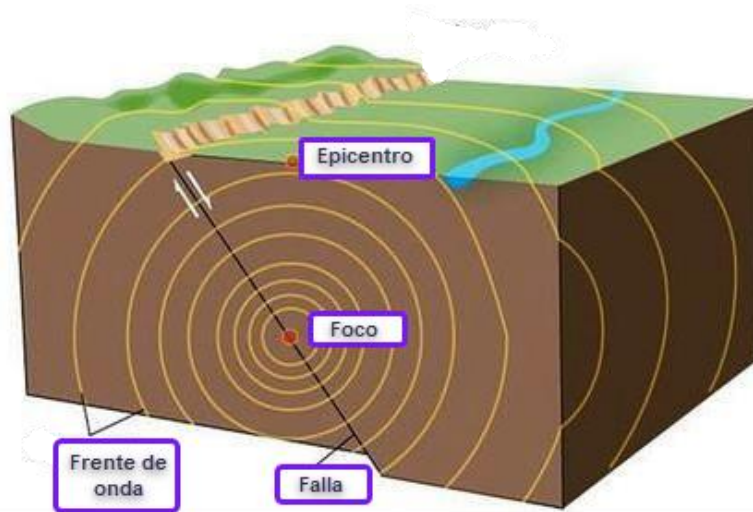


Sobre las ondas sísmicas y la detección temprana

El movimiento de las placas en la falla produce “**ondas**” que comienzan a viajar desde esa zona en todas direcciones. Cuando uno habla de ondas que viajan por la tierra, estas se refieren a movimientos rápidos (vibraciones) de las partículas del suelo o de la roca: al haber un movimiento rápido, las partículas tienen una velocidad y una aceleración (y para los ingenieros, también esfuerzos cortantes). Esta perturbación viaja con una cierta velocidad y, por lo tanto, le toma un tiempo al suelo en comenzar a moverse. La perturbación es en realidad una esfera cuyo radio aumenta con el tiempo. A la superficie de la esfera se la llama **frente de onda** (“wavefront”)

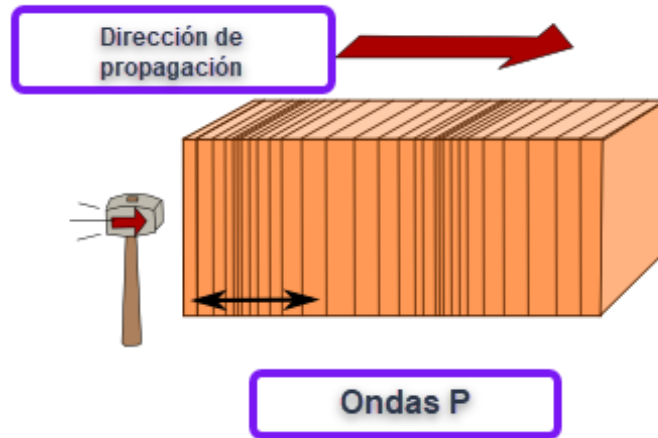


Las partículas del suelo o de la roca pueden moverse en tres direcciones: en la dirección de la onda (el eje que va desde el foco al sitio de la estructura) y en las dos direcciones perpendiculares a este eje.

Las ondas que mueven las partículas en la misma dirección de la onda (se puede pensar en el movimiento de un gusano para visualizarlo) se llaman **ondas P** (o **Primarias**, **Longitudinales**, o de **Compresión**). Las que causan el movimiento transversal se llaman **ondas S** (o **Secundarias**, **Transversales** o de **Corte**). Las ondas **P** viajan más rápido que las **S**, típicamente 1.6 veces más rápido (para los ingenieros, el verdadero número depende de la razón de Poisson del material ν y es igual a $\sqrt{2(1+\nu)}$). Cuando viajan por granito, la velocidad de las ondas **P** y **S** es muy alta, del orden de 5,500 m/s (12,300 millas por hora) para las ondas **P**. Las ondas **P** se llaman Primarias porque llegan primero al sitio, pero tienen menos energía (el movimiento del suelo va a ser menor).

