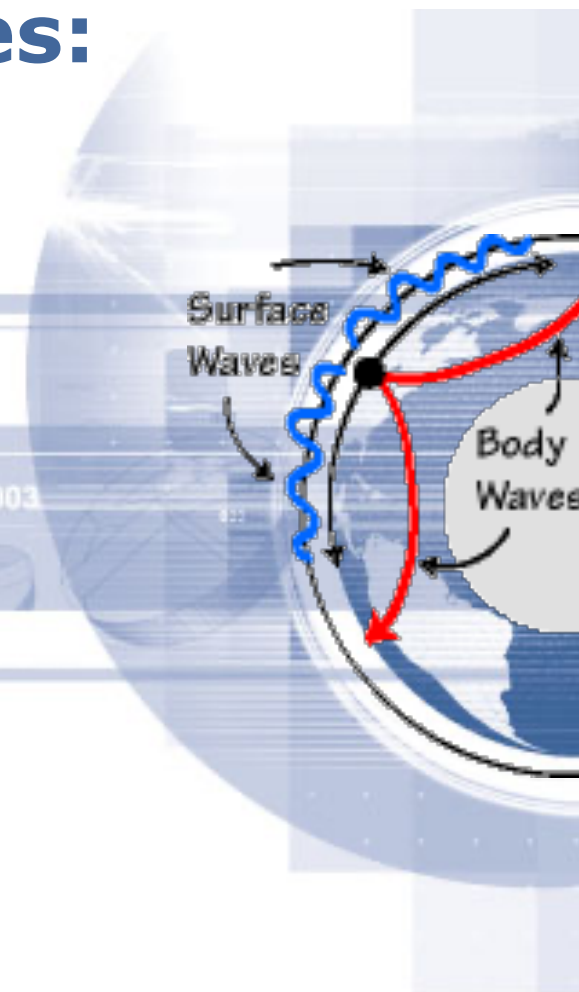


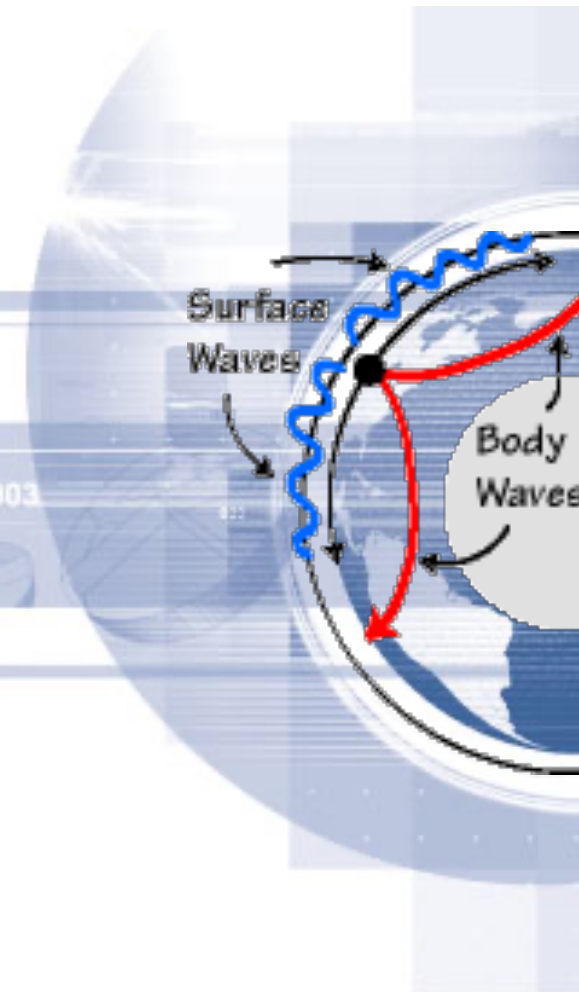
# Métodos de Ondas Superficiales: sus ventajas y desventajas, y algunas comparaciones con otros métodos

