

FASES SÍSMICAS - 3.8

FASES SÍSMICAS

Fases sísmicas

3.0 Ondas planas y teoría de rayos

3.1 Diferencias entre campo cercano y campo lejano

3.2 Fases regionales. Tiempos de viaje

3.3 Fases telesísmicas. Tiempos de viaje

NOMBRES DE FASES TELESÍSMICAS

P – *P* wave in the mantle

K – *P* wave in the outer core

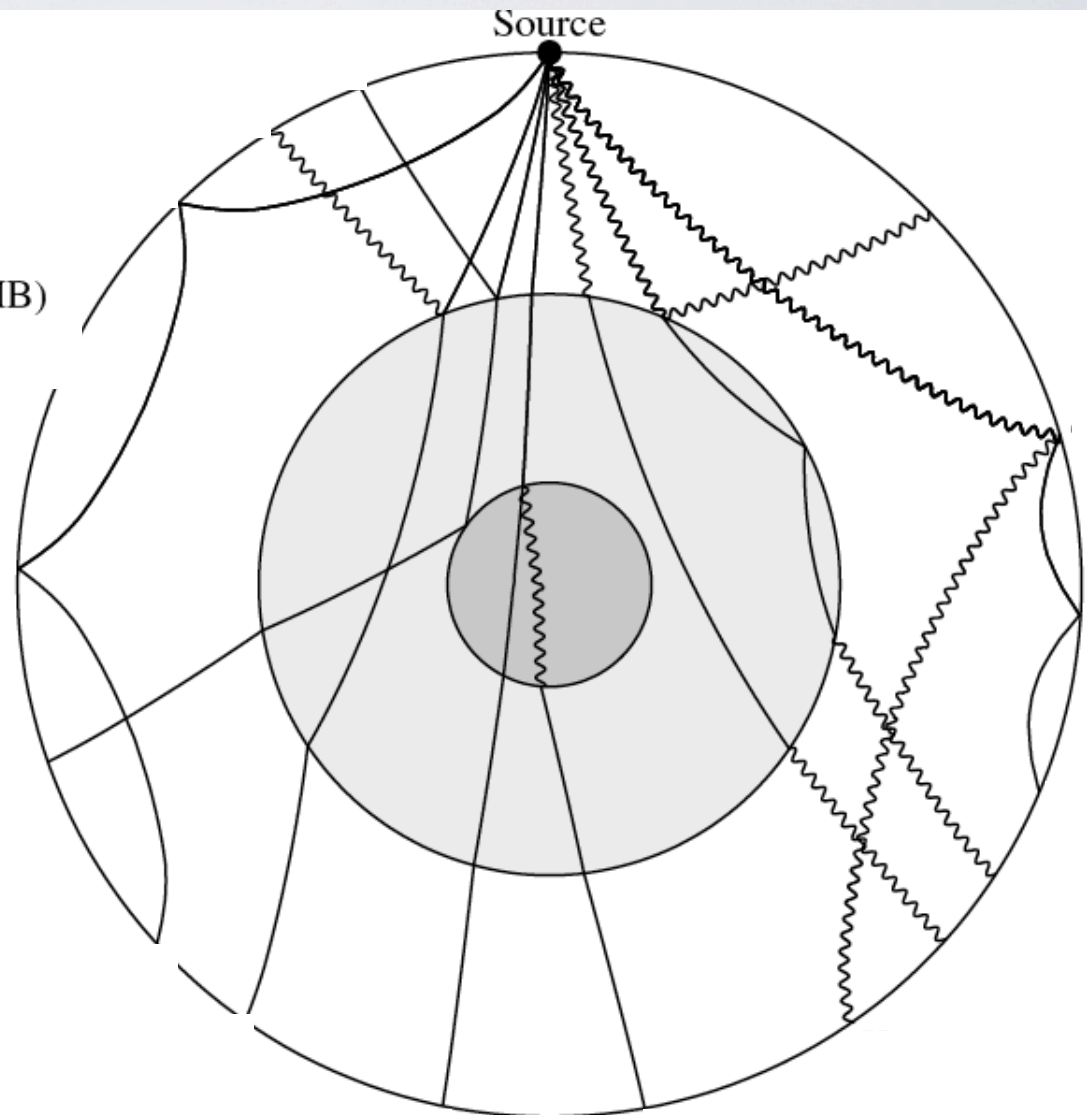
I – *P* wave in the inner core

S – *S* wave in the mantle

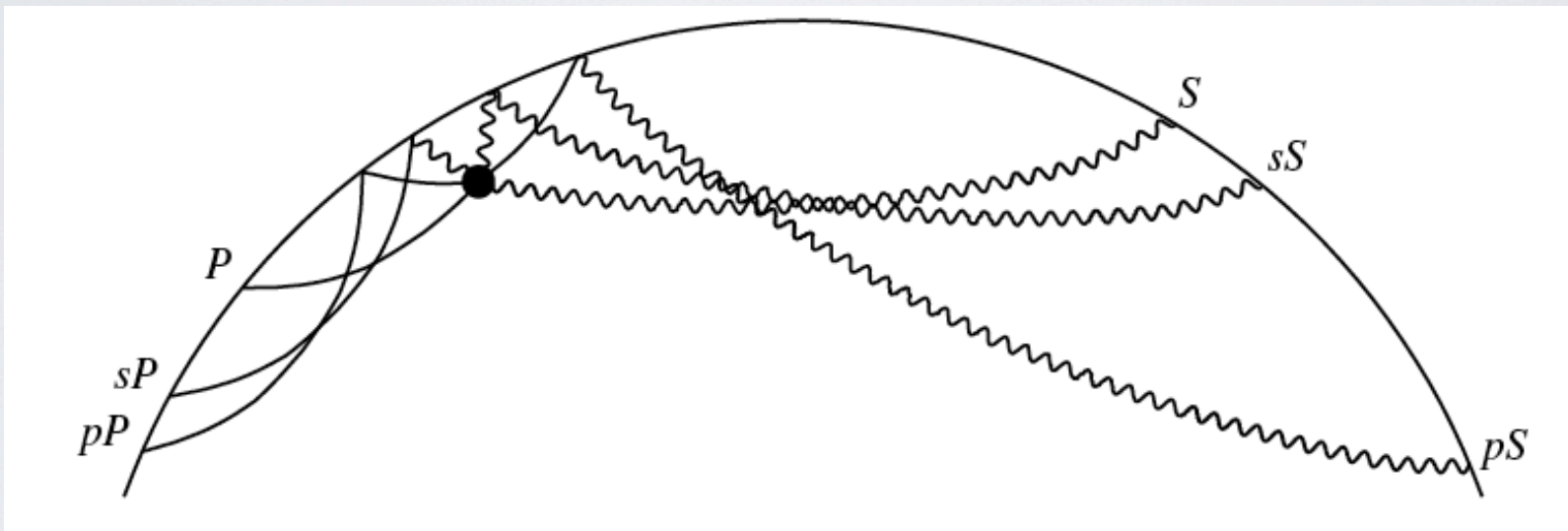
J – *S* wave in the inner core

c – reflection off the core–mantle boundary (CMB)

i – reflection off the inner-core boundary (ICB)



FASES DE PROFUNDIDAD



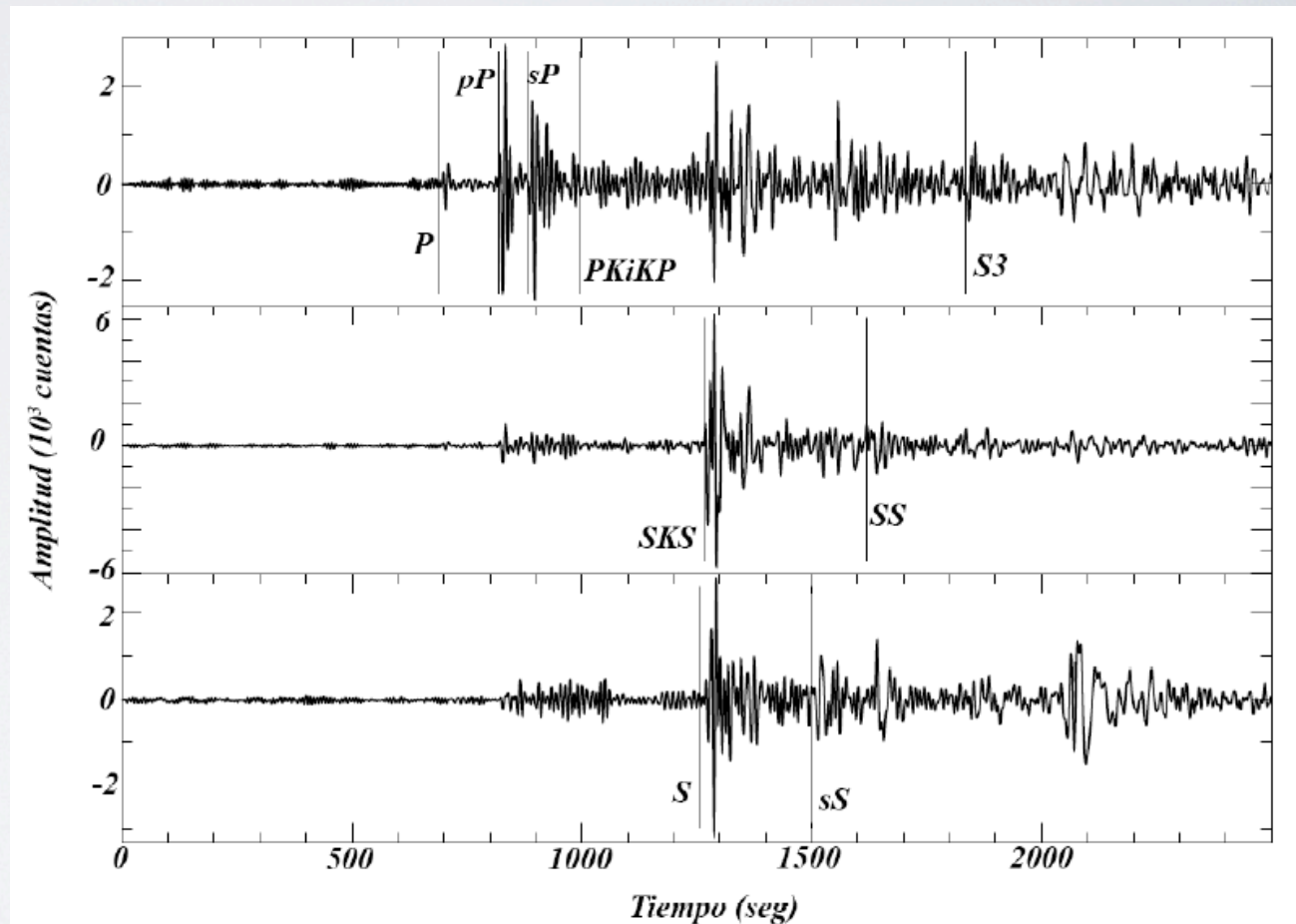
FASES TELESÍSMICAS

Heterogeneidades laterales
manto \ll corteza
efecto curvatura Tierra importante

gran duración
relativamente simples
fases aisladas bien observables
(P, S, reflexiones, conversiones)
gran dispersión

uso de filtros
curvas camino-tiempo

Temblor a profundidad de
600 km en Fiji registrado a
una distancia de 87° .



SISMOLOGÍA GLOBAL

- Se usan *tiempos de viaje* de diferentes tipos de ondas para estudiar la estructura de la Tierra.

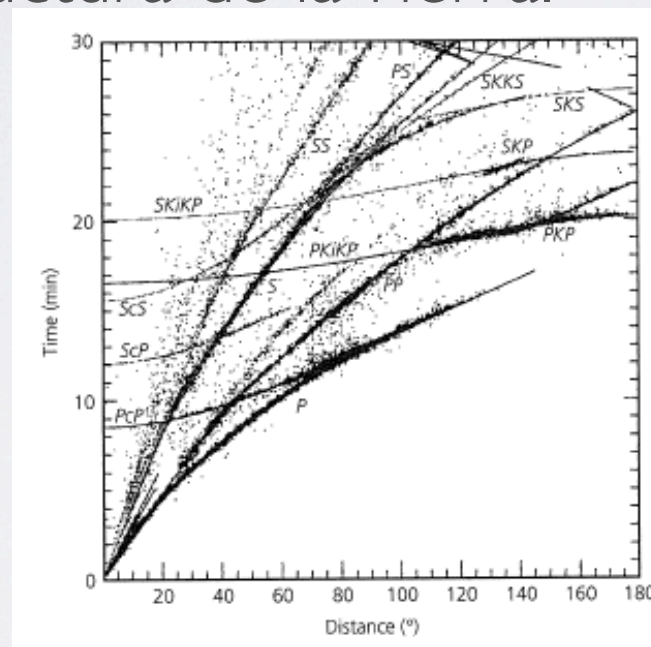


Fig. 3.5-3 Travel time data for various body wave phases and travel time curves for model IASP91. The travel times are corrected to those for an earthquake at the surface. The data are 57,655 travel times from 104 sources (earthquakes and explosions). (Kennett and Engdahl, 1991.)

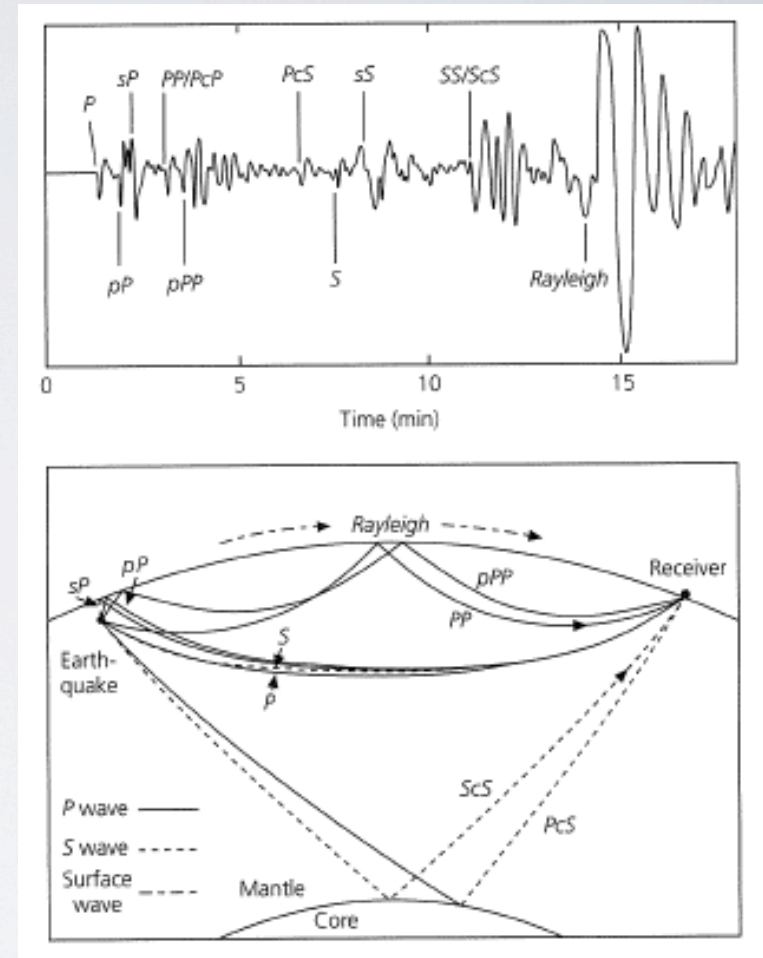
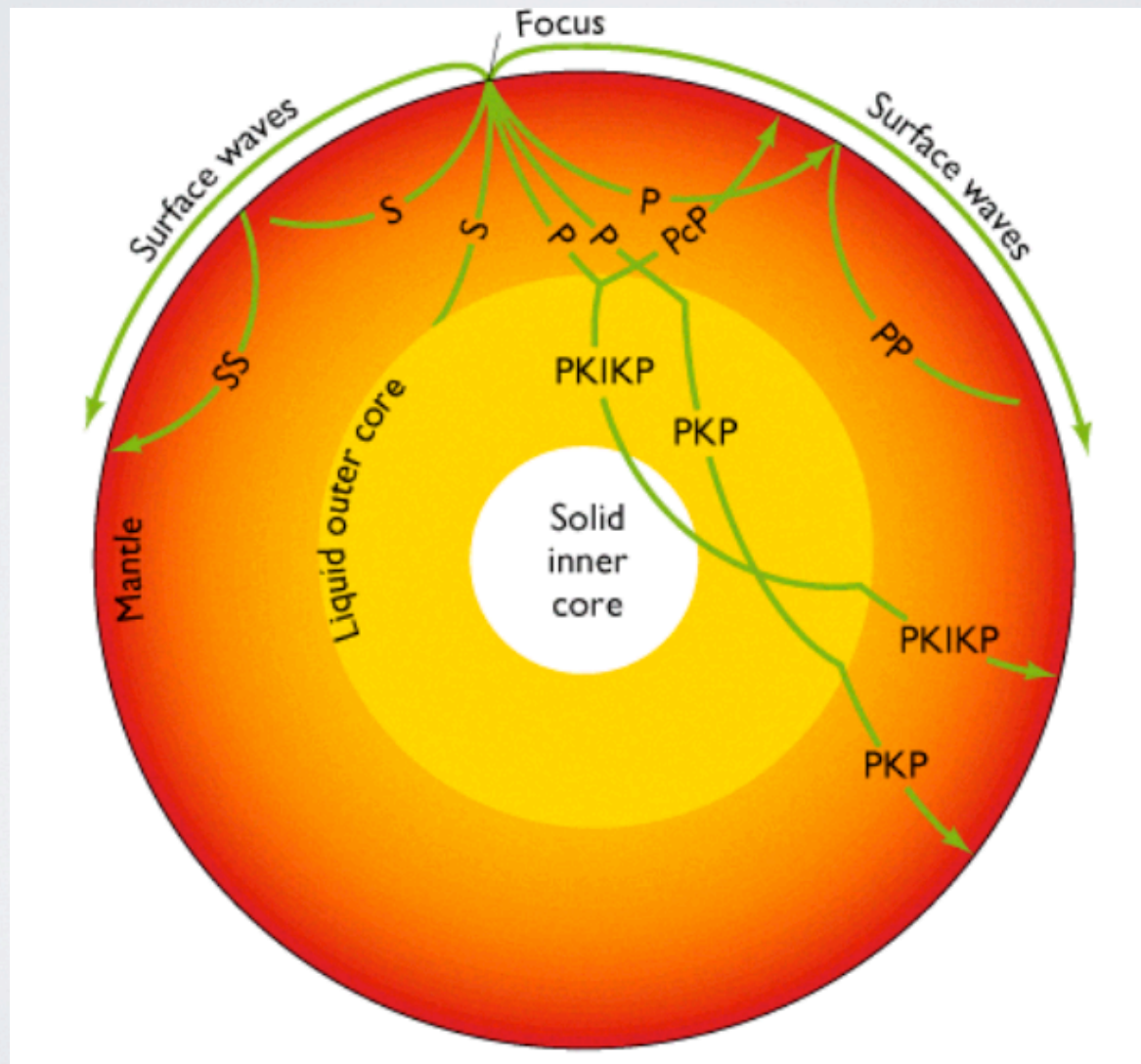