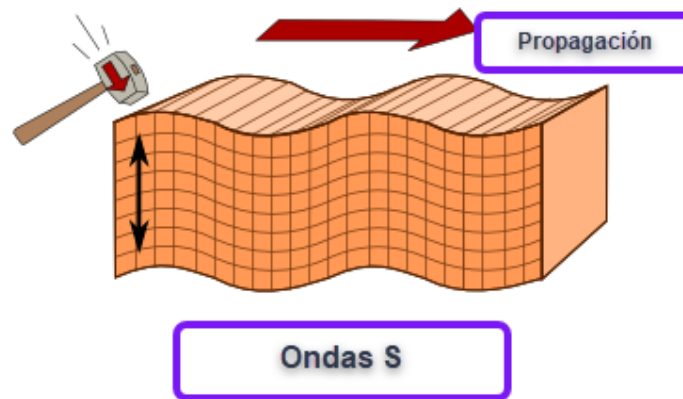
Cuando ocurre un sismo lo primero que notamos es un movimiento de arriba hacia abajo; esto significa que llegaron las ondas **P** (las que viajan más rápido). Este movimiento, sin embargo, no es muy fuerte.

Cuando viajan por el aire las ondas **P** son las que transmiten el sonido y por esta razón hay mucha gente que reporta que “escucha” cuando llega un sismo (no debe confundirse con el ruido producido por el movimiento del contenido de la casa o edificio). También se argumenta que los perros pueden sentir la llegada de las ondas **P** mucho más que los humanos y comienzan a agitarse y a ladrar (pero aún no hay una prueba científica irrefutable de esto).



En el siguiente enlace hay una animación en YouTube de estas ondas creada por Wolfram Research, la compañía que produce el programa *Mathematica*:

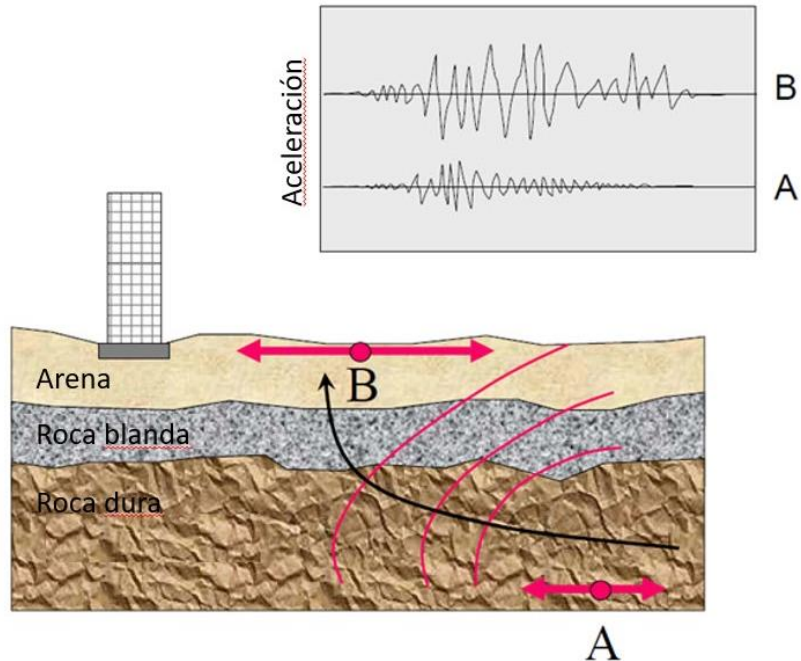
<https://youtu.be/2rYjIVPU9U4>



En esta dirección de YouTube hay una animación del movimiento causado por las ondas **S**:

<https://youtu.be/2rYjIVPU9U4>

Las ondas sísmicas no siempre viajan en línea recta: esto ocurre solo si el material es uniforme. Si las propiedades de la roca o suelo cambian, la línea recta cambia de pendiente (para los ingenieros, este cambio de dirección se conoce como “refracción”). Al atravesar capas de suelo cada vez más blandos la dirección de viaje se hace cada vez más **vertical** (como muestra la figura de abajo), la velocidad de las ondas **disminuye** y el movimiento (en particular, la aceleración de las partículas) **aumenta**: esto puede causar un serio problema y debe ser tenido en cuenta, pero eso es material para otra nota. Los códigos lo tienen en cuenta aproximadamente clasificado los suelos como A, B, C, D, E, y F.



