDADES DEL HUESO

TEJIDO	DIRECCIÓN DE LA PRUEBA	MÓDULO DE ELASTICIDAD GPA	FUERZA DE TENSIÓN MPA	FUERZA DE COMPRESIÓN MPA
HUESOS LARGOS FÉMUR	longitudinal	17.2	121	167
TIBIA	longitudinal	18.1	140	159
FÍBULA	longitudinal	18.6	146	123
HUESOS DEL BRAZO HÚMERO	longitudinal	17.2	130	132
RADIO	longitudinal	18.6	149	114
ULNA	longitudinal	18.0	148	117
VÉRTEBRAS CERVICALES	longitudinal	0.23	3.1	10
LUMBARES	longitudinal	0.16	3.7	5
HUESO ESPONJOSO	longitudinal	0.09	1.2	1.9
CRÁNEO	tangencial	---	25	---

Estructura y características del tejido óseo

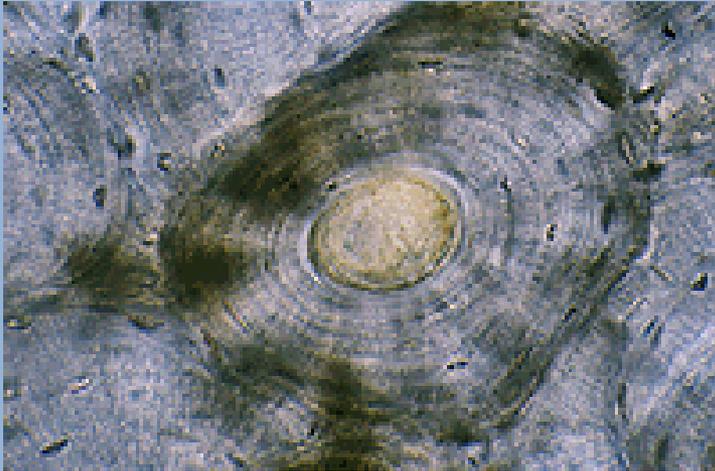


Figura 1

Está formado por la matriz ósea, que es un material intercelular calcificado (Fig.1) y por células características del tejido: osteoblastos, osteocitos y osteoclastos.