Fig. 3.5-2 Top: Long-period vertical component seismogram at Golden, Colorado, showing various seismic phases. Bottom: Ray paths for some of the seismic phases labeled on the seismogram. Paths taken as P waves are shown as solid lines; paths taken as S waves are shown as dashed lines. Although P and S are both direct phases, they do not travel the exact same path because their velocities differ. Similarly, the ray path for PcS is asymmetric, and pP and sP do not reflect off the surface at the same location.

TRAYECTORIAS

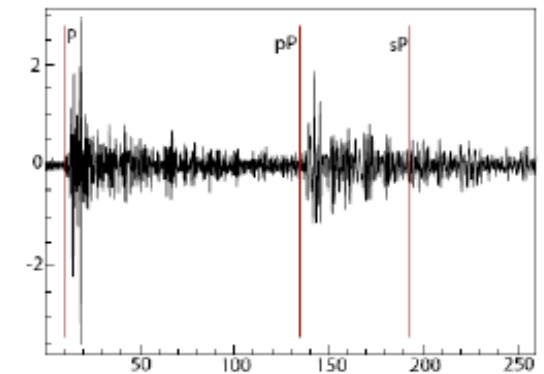
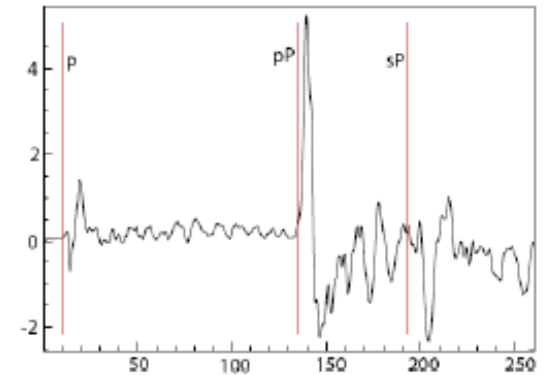
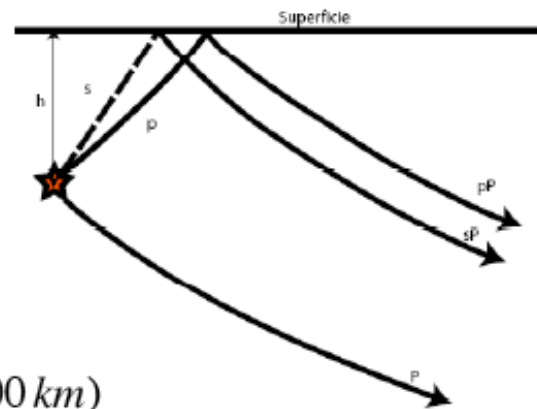


FASES DE PROFUNDIDAD

Cruciales para determinar profundidad fuente
díficiles de identificar para sismos someros

Ecuación aproximada para
la profundidad, h

$$h [km] \approx \Delta t(pP - P) / 2 [seg] \times 7 \quad (h < 100 km) \\ \times 8 \quad (100 km < h < 300 km) \\ \times 9 \quad (h > 300 km)$$



Tiempo (seg)

$H = 600 km$

Registros banda ancha arriba

Periodo corto abajo

ENTRE 10° Y 30°

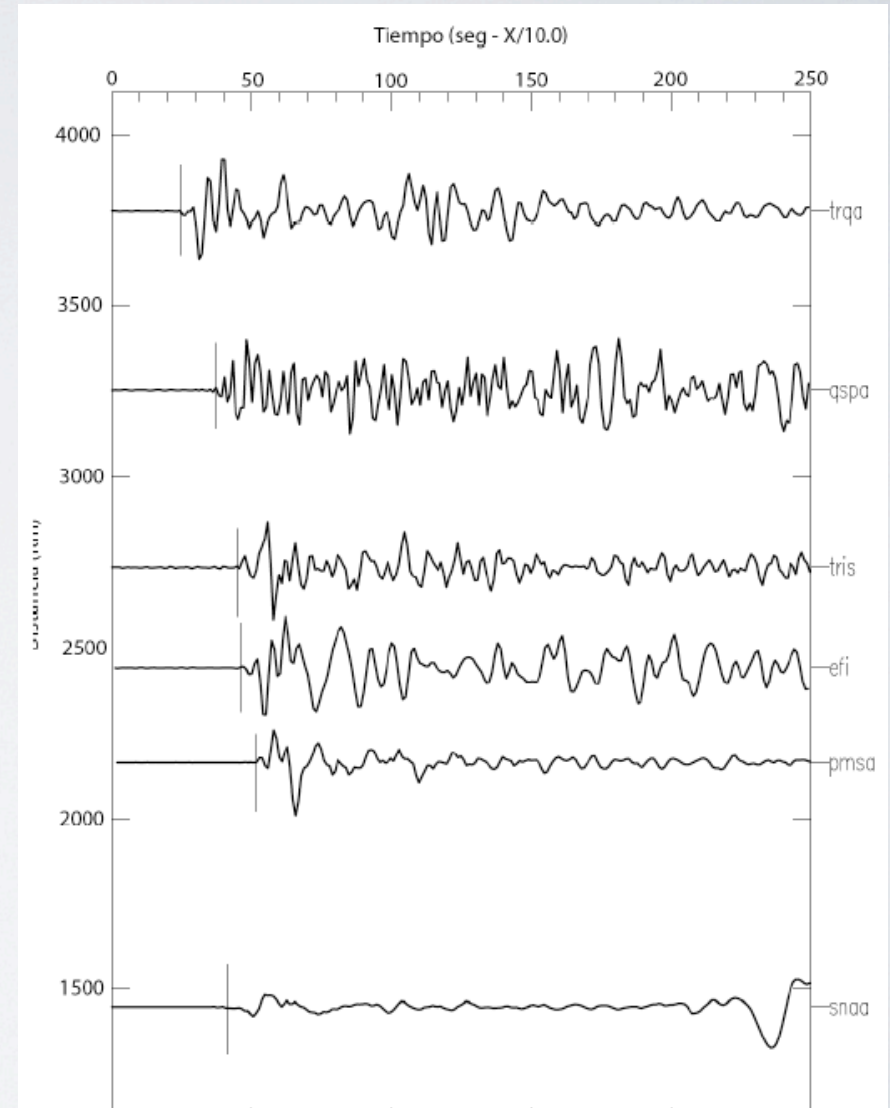
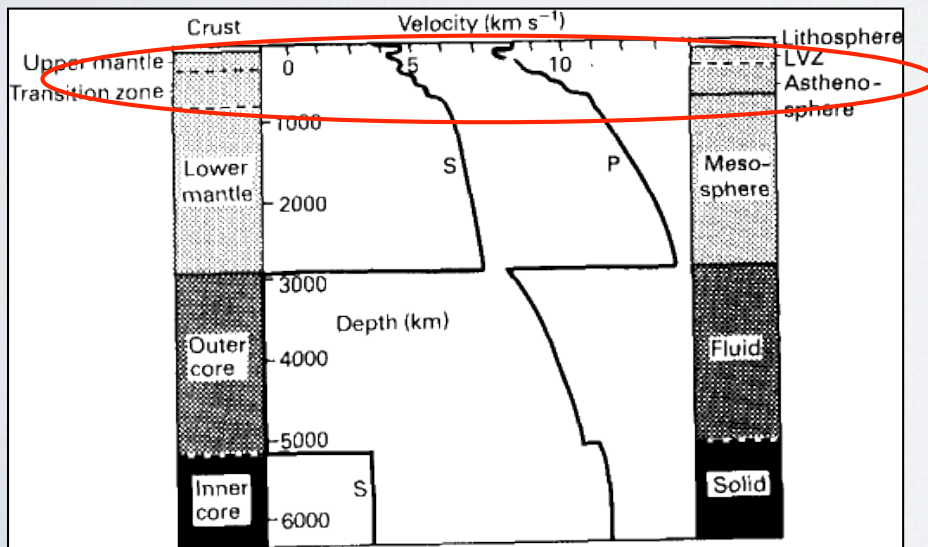
Principalmente: manto superior (Moho-410 km)
zona transición (410-660 km)

Fuertes contrastes de impedancia:

dos triplicaciones (P410P, P660P)

Complicación registros periodo corto para P y S
(duración P,S > 10 segundos -superposición-)

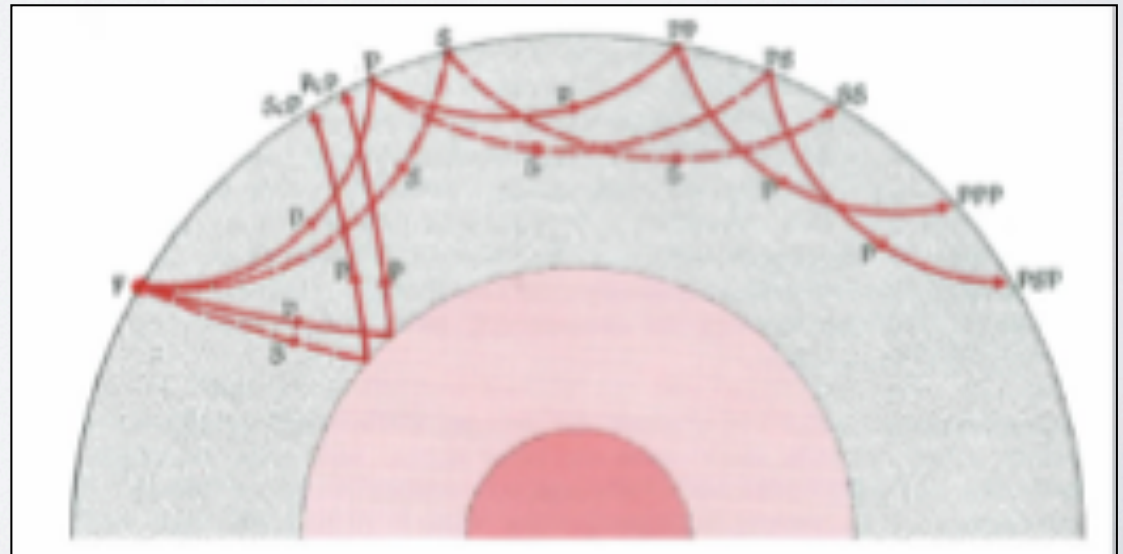
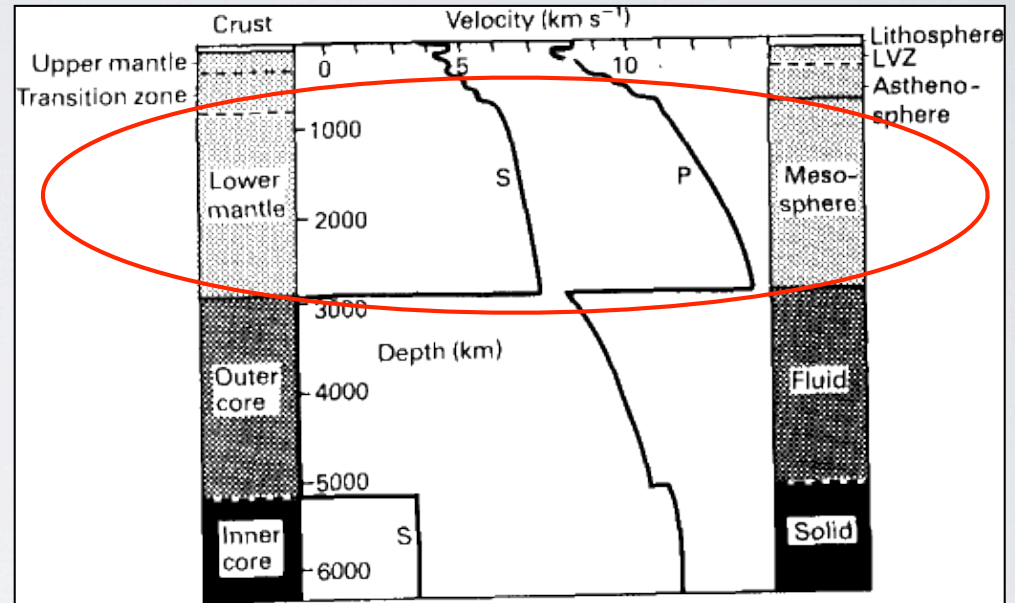
Fase S importante