Si tomamos el caso del sismo del 7 de enero de 2020, la distancia entre un punto en el Viejo San Juan y el epicentro es aproximadamente 93 km. El tiempo t_{arribo} que le lleva a las ondas **P** en llegar a este lugar sería:

$$t_{arribo-P} = \frac{5.5 \text{ km/s}}{93 \text{ km}} = 16.9 \text{ segundos}$$

Por supuesto, este cálculo supone que el material entre los puntos es el granito que consideramos, y aún dentro del granito la velocidad varía, pero nos sirve para dar una idea. Además, se supone que no hay cambio en la dirección en que viajan las ondas.

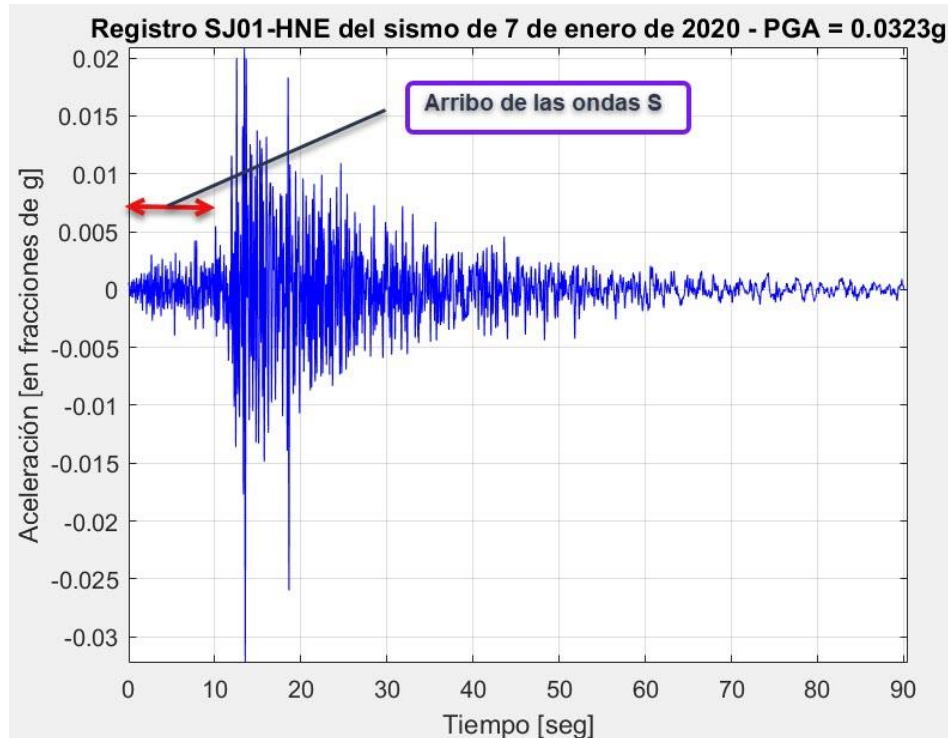
Si repetimos el cálculo con las ondas **S**, debemos usar la velocidad de estas ondas que sería aproximadamente 3.44 km/seg y el tiempo de arribo sería:

$$t_{arribo-S} = \frac{3.44 \text{ km/s}}{93 \text{ km}} = 27 \text{ segundos}$$

Si restamos ambos tiempos la diferencia entre los arribos de la onda **P** y **S** debería ser aproximadamente:

$$t_{arribo-S} - t_{arribo-P} = 27 - 16.9 = 10.1 \text{ segundos}$$

Vamos a comprobar esto usando el registro sísmico medido por el PRSMP de Ingeniería Civil del RUM en el Instituto de Neurobiología en el Viejo San Juan. La siguiente figura muestra que primero llegan las ondas **P** (en $t = 0$) y aproximadamente 10 segundos después llegan las ondas **S** y es entonces que comienza el movimiento fuerte que sintieron los residentes del área.