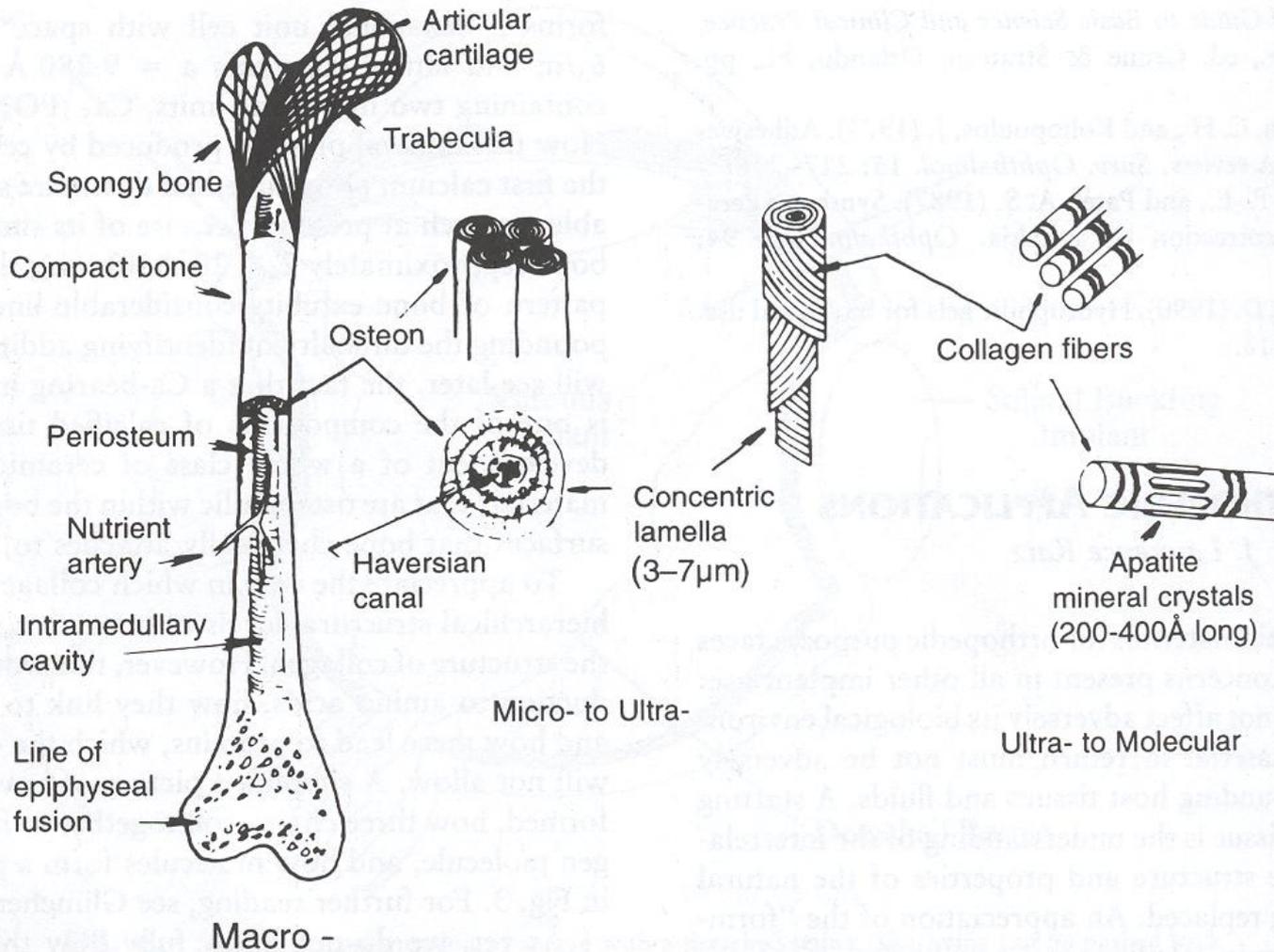
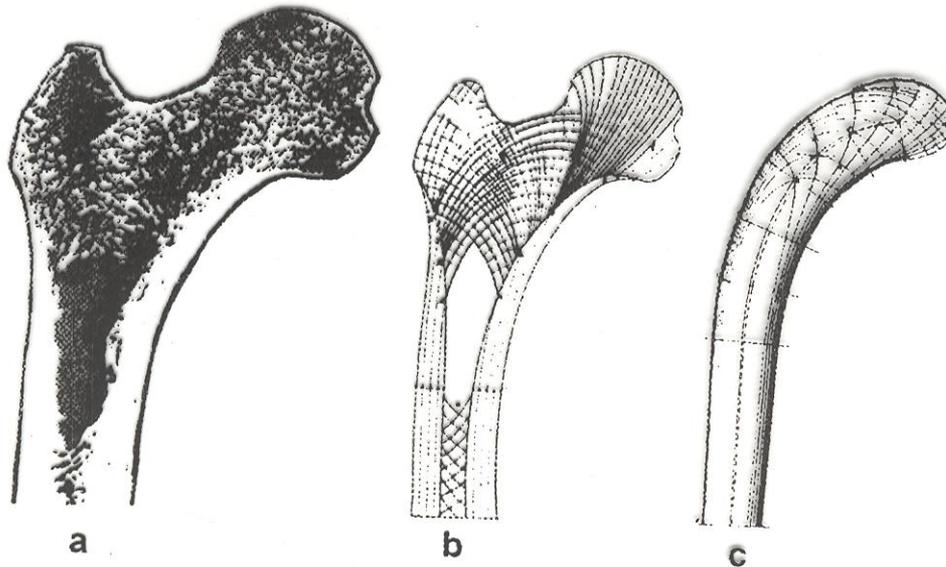