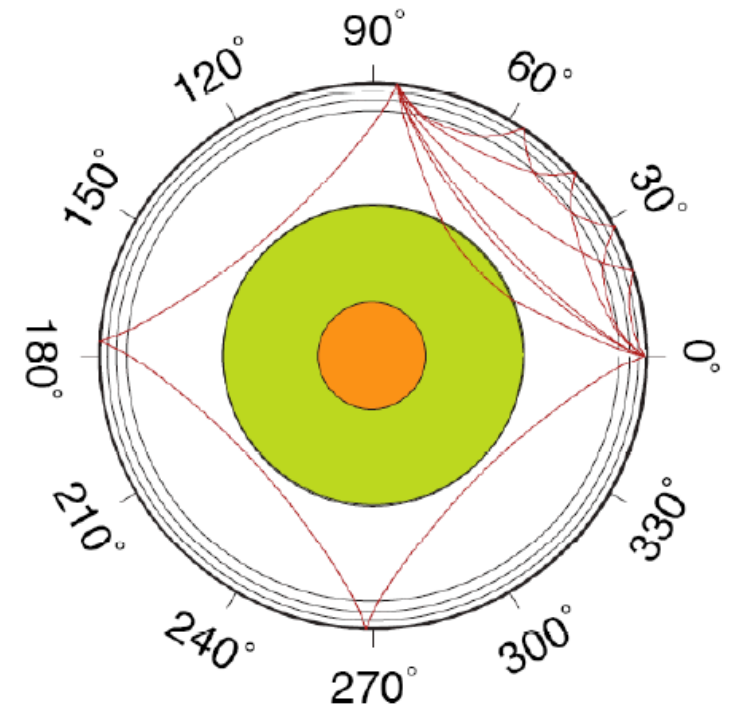
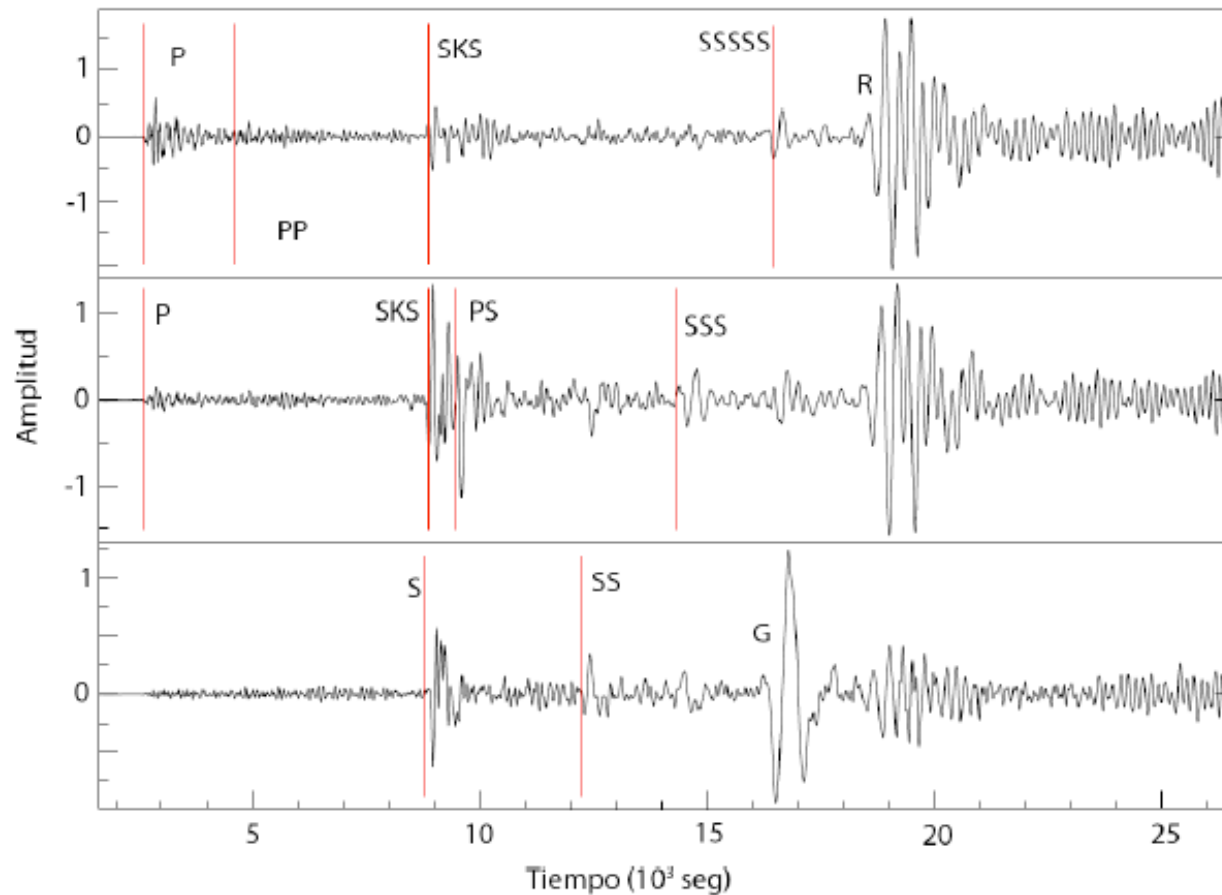
El registro anterior muestra esta complicación de las ondas P entre los 10° y los 30° de distancia. Para la estación SNAA a menos de 1500 km, la onda P es simple, mientras que para distancias mayores se complica por el arribo de las ondas P410P y P660P.

DISTANCIAS 30°-103°

Principalmente: manto inferior
(gradiente muy suave velocidad)
Fases relativamente limpias: P, S +
cierto n° ondas secundarias
(reflexiones y conversiones sup.
libre y CMB)
[más a distancias más largas]
Fase S importante hasta ~ 100°
(para $\Delta > 80^\circ$ primera llegada
transversal: SKS)
 $\Delta > 40^\circ$ fases PP y SS a menudo las
más importantes
reflexiones CMB emergencia
pronunciada para $\Delta < 40^\circ$



DISTANCIAS 30°-103°

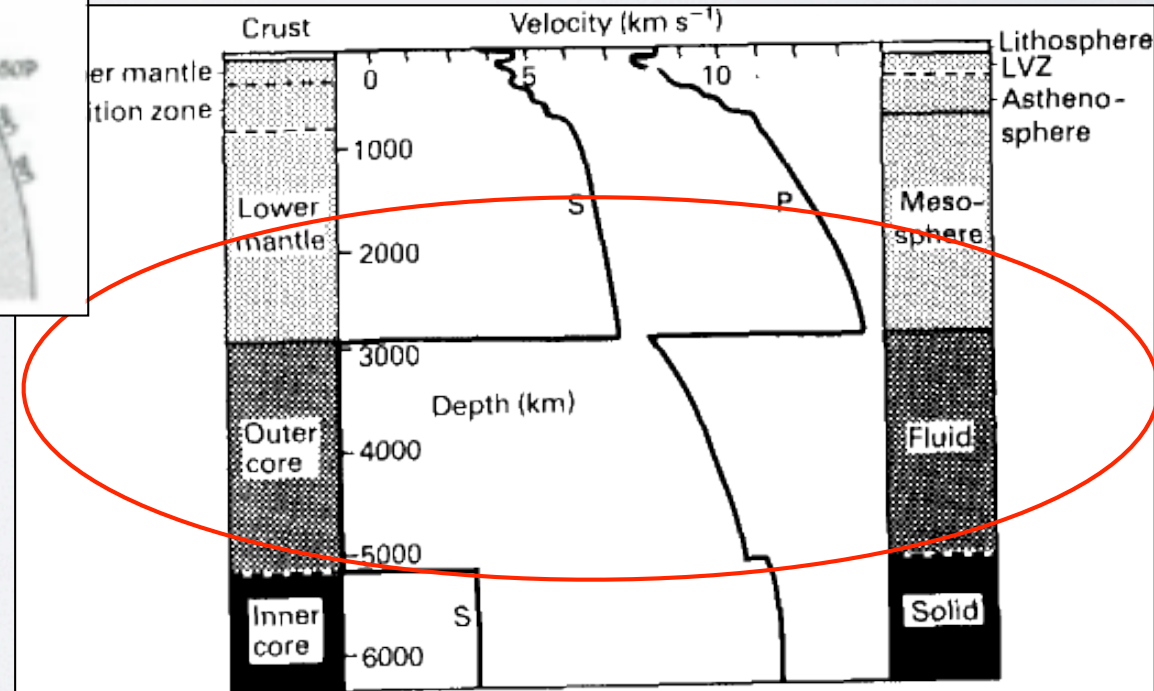
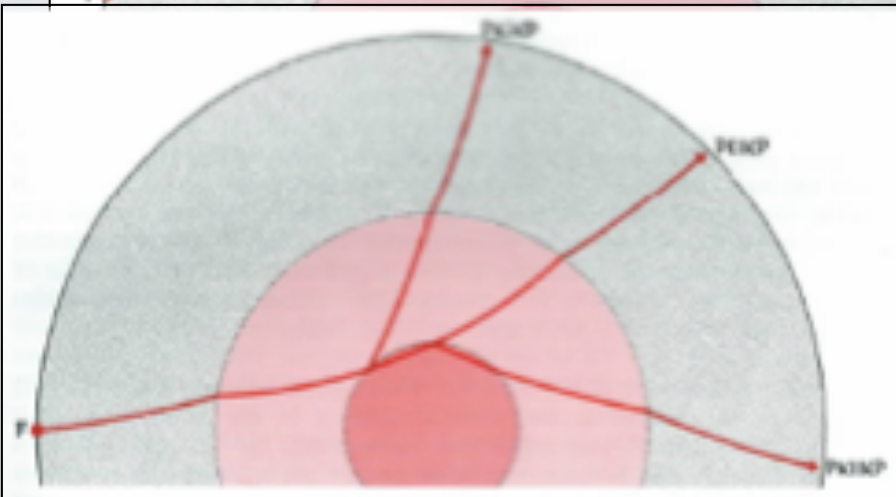
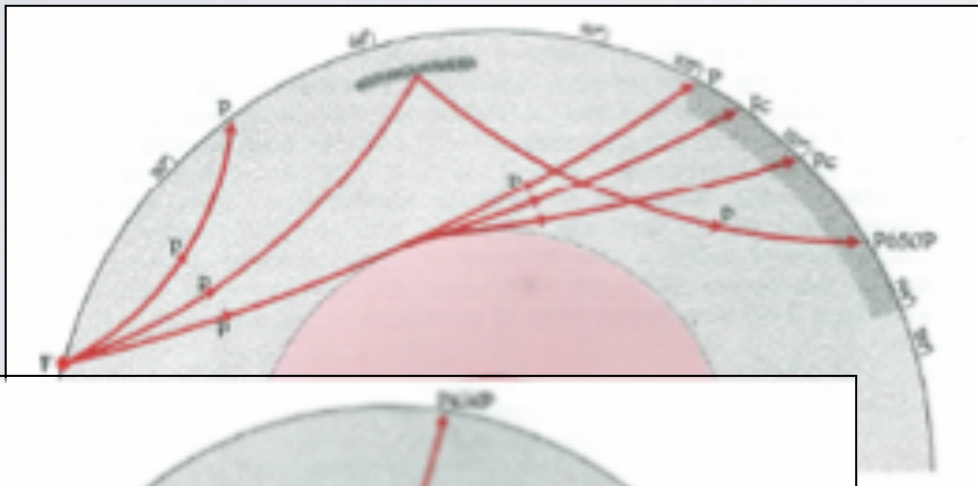


La figura anterior muestra los registros del sismo de Tonga del 3 de Mayo del 2006, registrado a 85° de distancia. Las ondas más sobresalientes son la P, S y las ondas superficiales, sin embargo otras fases como PS, SS y SSS sobresalen en los sismogramas. Estas fases son reflexiones en la superficie libre de la Tierra. Las trayectorias de estas ondas aparecen en la siguiente figura.

103° A 144°

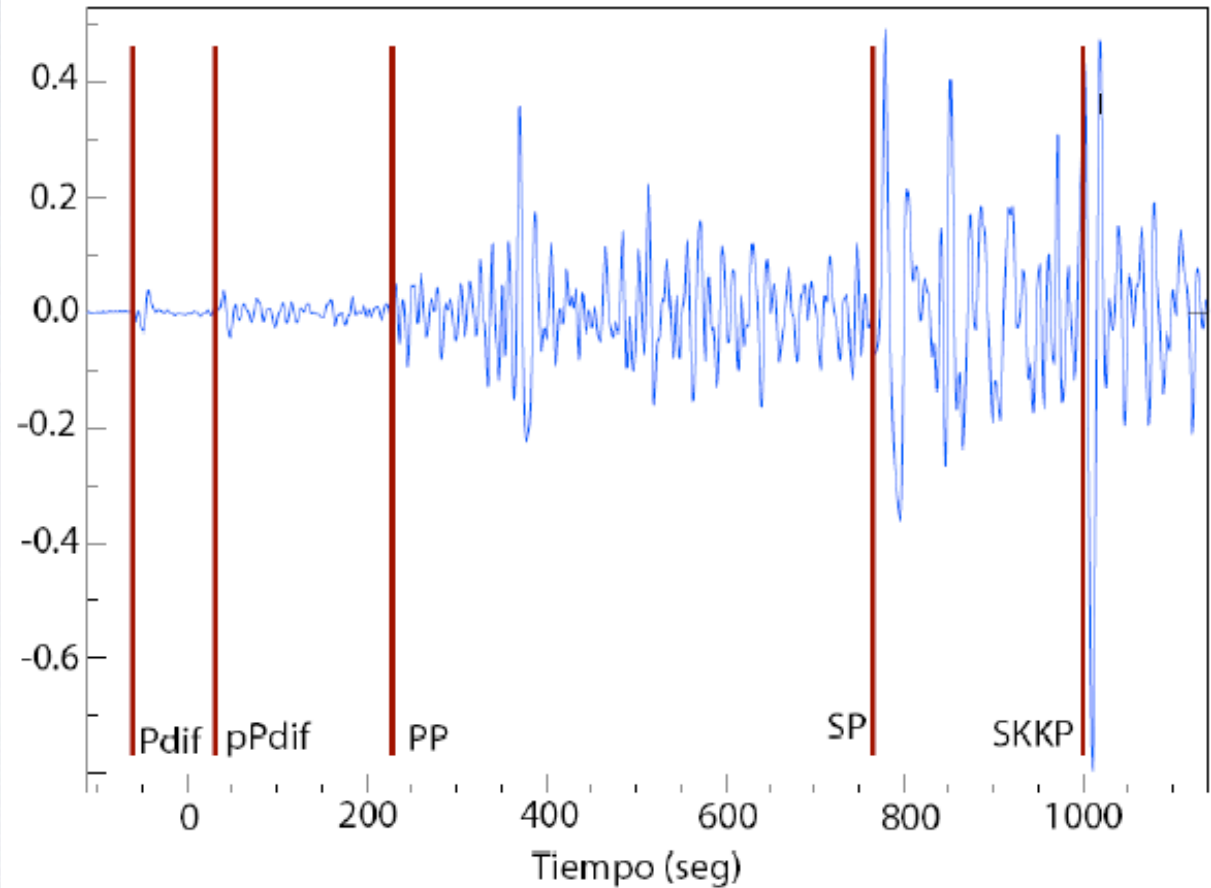
Zona de sombra por la fuerte caída de velocidad a CMB, 13.6 km/s → 8 km/s

NO existe S en núcleo externo (únicamente P -'K'-)
En este rango no hay P directa, sólo hay P_{dif} ($\equiv P_{diff} \equiv P_c$) (Energía difractada en CMB a periodos largos. Es un fase emergente con baja amplitud.



PDIFF

$\Delta = 113^\circ$
H = 390 km



Registro a 113° de distancia del epicentro de un sismo con foco a 390 km de profundidad. Ambas Pdif y pPdif se muestran claramente en el sismograma como fases de período largo.

> 144°

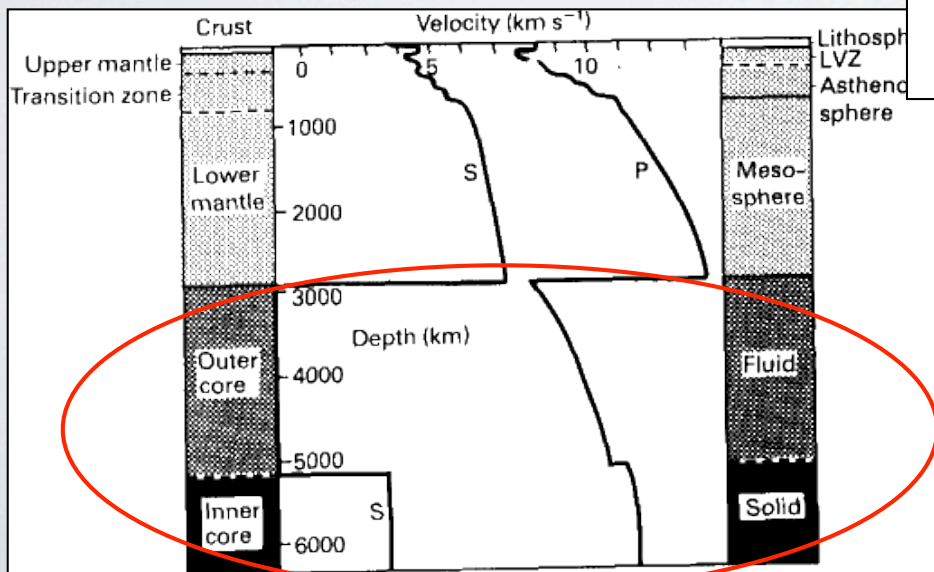
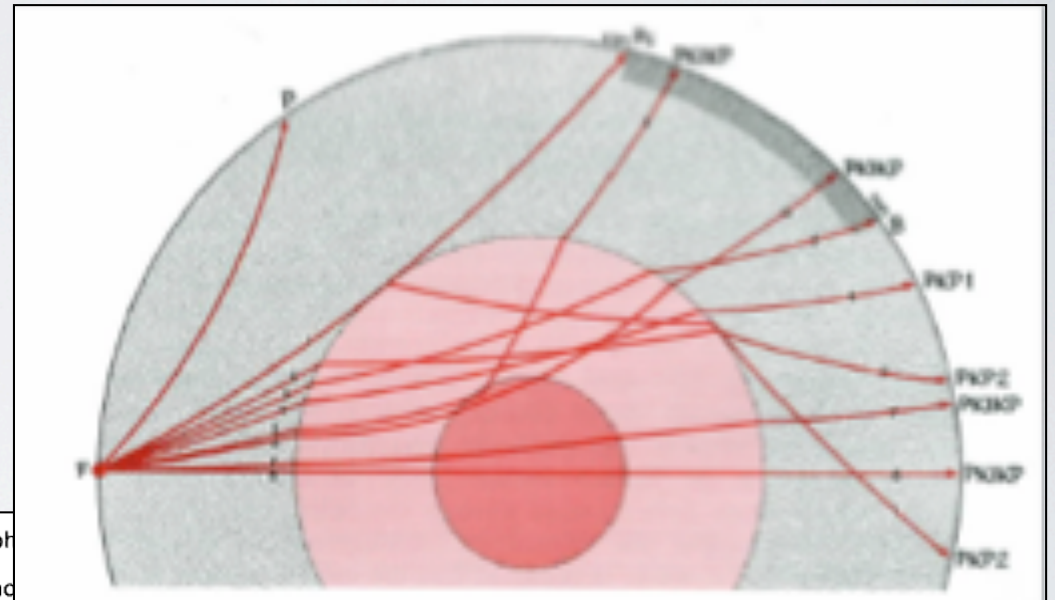
final zona de sombra