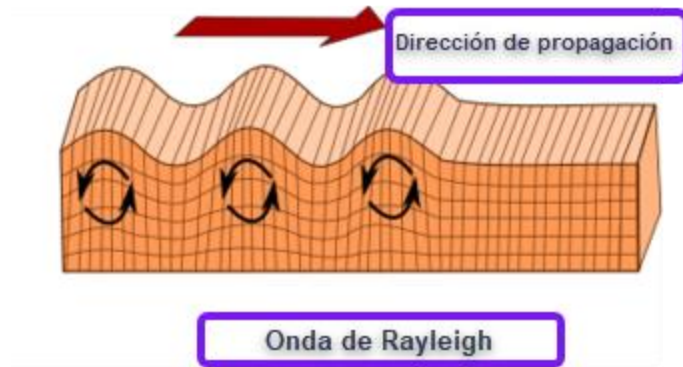


Esta diferencia en el tiempo de arribo de las ondas **P** y **S** se usa en algunos sitios como base de lo que se conoce como *Sistemas de Alerta Temprana* ("early warning systems"). Por ejemplo, estos sistemas se han instalado en países como Japón y Taiwán, en lugares como el sur de California y en ciudades como el Distrito Federal de México y Vancouver, Canadá, entre otros. Unos sensores detectan el movimiento de las ondas **P** y envían un aviso de sismo que permite, por ejemplo, detener trenes rápidos, activar válvulas de cierre de gasoductos, apagar centrales eléctricas, y también avisar a la población.

El problema de estos sistemas es que para que funcionen, el epicentro debe estar suficientemente alejado del sitio en donde se quiere emitir la alarma. En el caso de la Ciudad de México, los sensores están pensados para avisar cuando ocurre un sismo con un epicentro aproximadamente a 320 km de distancia hacia la costa del Pacífico. Se argumenta que este sistema permitirá advertir a la población al menos 40 segundos antes de la llegada del sismo. El aviso se da mediante ondas de radio las cuales viajan a 300,000 km/seg (la velocidad de la luz), o sea muchísimo más rápido que las ondas sísmicas.

Surge de inmediato la pregunta: ¿se puede aplicar este sistema en Puerto Rico, si el costo no fuera un impedimento? El inconveniente es que, por las dimensiones de la Isla, el tiempo de aviso va a ser muy corto. En el caso del ejemplo que hemos visto, la ciudad de San Juan y el sismo en el suroeste del 7 de enero, el tiempo de aviso sería de aproximadamente 10 segundos. Esto podría tal vez usarse para detener los generadores de las centrales eléctricas como la de Palo Seco, pero da muy poco tiempo para que los habitantes evacúen edificios o casas que se sabe que poseen deficiencias estructurales.

Para concluir, se debe mencionar que hay otro tipo de ondas, además de las **P** y **S**. Estas otras ondas se llaman *superficiales* porque solo viajan cerca de la superficie libre del terreno. Las más conocidas (pero no las únicas) son las **ondas de Rayleigh**. Se *especula* que los animales son muy sensibles a estas ondas y esto hizo que durante el Gran Tsunami del Océano Índico del 2004 huyeran hacia las zonas altas (el tsunami viajaba mucho más lento que estas ondas). Nuevamente, no hay prueba científica de esto.



Las ondas de Rayleigh se pueden crear artificialmente dando un golpe fuerte al terreno libre y son muy útiles para hacer ensayos geofísicos en el campo porque permiten determinar las características del suelo en un sitio determinado. En el Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura se ha implementado esto en muchas ocasiones y se siguen realizando estos estudios (para los ingenieros, uno de esos ensayos geofísicos se conoce como *SASW: Spectral Analysis of Surface Waves*).

En el siguiente enlace de YouTube hay una animación de estas ondas. Puede comprobarse que el movimiento es similar al que se siente cuando se está en un bote en el mar abierto:

<https://youtu.be/6yXgfYHAS7c>