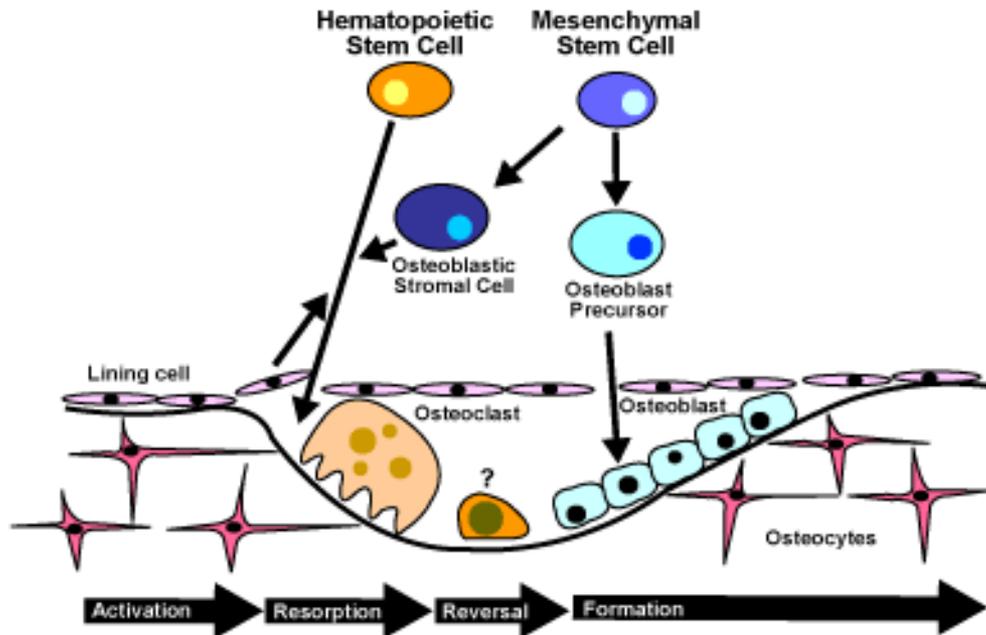
FIG. 1. Hierarchical levels of structural organization in a human long femur. (Adapted with permission from J. B. Park, *Biomaterials: An Introduction*, Plenum Publ., 1979, p. 105.)

Los osteoblastos participan también en el proceso de mineralización de la matriz orgánica ya que producen vesículas, de unos 100 nm de diámetro, rodeadas de membrana celular que acumulan Ca^{2+} y PO_4^{2-} y son ricas además en fosfatasa alcalina y pirofosfatasa, enzimas que son capaces de generar iones PO_4^{2-} , elevando su concentración en el medio extracelular y creando centros de nucleación para el depósito de las sales minerales.

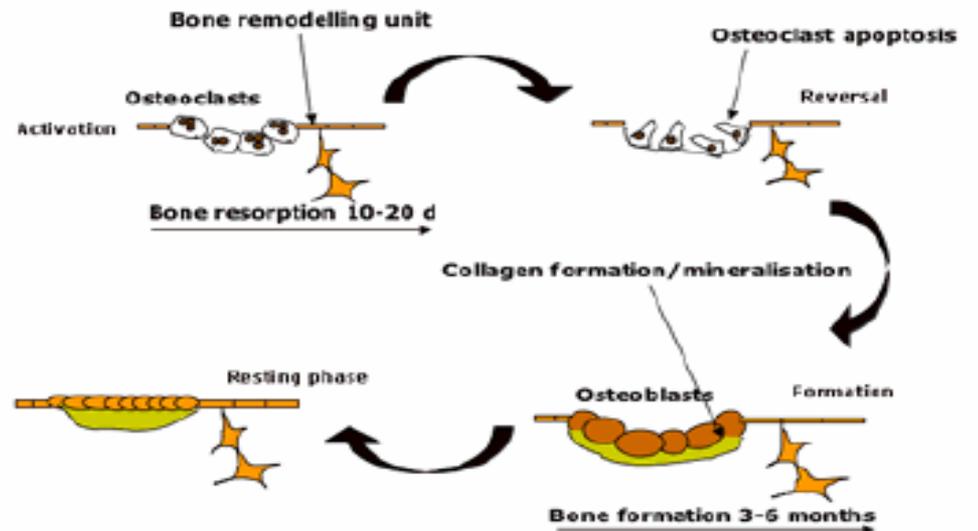
Los osteoblastos tienen dos destinos posibles: ser rodeados por la matriz ósea que producen pasando a ser osteocitos o permanecer en la superficie del tejido óseo recién formado, aplanándose y constituyendo las células de revestimiento óseo.