~ 144° cáustica PKP: trenes onda especialmente complicados

> 144° separación visible ramas PKP:

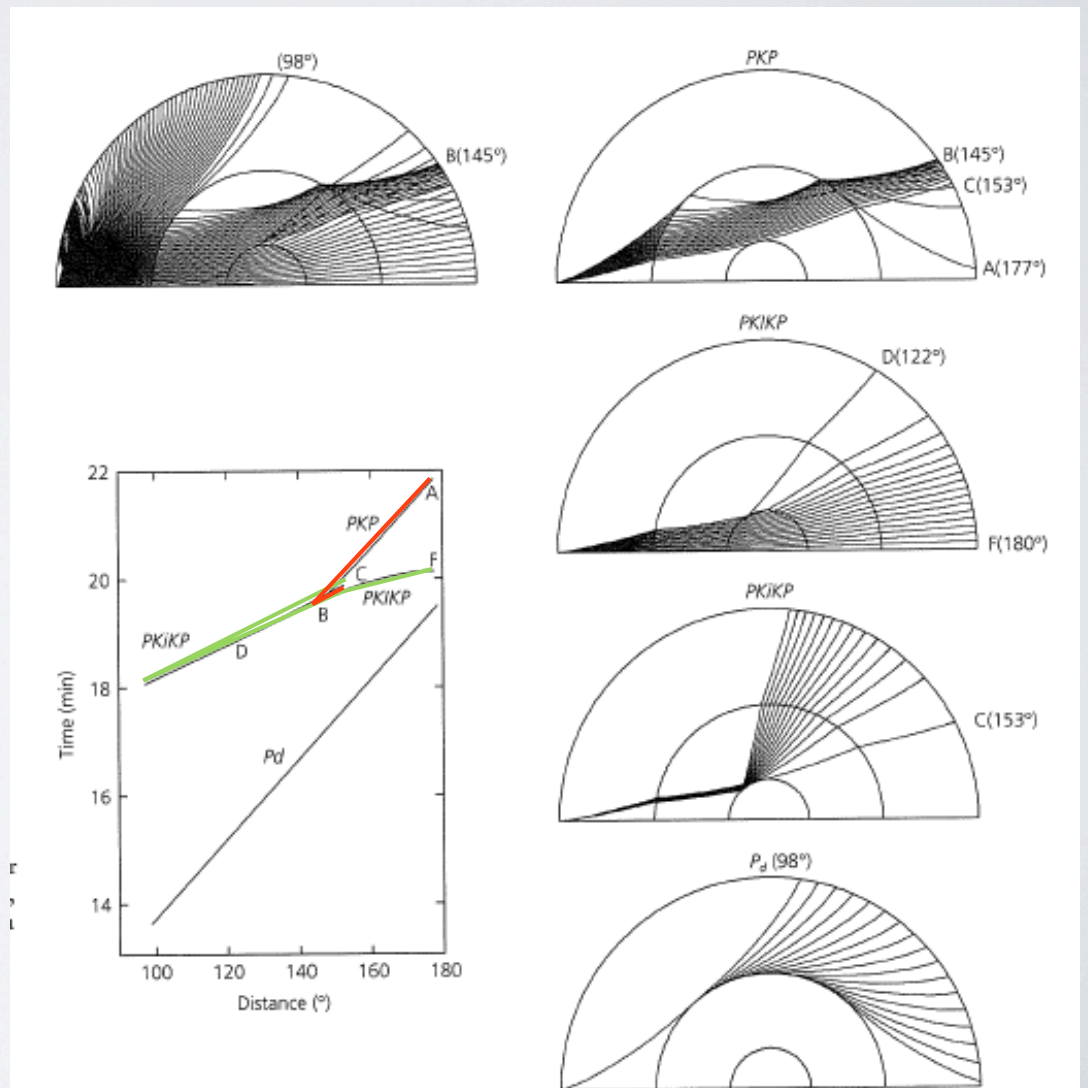
144°-153° PKP1 rama dominante

> 157° PKP2 rama dominante

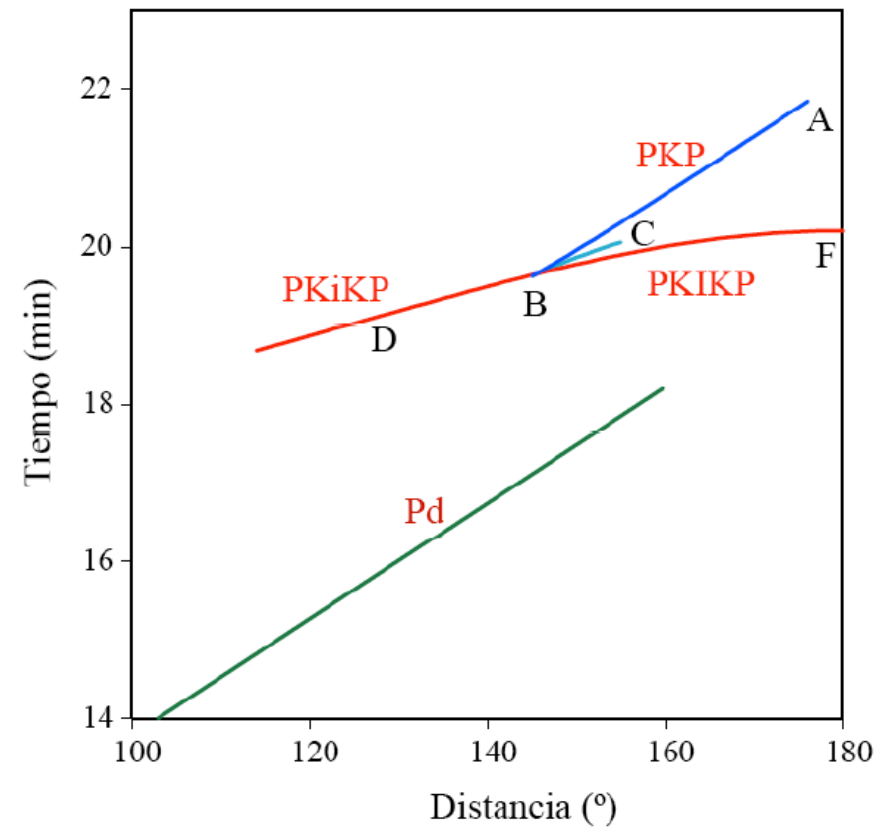
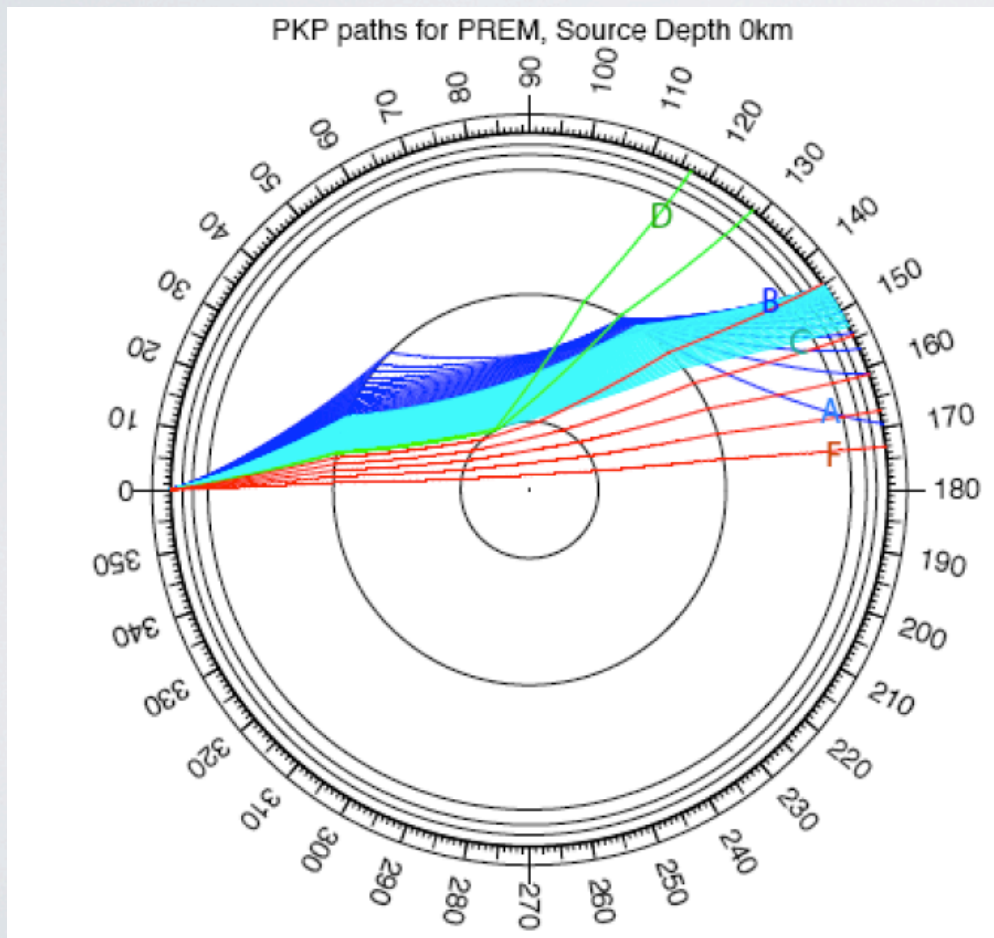


FASES DEL NÚCLEO

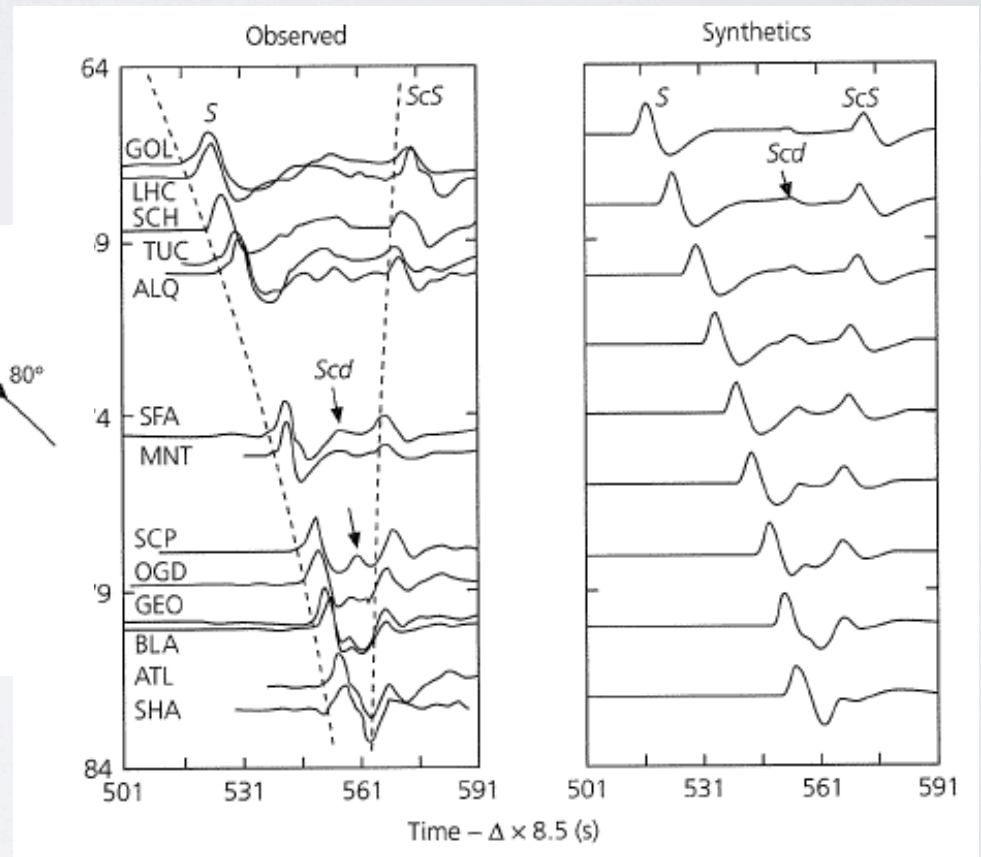
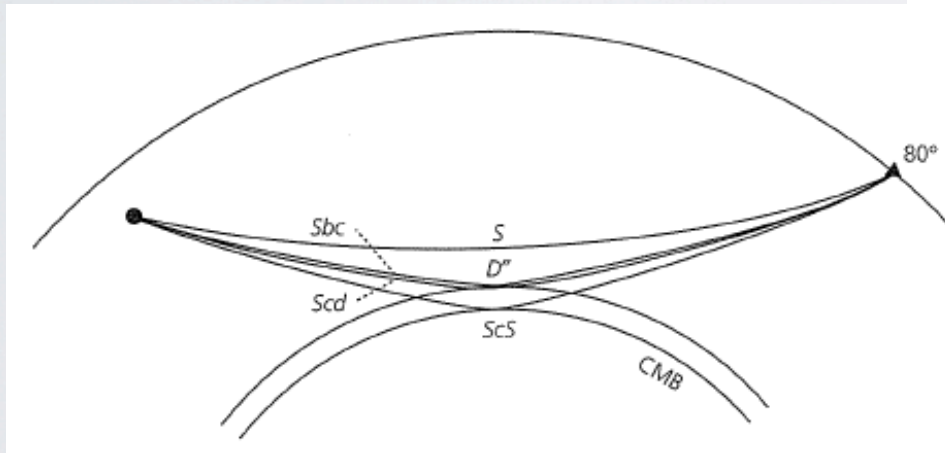
- ABC - (rojo) debido a la zona de baja velocidad (núcleo exterior) AB - PKP₂ [back-branch], BC - PKP₁ [forward branch]
- CDF - (verde) la triplicación debida a la zona de alta velocidad (núcleo interior)
- El rango entre 144° y 153° es utilizado para estudiar el núcleo y la zona de CMB.



FASES DEL NÚCLEO

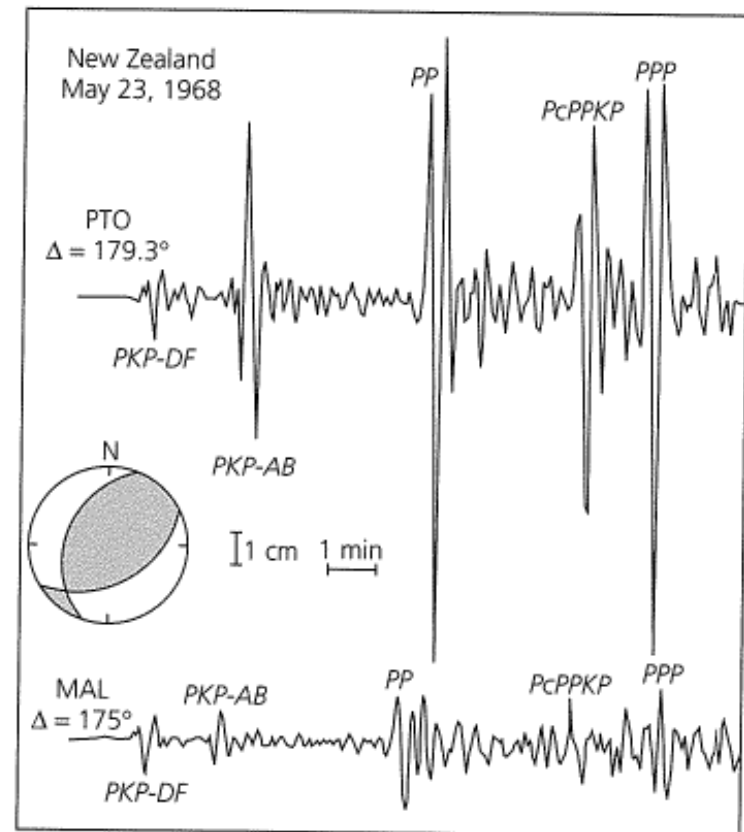
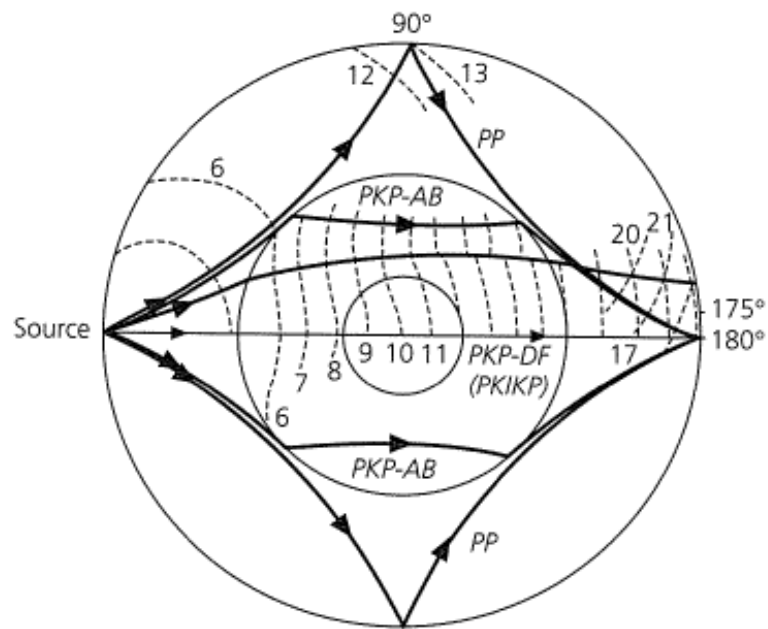


D''



ANTIPODO

Antipodal focusing



MODELOS DE VELOCIDAD

Figure 3.5-14: Upper mantle velocity models.