- a) Sección frontal a través del fémur proximal del fémur.
- b) Líneas que marcan la estructura esponjosa.
- c) Puente de Culmann.



Bone Turnover Cycle



La alúmina y la zirconia se conocen por su inercia química y su dureza. Estas propiedades son explotadas en las superficies de implantes en articulaciones. Presentan gran facilidad para ser pulidas con un acabado brillante lo que las hace ideales para ser contra de materiales como polietileno de ultra alto peso molecular.

La alúmina porosa, también ha sido empleada como espaciador óseo, cuando secciones de hueso se han removida por enfermedad, actuando como un andamio celular.

Alúmina monocristalina o zafiro han sido usadas en aplicaciones dentales, aunque su uso ha ido en declive con la aparición de materiales avanzados como compuestos basados en resinas.



El carbón pirolítico es muy usado en válvulas cardiacas artificiales y ha sido em material más aceptado por los últimos 30 años.

Sus propiedades más rentables son buena resistencia mecánica, buena resistencia al uso y a la fatiga, gran durabilidad y la más importante es que es tromboresistente es decir no genera coágulos sanguíneos.

El carbón pirolítico se emplea también en articulaciones ortopédicas pequeñas como en dedos y en implantes de la columna vertebral.

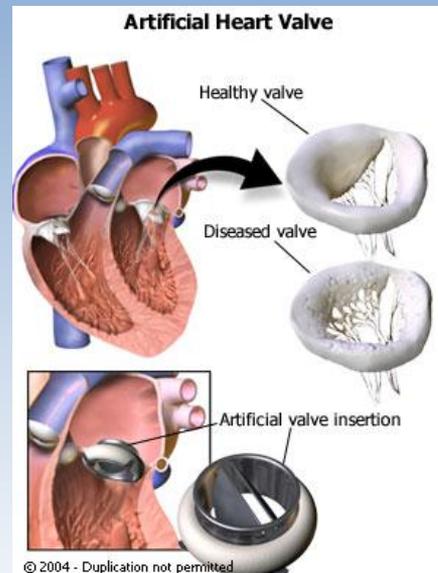
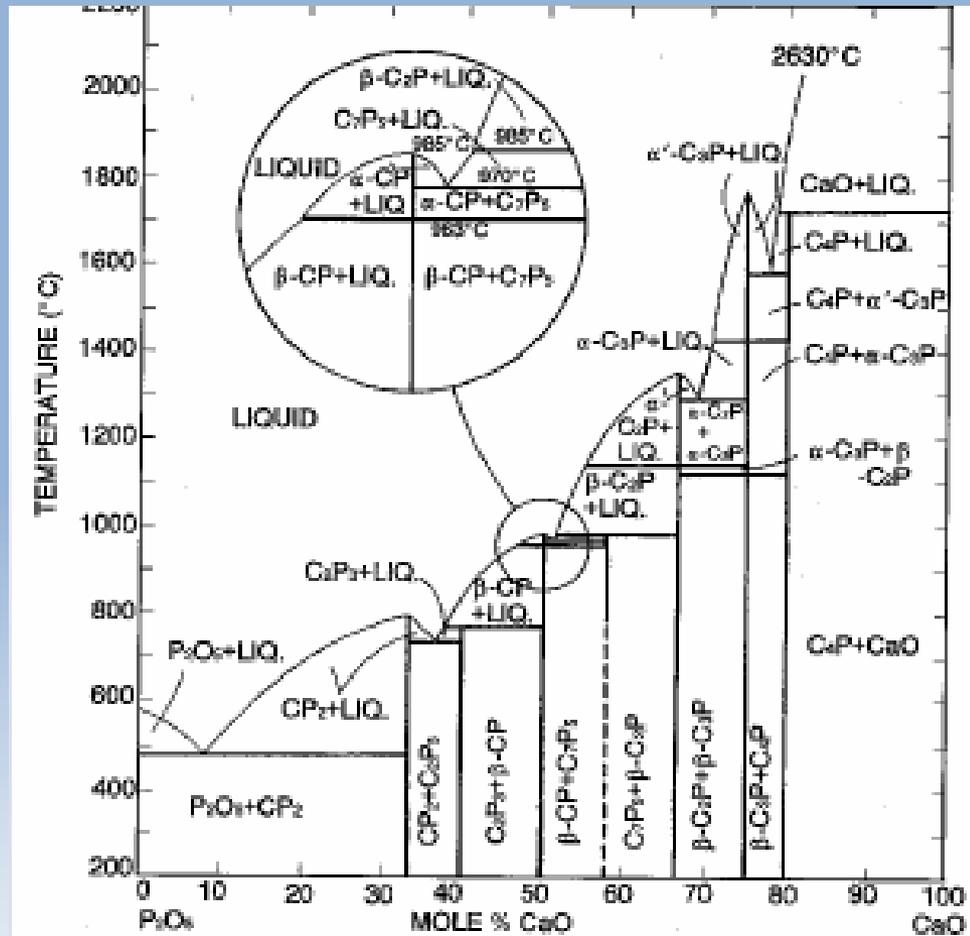


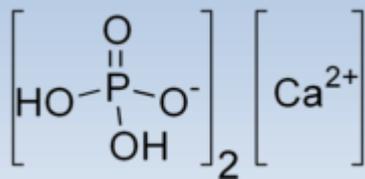
DIAGRAMA DE FASES DEL SISTEMA $\text{CaO} - \text{P}_2\text{O}_5$



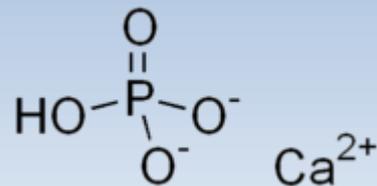
Los fosfatos de calcio forman una familia de minerales que contienen iones de Calcio (Ca^{2+}) junto con ortofosfatos (PO_4^{3-}), metafosfatos o pirofosfatos ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) y a veces con hidrógeno o iones hidroxilos.

Muchos de los compuestos de fosfatos de calcio son insolubles aún a altas temperaturas. El calentamiento causa precipitación.

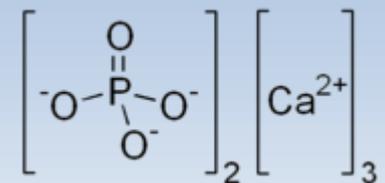
En la leche se puede encontrar en altas concentraciones a pH normal (7) porque existe en forma coloidal en miscelas encontradas en las proteínas (caseina) con Mg, Zn y citrato conocido como CCP fosfato de calcio coloidal.



**Fosfato de calcio
dihidrogenado**



**Fosfato de calcio
hidrogenado**



**Fosfato de tricalcio
 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$**

ESTRUCTURA DE LOS FOSFATOS DE CALCIO

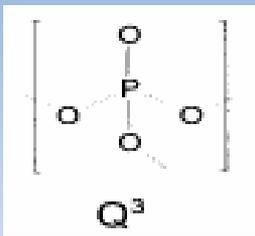
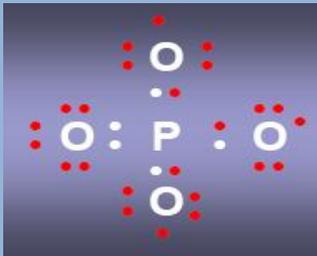
Fósforo: enlace sp^3 , No. de coordinación 4, Simetría Tetrahédrica.
Cadenas, anillos, polímeros de tetrahedros PO_4 .