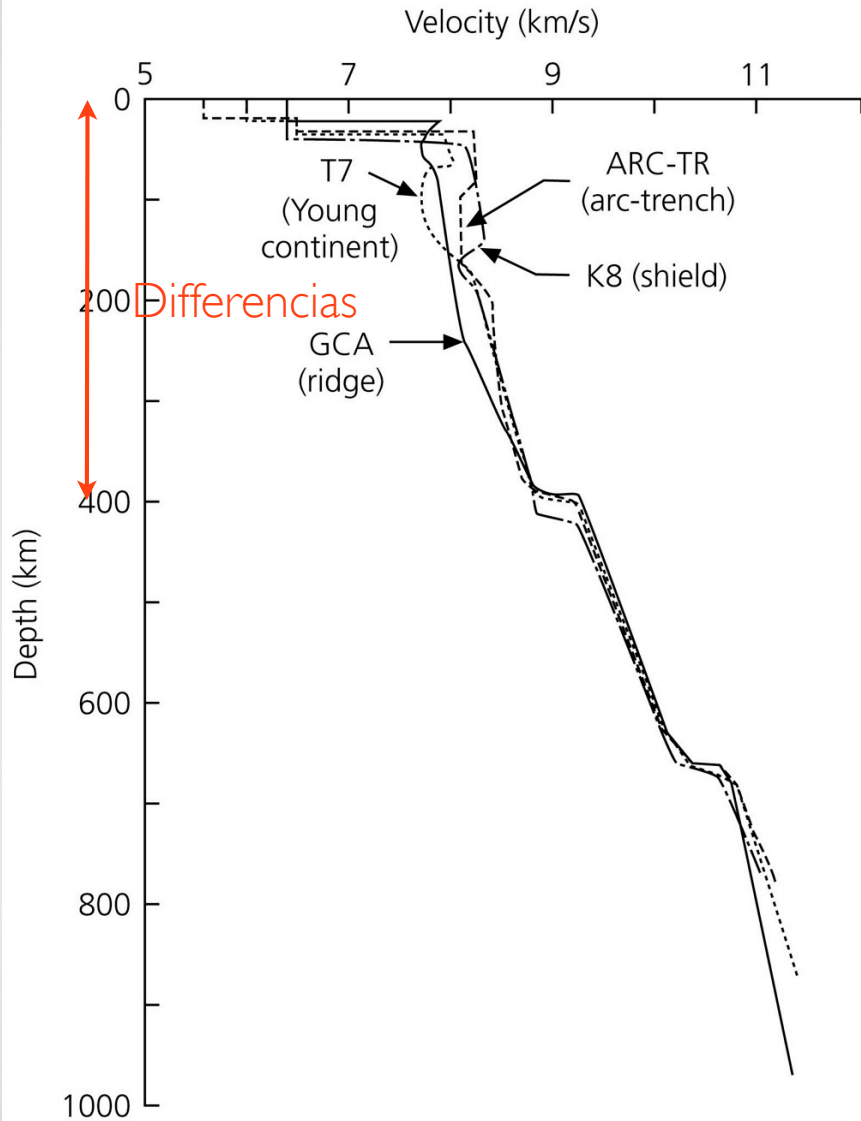
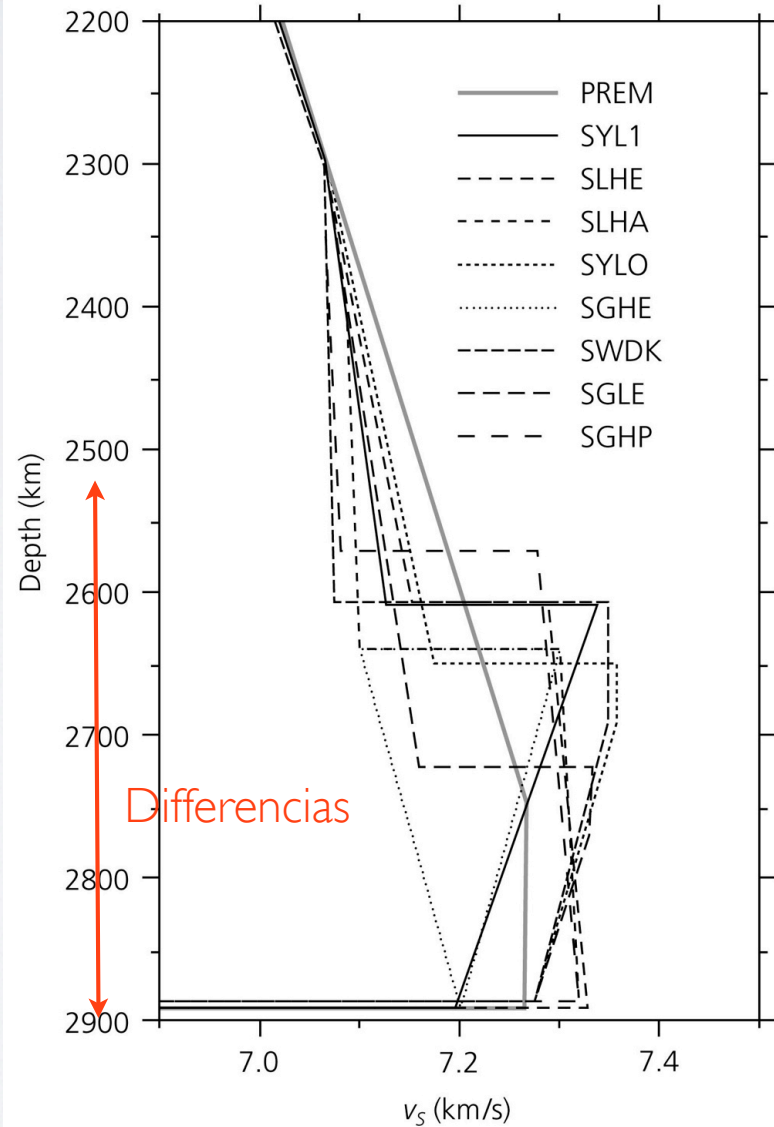


Figure 3.5-15: Lowermost mantle velocity models.



PKP PRECURSORS

Llegan antes de la onda P

Son reflexiones y “scattering” de inhomogeneidades en el manto.

Figure 3.5-8: PKP arrival time data, showing PKP precursors.

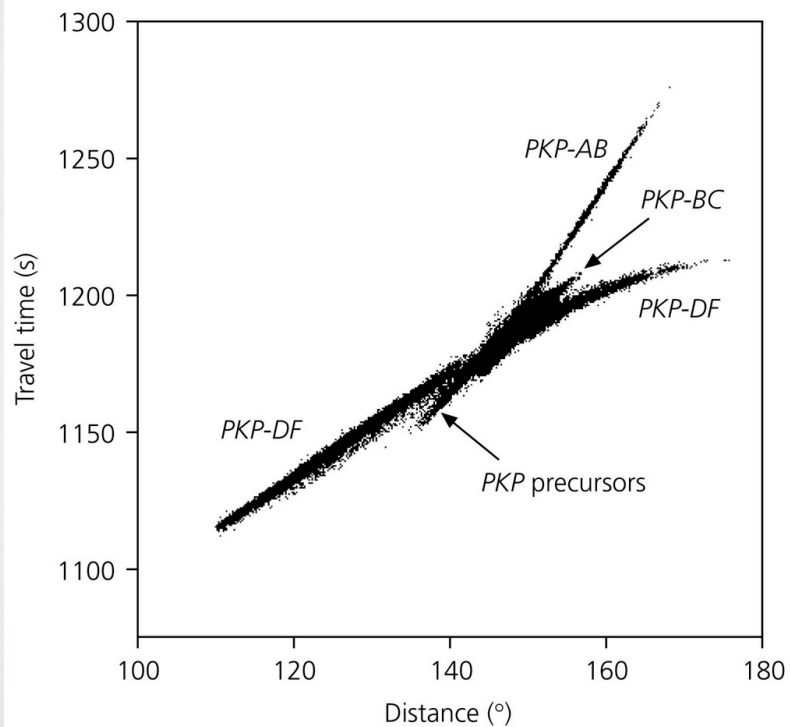
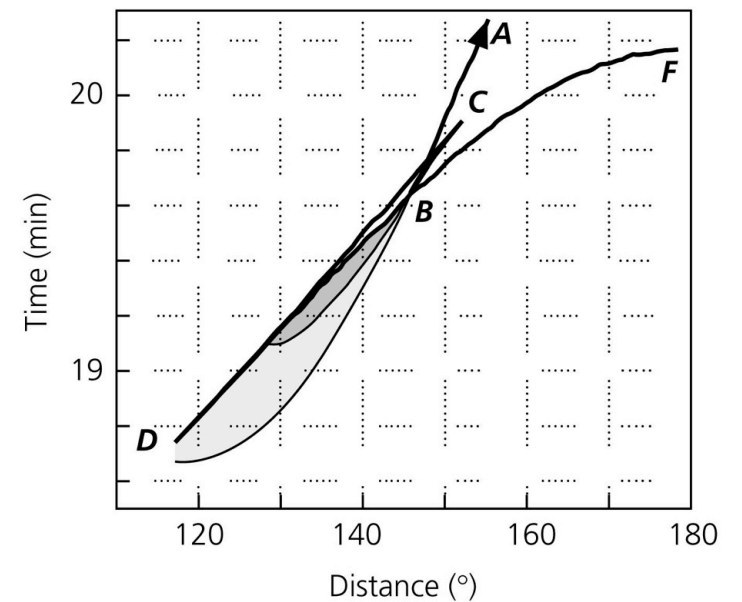
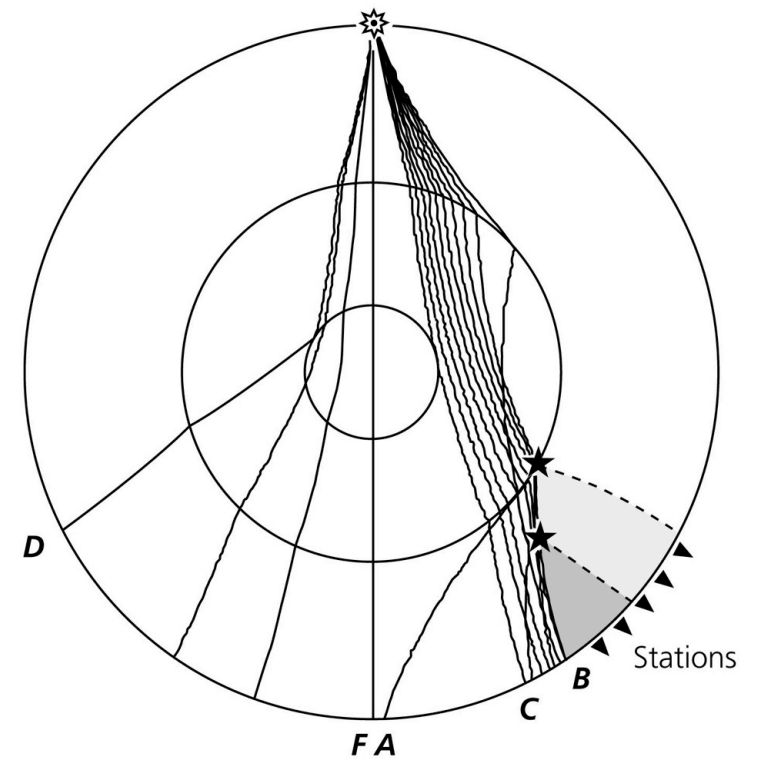


Figure 3.5-9: Model ray paths for the PKP precursors.



CÁUSTICOS: DISTORSIÓN DE FASE

En caso de un gradiente fuerte en la velocidad, tenemos ramos retrógrados.

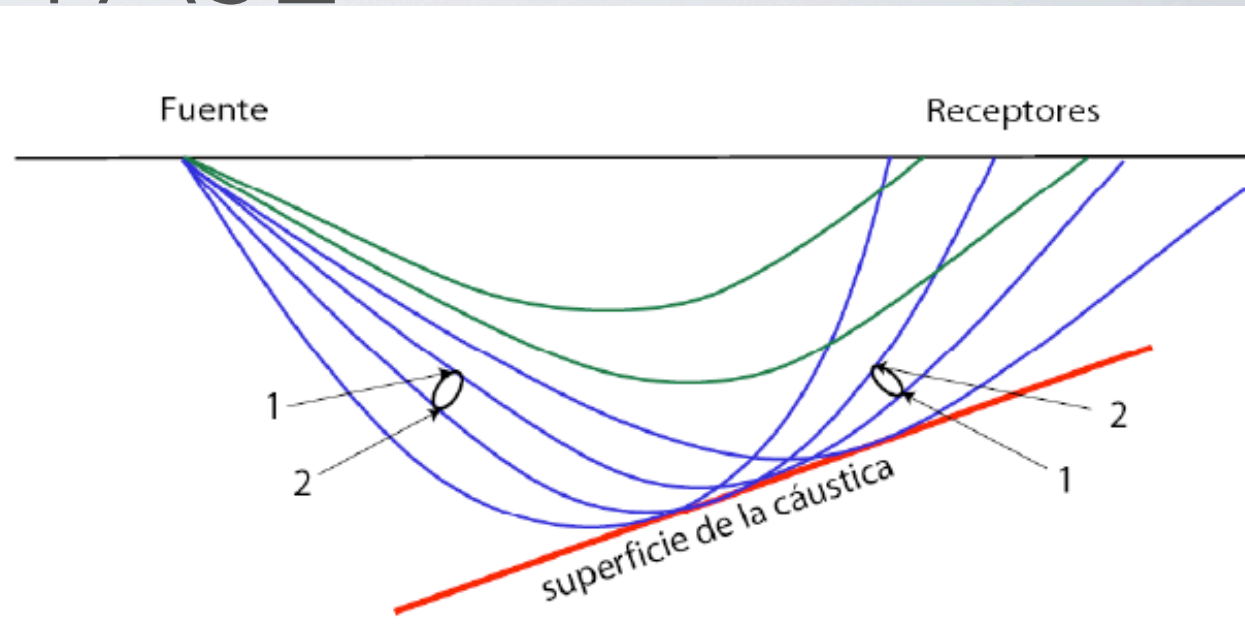
Esto causa que los tubos de rayos se invierten.

Por eso hay un cambio de fase de la llegada (en el ramo retrógrado) por $\pi/2$ de todos los frecuencias: transformación de Hilbert.

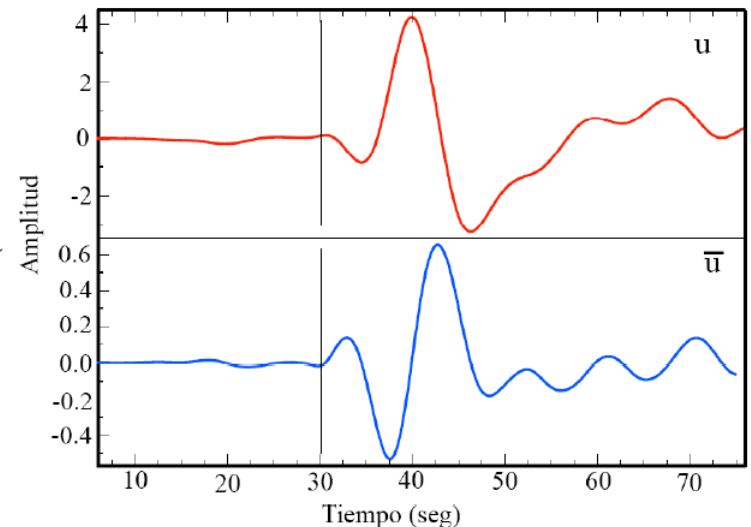
El superficie donda retornan y se cruzan los rayos se llama superficie interno de cáustica.

También fases que no tienen cáusticas internas pueden ser la transformada de Hilbert del fase inicial.

Algunos ejemplos: PP, PS, SP, SS, PKPab, pPKPab, sPKPab, SKKSac, SKKSdf, P'P', S'S'ac.