Formadores de red: P_2O_5

Modificadores de red: CaO , Na_2O , ...

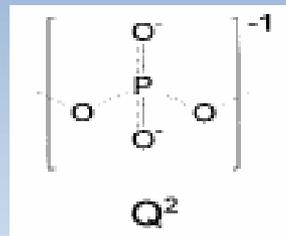
Tetraedros $[PO_4]$ interconectados

Diferentes unidades estructurales posibles:

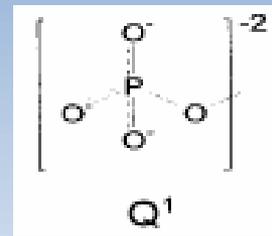


Punto de
ramificación

Polifosfatos (enlaces P-O-P)

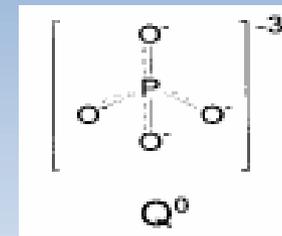


Grupo medio



Grupo
terminal

Pirofosfatos (di-polifosfatos) : P_2O_7



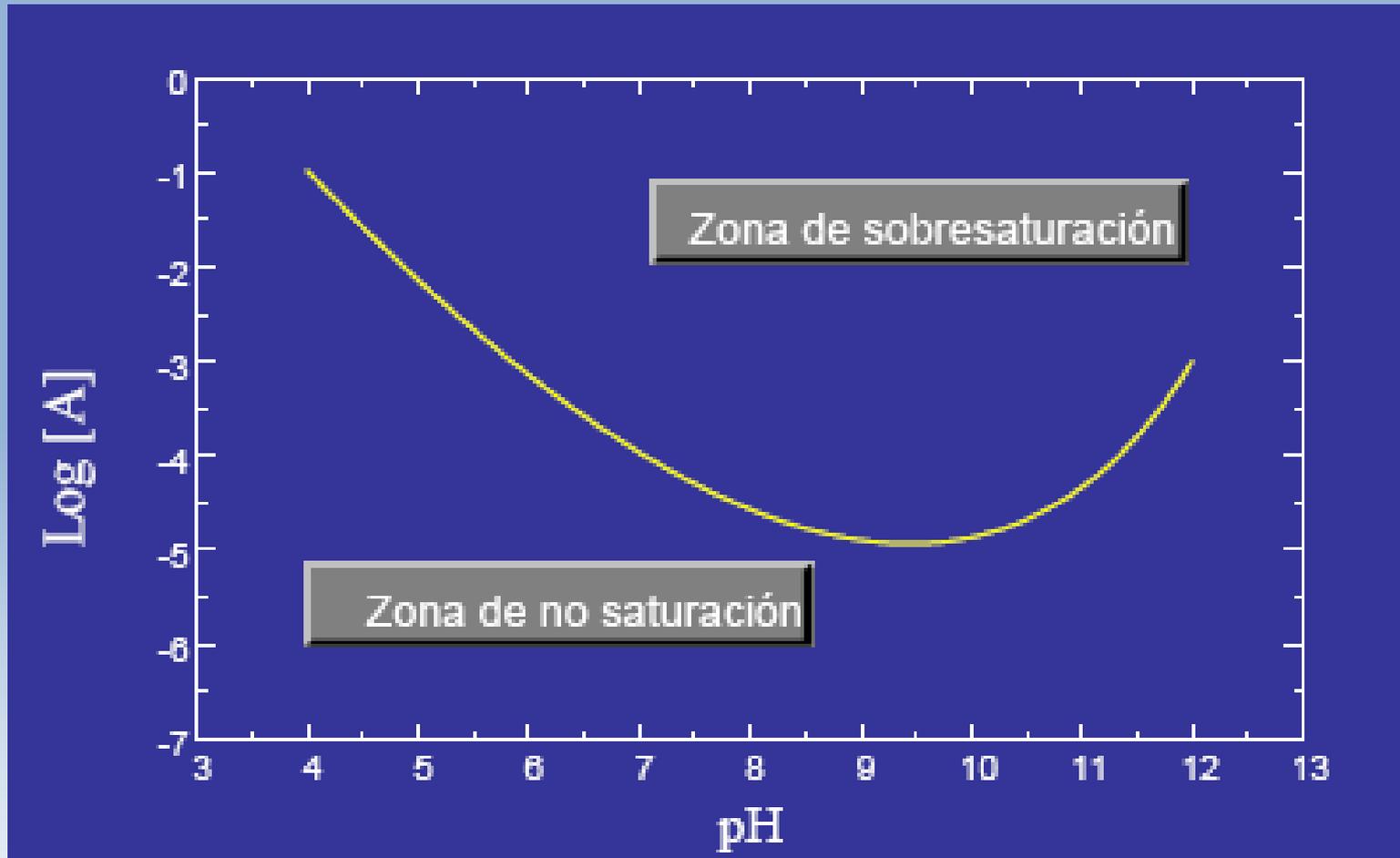
Tetraedro
aislado

ORTOFOSFATOS DE CALCIO DE INTERÉS BIOLÓGICO

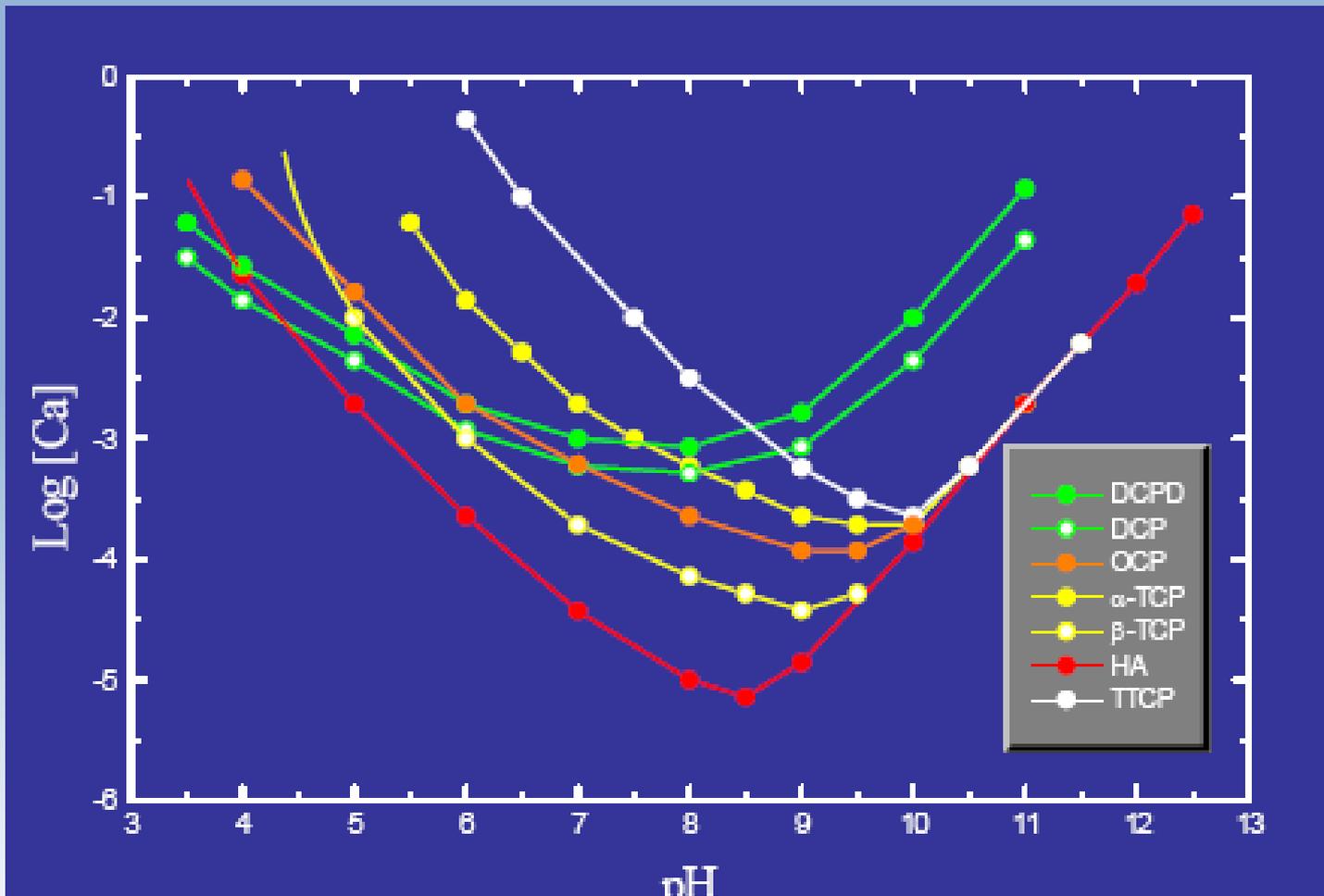
- Ortofosfatos: Sales del ácido ortofosfórico H_3PO_4
- Contienen grupos PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} y $H_2PO_4^-$

NOMBRE	ABREV.	FÓRMULA	Ca/P
→ Fosfato tetracálcico	TTCP	$Ca_4(PO_4)_2O$	2.0
Hidroxiapatita	HA	$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$	1.67
Hidroxiapatita deficiente en calcio	CDHA	$Ca_9(HPO_4)(PO_4)_5(OH)$	1.5
Fosfato de calcio amorfo	ACP	$Ca_{10-x}H_{2x}(PO_4)_6(OH)_2$	
→ Fosfato tricálcico (α, β)	TCP	$Ca_3(PO_4)_2$	1.5
Fosfato octacálcico	OCP	$Ca_8(HPO_4)_2(PO_4)_4 \cdot 5H_2O$	1.33
Fosfato dicálcico (Monetita)	DCP	$CaHPO_4$	1.0
Fosfato dicálcico dihidratado (Brushita)	DCPD	$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$	1.0
Fosfato monocálcico monohidratado (MCPM)	MCPM	$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$	0.5

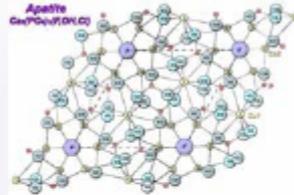
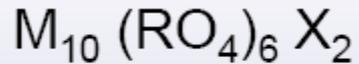
DIAGRAMA DE SOLUBILIDAD DE UN COMPUESTO MINERAL.



DIAGRAMAS DE SOLUBILIDAD DE LOS FOSFATOS DE CALCIO DE INTERÉS BIOLÓGICO



Apatitas (απαταν, engañar)



- M: Ca, Pb, Na, K, Sr, Mn, Zn, Cd, Mg, Fe, Al, C(CO₃), H₂O
- X: OH, F, Cl, Br
- RO₄: PO₄, AsO₄, VO₄, SO₄, SiO₄.

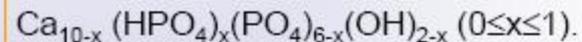


Ca/P=1,67

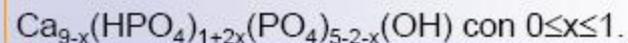
Hidroxiapatitas deficientes en calcio

Solución sólida
1,33 < Ca/P < 1,67

1,50 < Ca/P < 1,67



1,40 < Ca/P < 1,50 I



Berry E.E., "The structure and composition of some calcium-deficient apatites", *J. Inorg. nucl. Chem.* 29, 317-327 (1967)