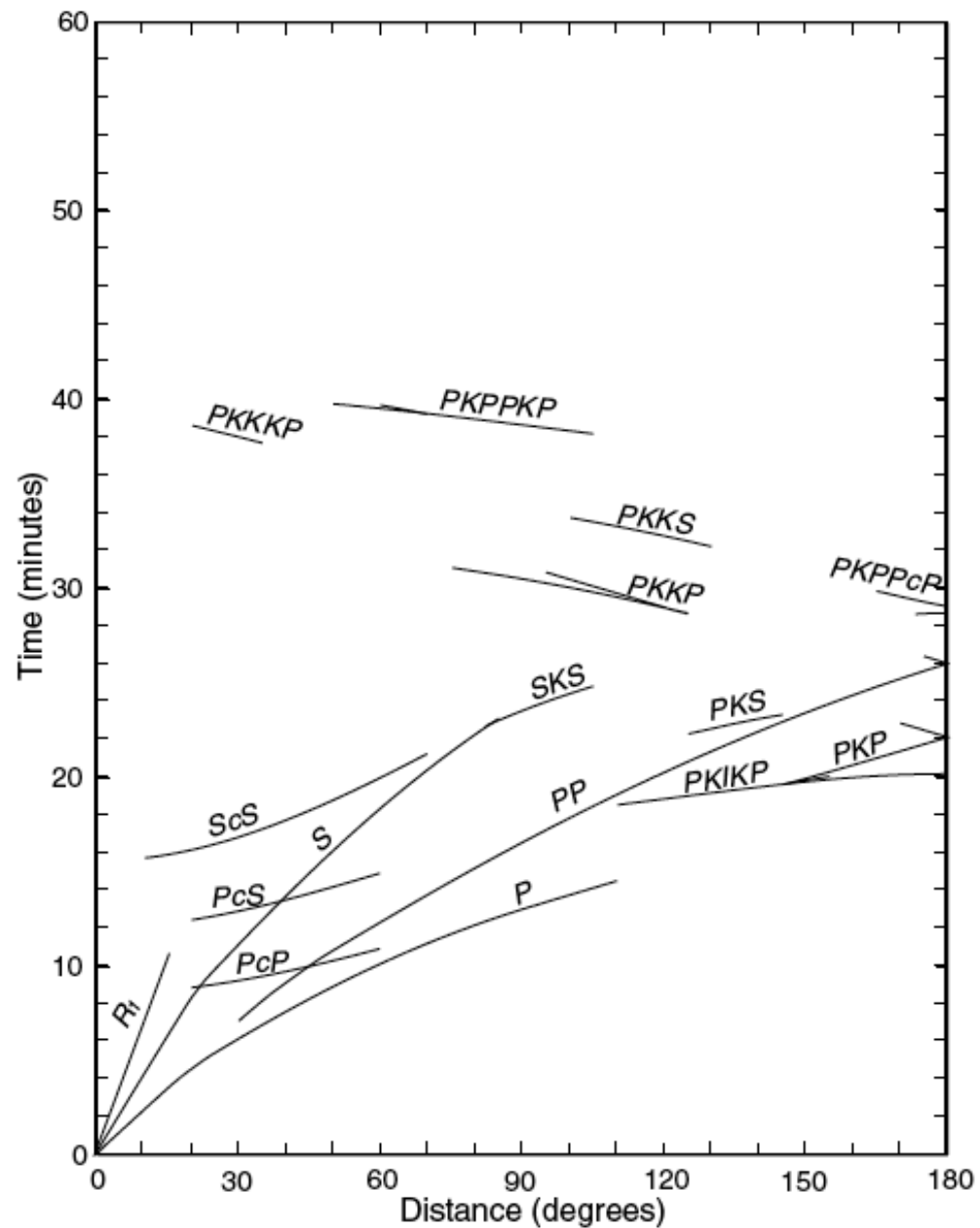
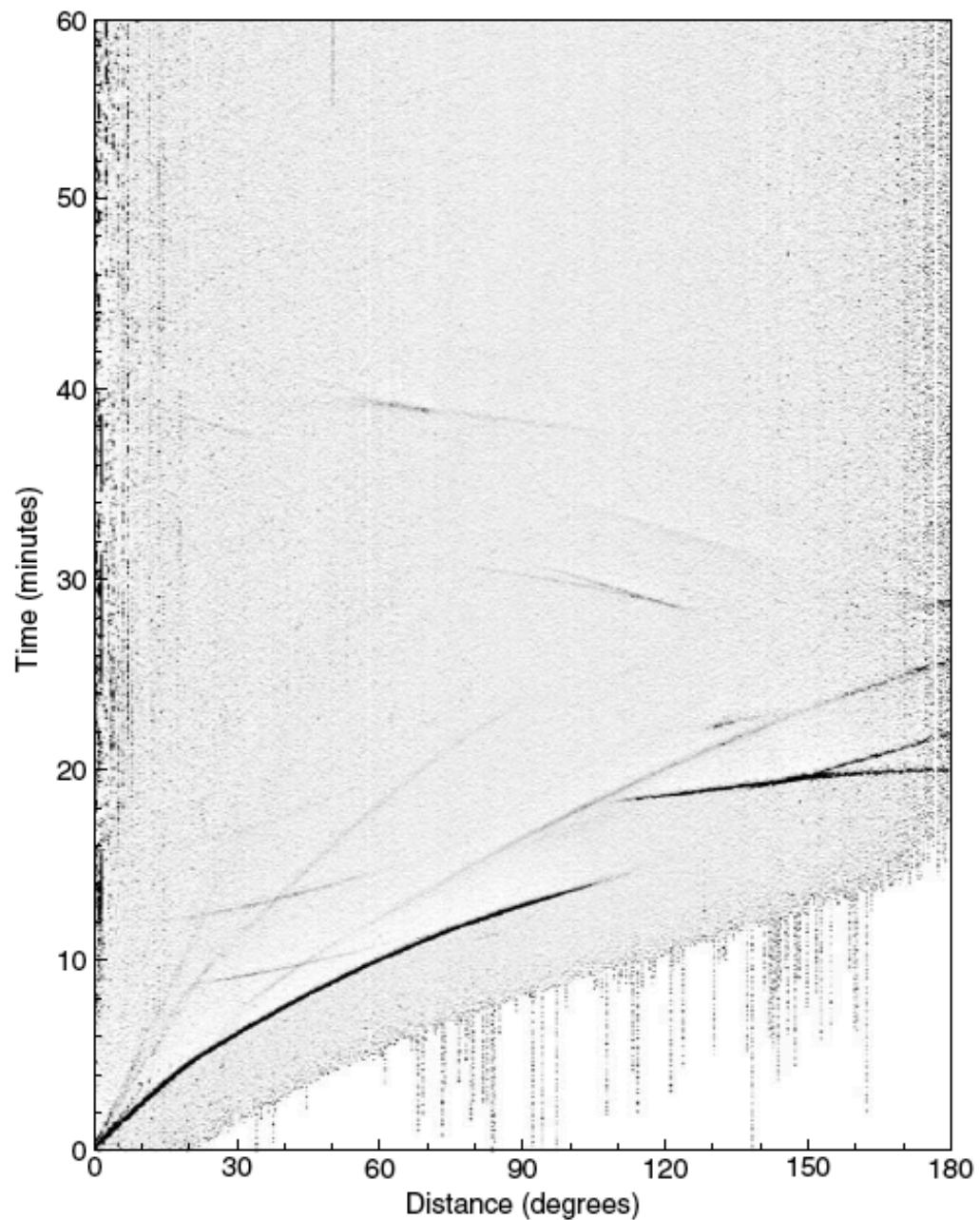
Una onda P típica y su transformada de Hilbert



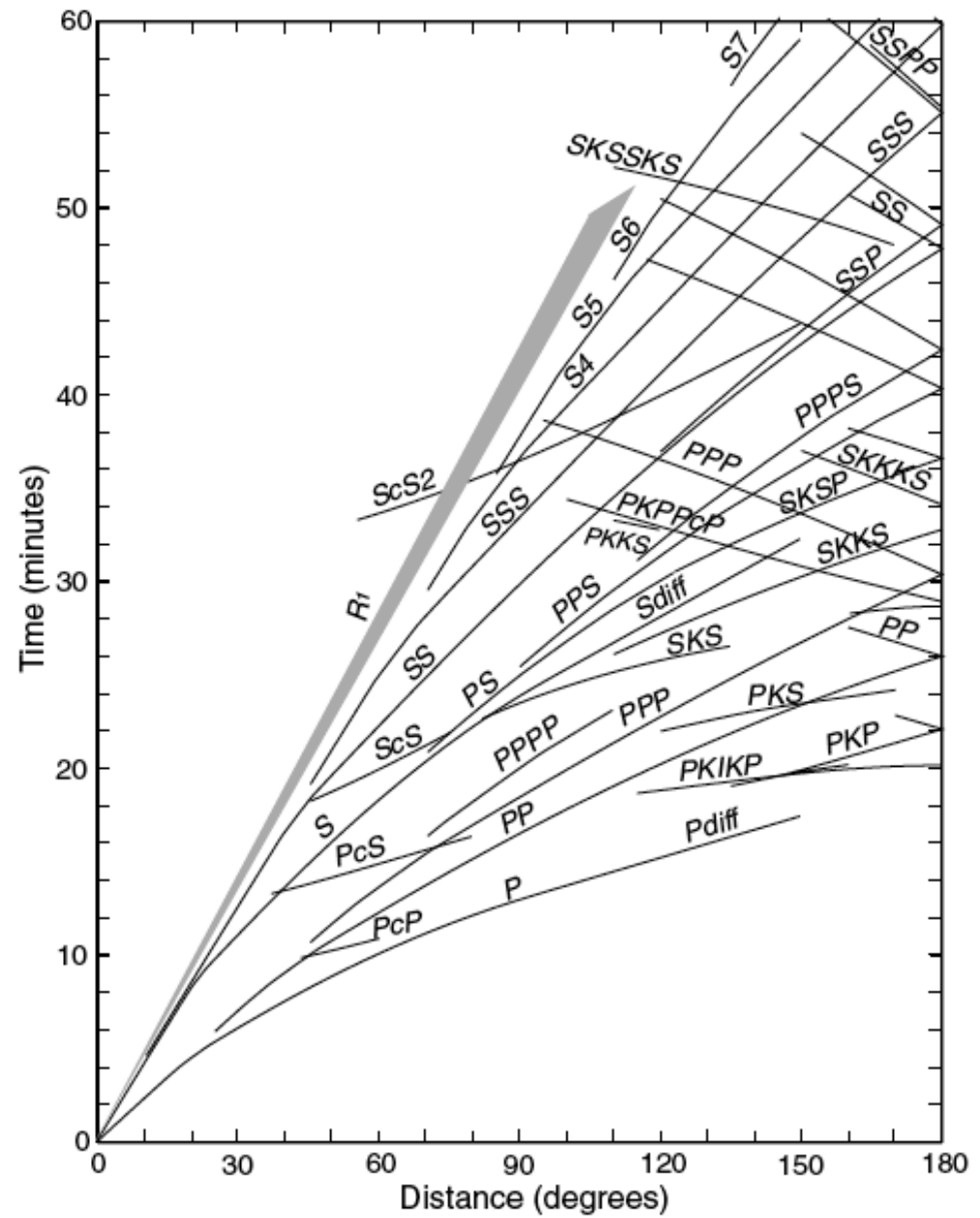
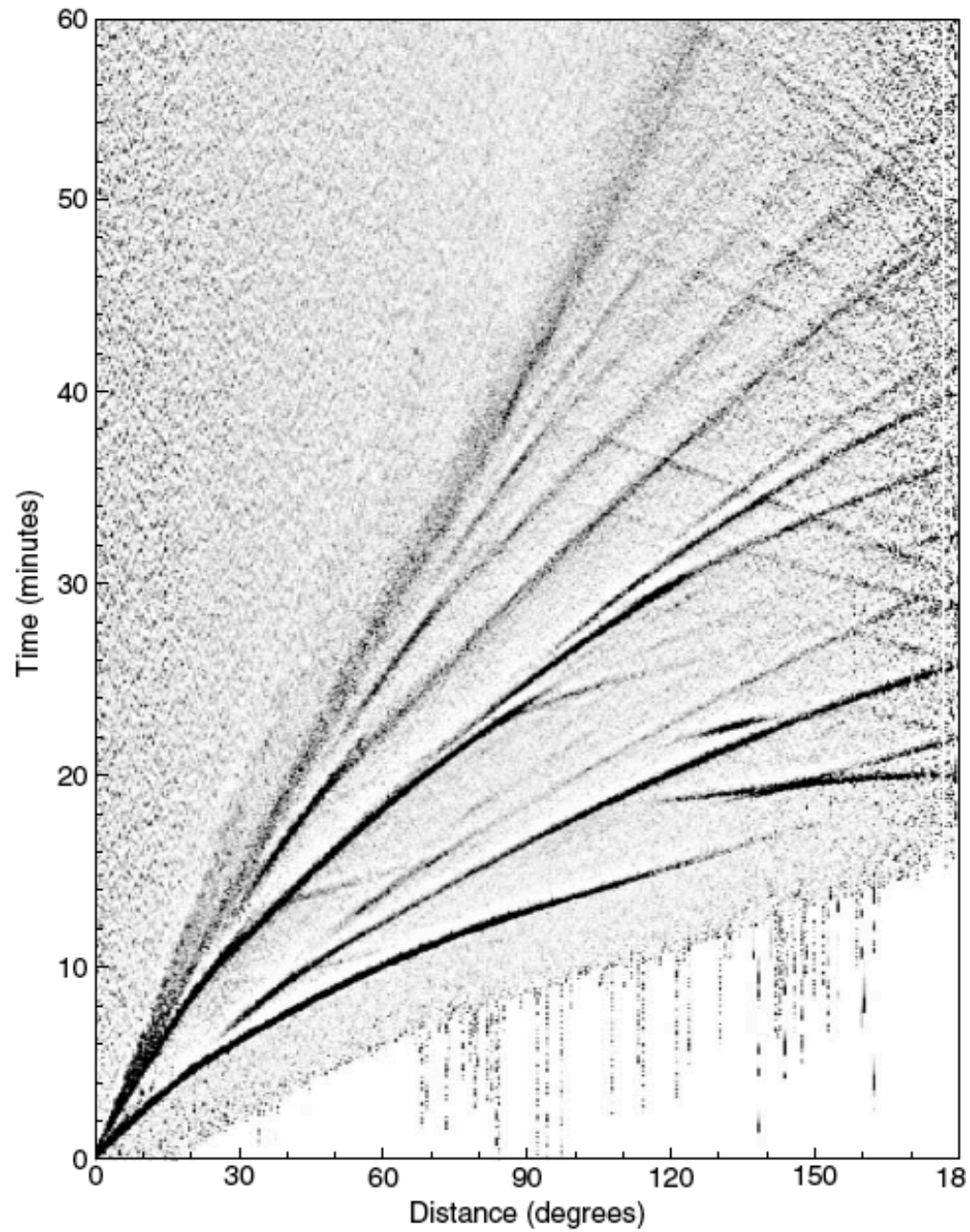
“STACKS” GLOBALES

- En los siguientes figuras vemos “stacks” globales de la red mundial de estaciones para temblores entre 1988 y 1994. Un total de casi 100.000 sismogramas.
- En las figuras “long period” significa periodos > 10 segundos y “short period” periodos < 2 segundos.

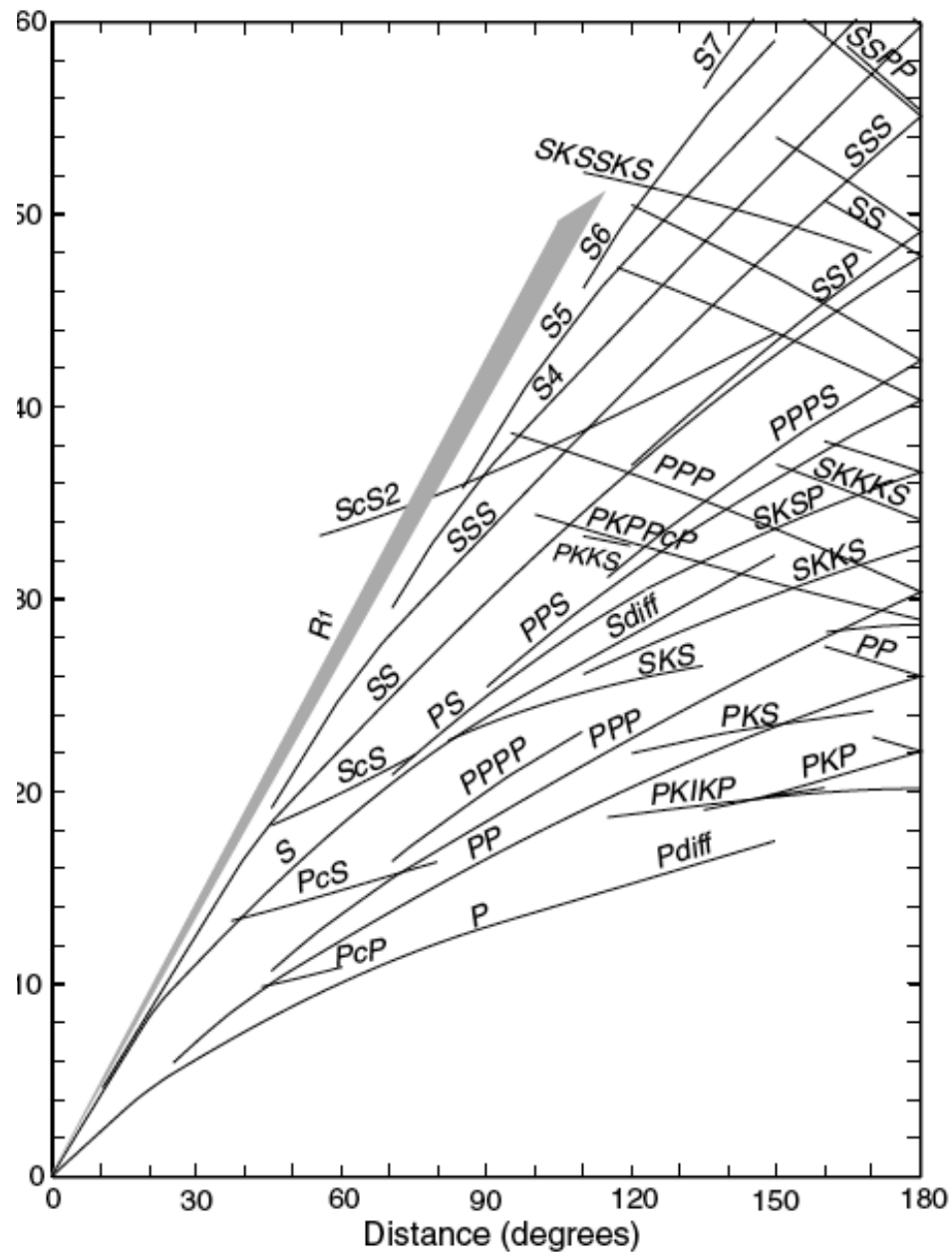
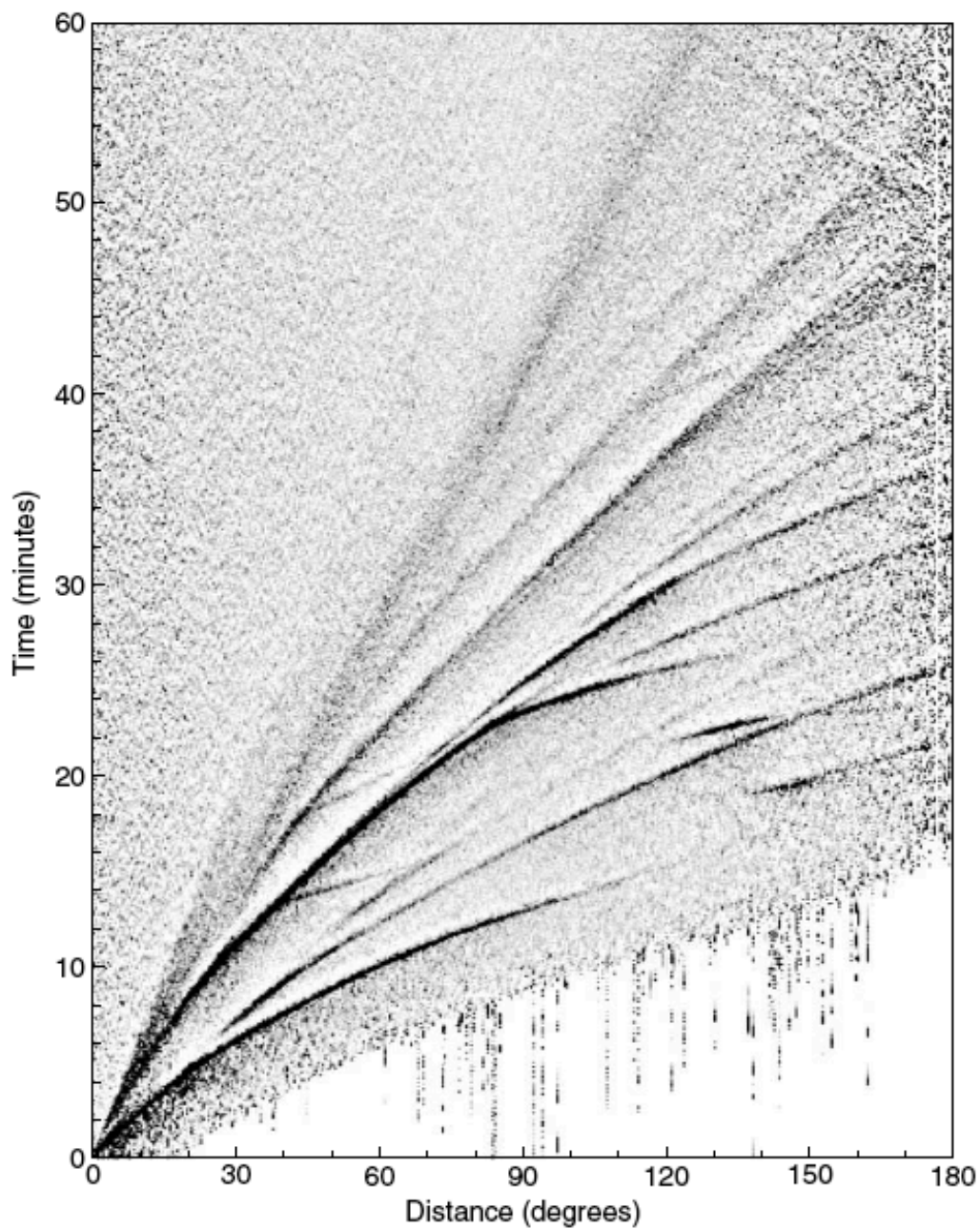
Short-period (vertical)



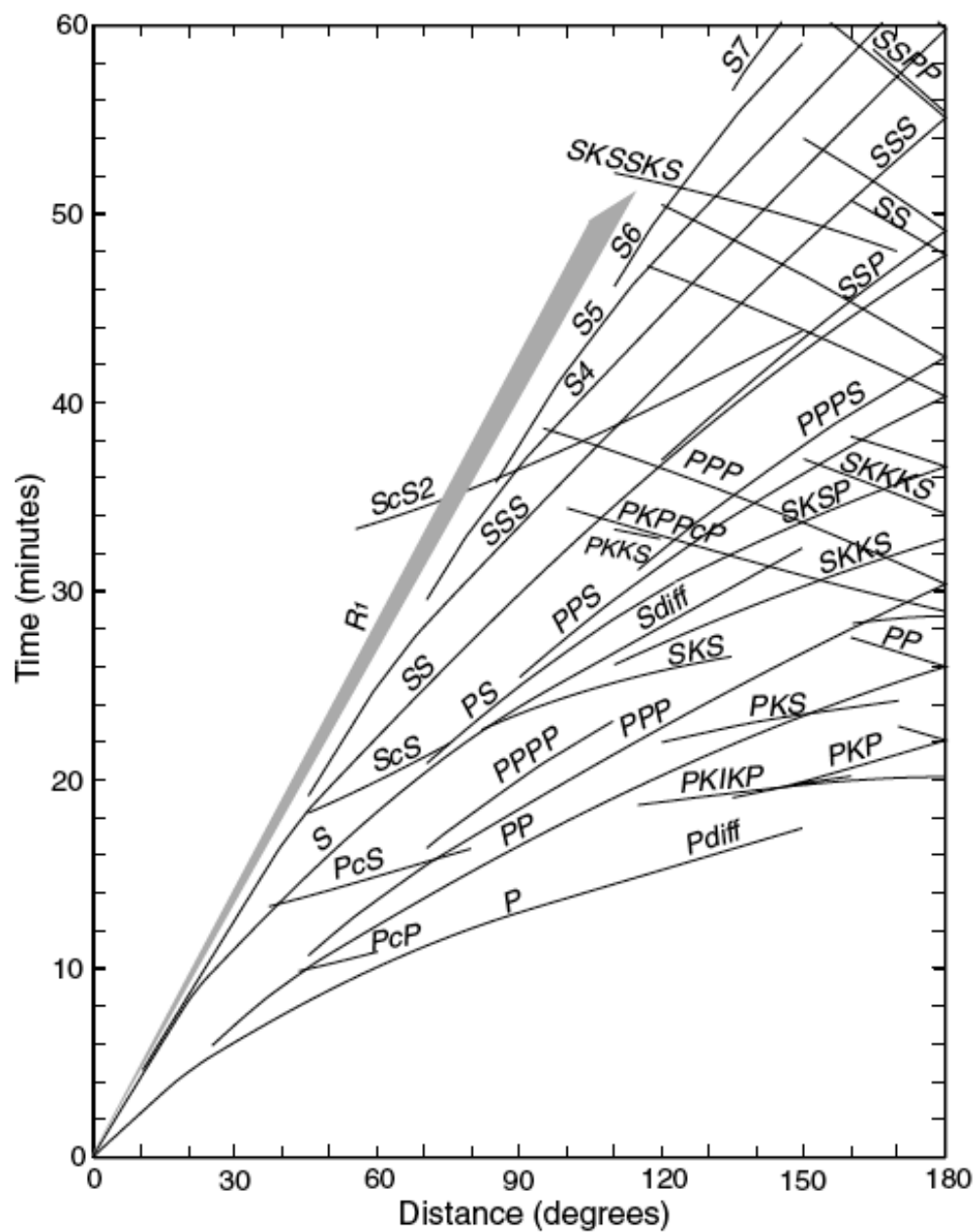
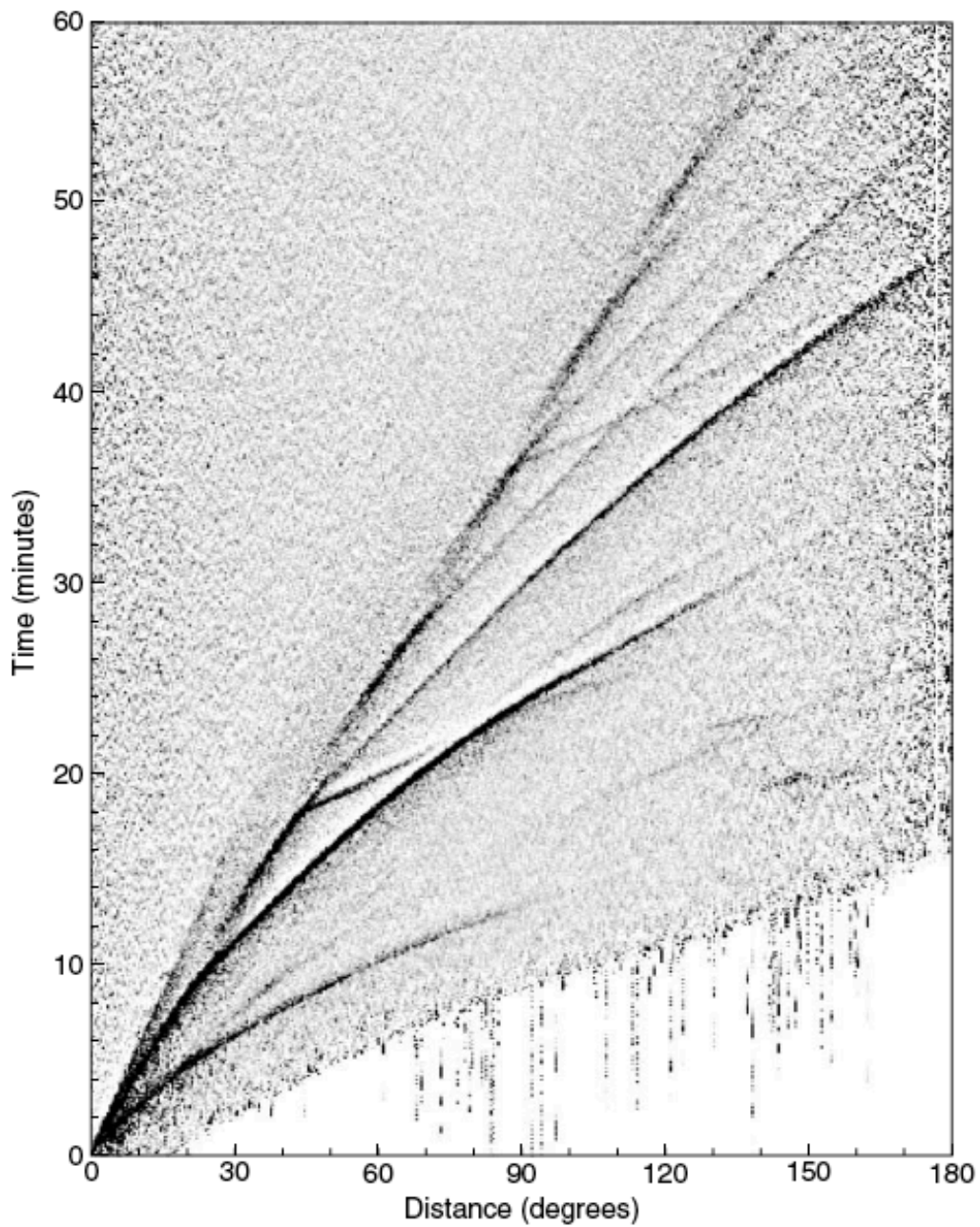
Long-period (vertical)



Long-period (radial)



Long-period (transverse)



Nomenclatura de fases sísmicas (I) (convenio internacional)

GENERALIDADES: ONDAS INTERNAS (I)

P: ondas longitudinales por corteza y manto. De 'prima' en latín, o primer arribo. (Borne, 1904)

S: ondas transversales por corteza y manto. De 'secunda' en latín, o segundo arribo. (Borne, 1904)

T: ondas que viajan por la capa sónica del océano. De 'tercia' en latín, o tercer arribo. (Borne, 1904)

K: ondas longitudinales (P) por núcleo externo. De 'kern', núcleo en alemán. (Sohon, 1932;
Bastings, 1934)

I: ondas longitudinales (P) por núcleo interno. (Jeffreys y Bullen, 1940)

J: ondas transversales (S) por núcleo interno. (Bullen, 1946)

Letras minúsculas y números

p: ondas longitudinales en el tramo desde la fuente a la superficie libre sobre la misma. (Scrase, 1931;
Stechshulte, 1932)

s: ondas transversales en el tramo desde la fuente a la superficie libre sobre la misma. (Scrase, 1931;
Stechshulte, 1932)

[en ciertas investigaciones 'p' y 's' se usan para indicar fases convertidas en capas intermedias]

letras minúsculas: cuando son distintas de 'p' y 's' especifican la parte de la Tierra donde se encuentra el punto de retorno de la fase (refracción) o donde se refleja de vuelta a la superficie (reflexión).

X (nº entero) tras P ó S: número de reflexiones en la superficie libre (p.ej., PPP ≡ P3).

Nomenclatura de fases sísmicas (2) (convenio internacional)

GENERALIDADES: ONDAS INTERNAS (2)

Fases locales y regionales: letras minúsculas

- g:** ondas contenidas en la capa superior de la corteza. De capa 'granítica'. (Jeffreys, 1926)
- b:** ondas contenidas en la capa inferior de la corteza. De capa 'basáltica'. (Jeffreys, 1926)
- ***: ondas contenidas en la capa inferior de la corteza. Denominación alternativa. (Conrad, 1925)
- m:** ondas reflejadas en la parte superior del Moho. De 'Mohorovicic', sismólogo yugoslavo.
- n:** ondas refractadas a lo largo del Moho o en la parte superior del manto superior. De fase de manto 'normal'. (Mohorovicic, 1910)

Fases telesísmicas: letras minúsculas

- c:** ondas reflejadas en la parte exterior del CMB (Core-Mantle Boundary). De 'core', núcleo en inglés. (propuesto por Macelwane; Gutenberg, 1925)
- i:** ondas reflejadas en la parte exterior de la discontinuidad núcleo externo-núcleo interno. De 'inner core boundary, discontinuidad del núcleo interno en inglés.
- z:** ondas reflejadas en la discontinuidad a profundidad 'z' (medida en km). Reflexiones externas se le añade '+'; reflexiones internas se le añade '-' (p.ej., P410+P, P660-P).

Llegadas (prefijos)

- i:** llegada impulsiva. De 'impetus', en latín.
- e:** llegada emergente o suave. De 'emersio', en latín.

- Nomenclatura de fases sísmicas (3) (convenio internacional)

GENERALIDADES: ONDAS SUPERFICIALES

- L:** ondas superficiales no especificadas, de periodo relativamente largo, generalmente en su inicio. De 'long' waves, ondas largas en inglés. (Borne, 1904)
- Q:** ondas Love (transversales). De 'Querwellen' en alemán, nombre alternativo a las ondas Love. (Angenheister, 1921)
- R:** ondas Rayleigh (ondas de periodo corto a largo y ondas de manto). De 'Rayleigh', tras el físico británico. (Angenheister, 1921)
- LQ:** ondas Love de periodo largo. Del uso de 'L' y 'Q' (ver más arriba).
- LR:** ondas Rayleigh de periodo largo; usualmente la fase de Airy. De 'Rayleigh', tras el físico británico.
- G:** ondas Love de periodo muy largo, a menudo en la forma de un gran pulso para trayectorias transoceánicas. De ondas 'globales' o de 'Gutenberg' (esto último propuesto por Byerly, dado que fueron inicialmente observadas por Gutenberg y Richter, 1934).
- Lm, Qm, Rm:** ondas de amplitud máxima en el grupo de las ondas superficiales.
- Rx, Gx** (x = 1, 2, ...): trenes de ondas Rayleigh o Love que viajan arcos sucesivos a lo largo del círculo máximo fuente-estación. R1 (o G1), R3 (o G3), ... corresponden al arco directo o menor; R2 (o G2), R4 (o G4), ... corresponden al arco mayor.
- Lg:** ondas canalizadas en la corteza continental, producto de reflexiones múltiples de ondas S en el Moho y la superficie libre, cuyas características son similares a las ondas superficiales. En trabajos de investigación existe una subdivisión más detallada (Lg1, Lg2, Li, Rg). Del uso de 'L' y 'g' (ver más arriba). (Bath, Oliver)

- Nomenclatura de fases sísmicas (5) (convenio internacional)

FASES LOCALES Y REGIONALES

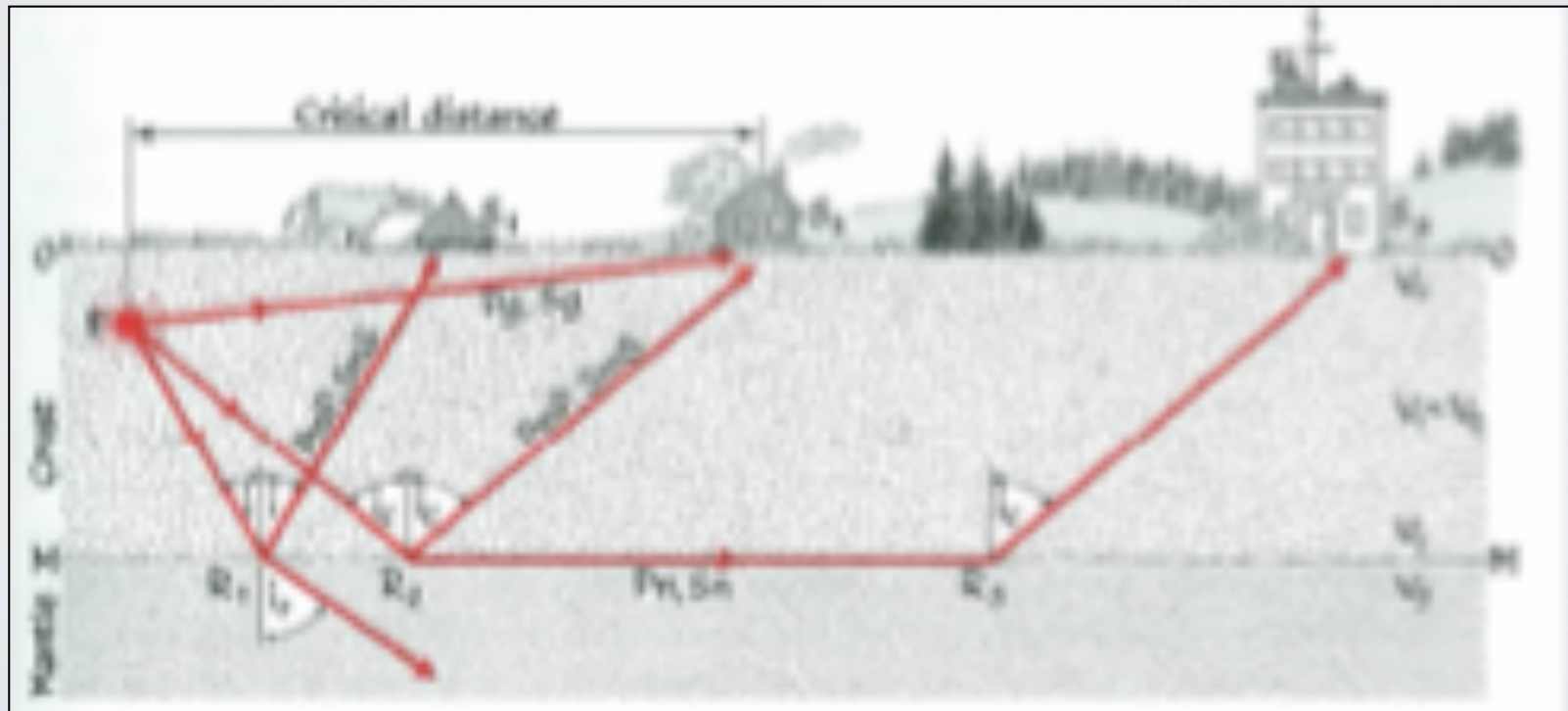
Pg, Sg (o P, S): ondas en la capa superior de la corteza.

Pb, Sb (o P*, S*): ondas en la capa inferior de la corteza.

Pn, Sn: ondas refractadas a lo largo del Moho (ondas inhomogéneas).

PmP, SmS: ondas reflejadas en el Moho.

Lg: ondas canalizadas en la corteza continental, producto de reflexiones múltiples de ondas S en el Moho y la superficie libre.



- Nomenclatura de fases sísmicas (6) (convenio internacional)

FASES TELESÍSMICAS (1)

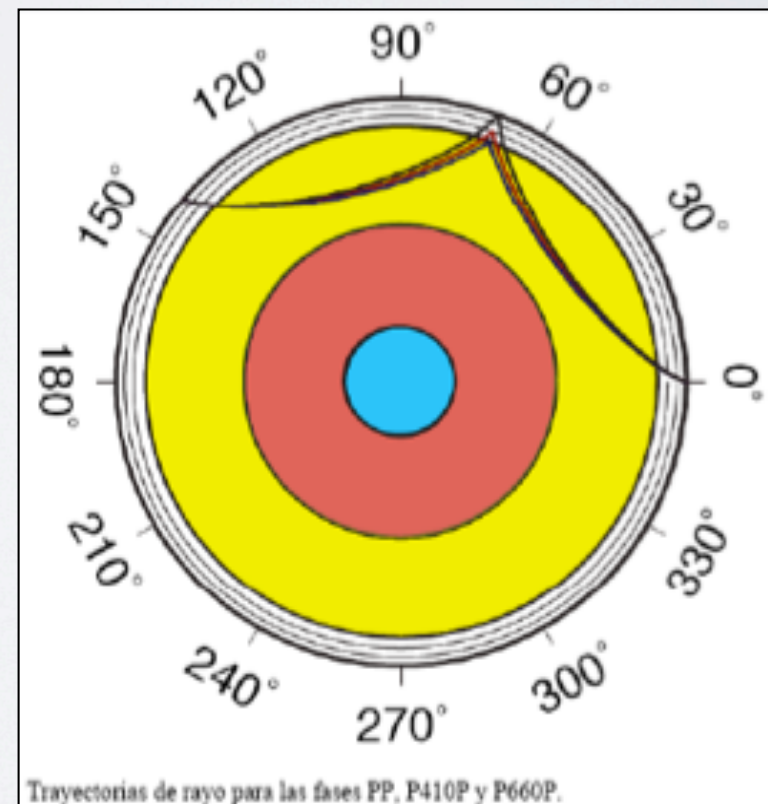
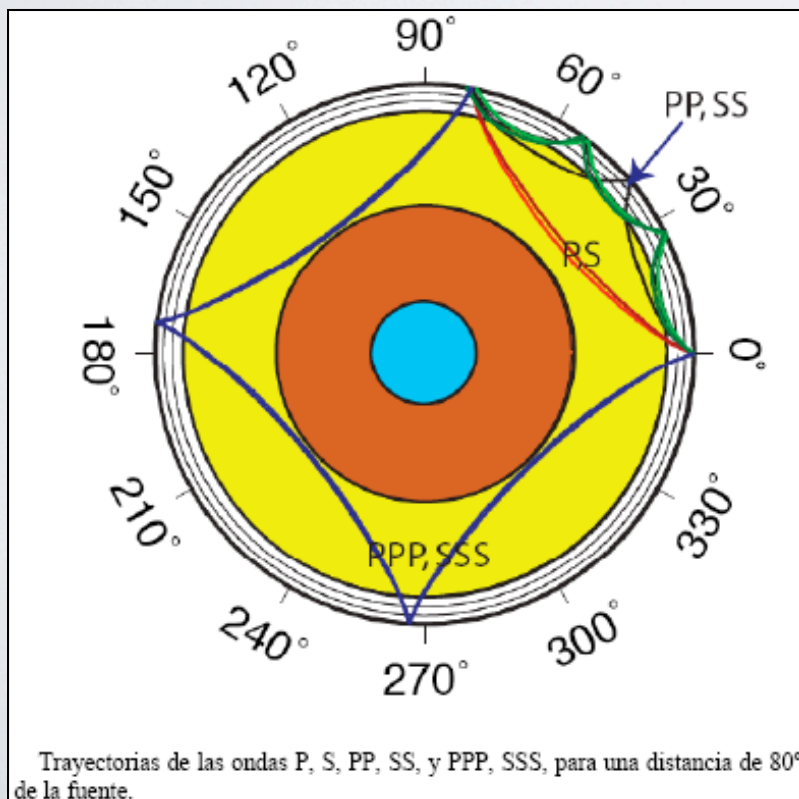
PP, PPP, SS, SSS: ondas P o S reflejadas una o dos veces en la superficie libre.

PS, SP, PPS, SPP, PSPS, PPSS, SPSP, etc.: ondas P o S reflejadas y convertidas en la superficie libre.

PdP, SdS: ondas P o S reflejadas en una discontinuidad a profundidad d (en km) en el manto (p.ej., P410P, P660P). (Bolt, 1970)

PcP, ScS: ondas P o S reflejadas en el CMB.

PcS, ScP: ondas P o S convertidas al reflejarse en el CMB.



- Nomenclatura de fases sísmicas (7) (convenio internacional)

FASES TELESÍSMICAS (2)

Pc, Sc: ondas P o S difractadas alrededor del núcleo externo.

PKP (o P'): ondas P que pasan a través del núcleo externo sin identificación detallada.

SKS: ondas S a través del manto que pasan a través del núcleo externo como ondas P.

SKP: ondas S convertidas en ondas P al refractarse en el núcleo externo.

PKS: ondas P convertidas en ondas S al refractarse del núcleo externo al manto.

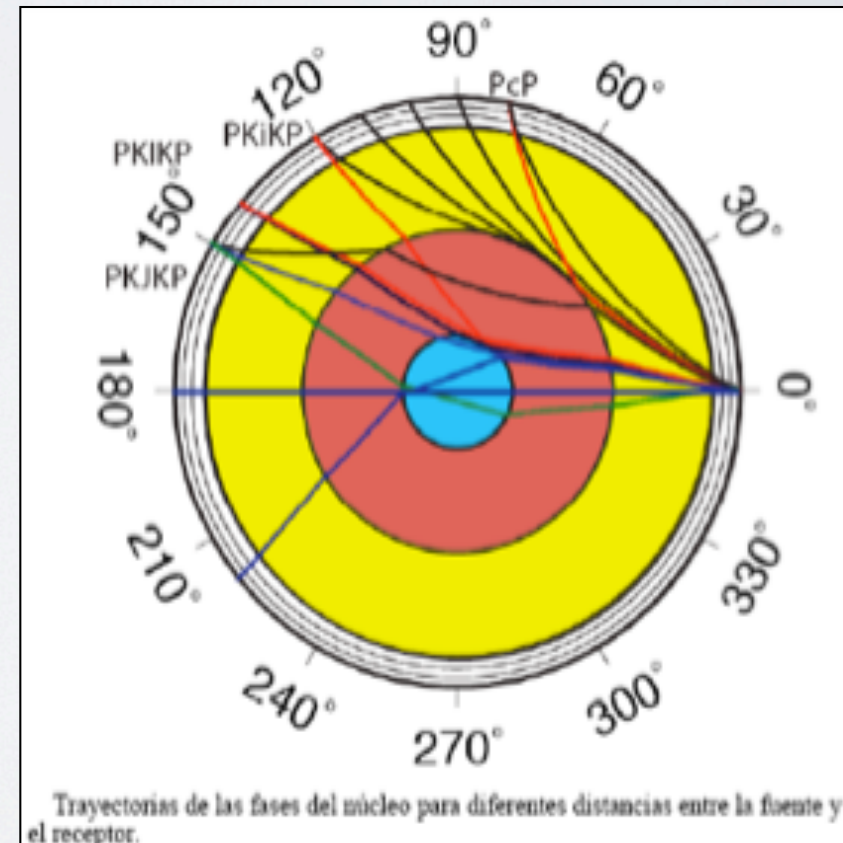
[clasificación equivalente para otras secuencias de reflexión y conversión: SKKP, PcPP, ScSScS, etc.]

PKKP (PK2P): ondas P reflejadas en la superficie interna del CMB.

SKKS (SK2S): ondas S convertidas en ondas P al refractarse en el núcleo externo, reflejadas en la superficie interna del CMB y vueltas a convertir a S al salir del núcleo al manto.

PKiKP: ondas de núcleo (P) reflejadas en la discontinuidad del núcleo interno.

PKPPKP (P'P'): ondas PKP reflejadas en la superficie libre que pasan dos veces por el núcleo.



- Nomenclatura de fases sísmicas (8) (convenio internacional)

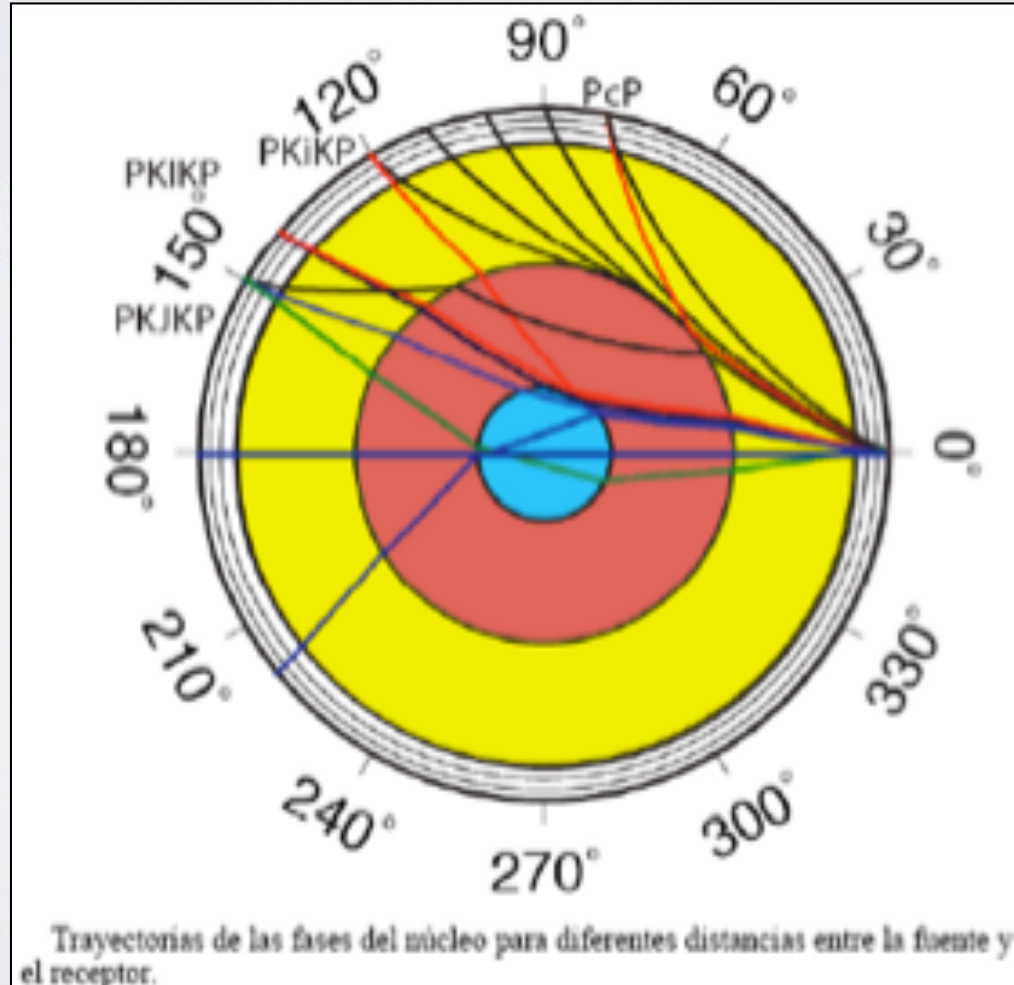
FASES TELESÍSMICAS (3)

PKIKP (o **P'**): ondas de núcleo (P) que atraviesan el núcleo interno como ondas P.

PKhKP: ondas de núcleo (P) por reflexiones o dispersión que llegan antes de la PKIKP.

PKJKP: ondas de núcleo (P) que atraviesan el núcleo interno como ondas S.

PKjP: ondas P reflejadas $j-1$ veces en la superficie interior del CMB.



- Nomenclatura de fases sísmicas (9) (convenio internacional)

FASES PROFUNDAS

pP, pPKP, sP, sPP, etc.: ondas P o S reflejadas en la superficie libre sobre la fuente como ondas P.

pS, pSKS, sS, pSS, etc.: ondas P o S reflejadas en la superficie libre sobre la fuente como ondas S.