Felipe Leyton  
Centro Sismológico Nacional  
Universidad de Chile

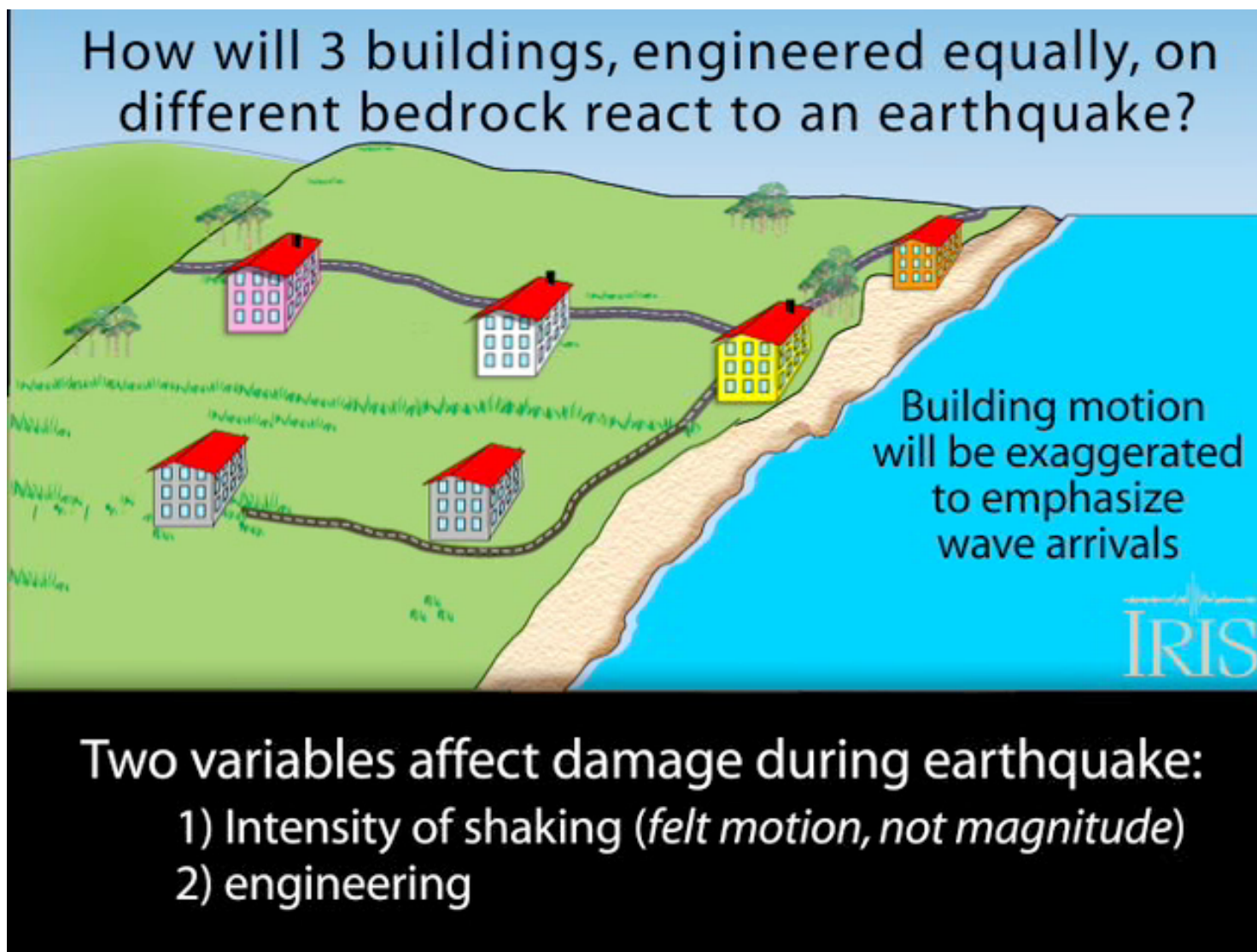


# Hoja de Ruta

- Efecto de sitio y ondas superficiales
- Del procedimiento
  1. Terreno
  2. Datos
  3. Curva de dispersión (métodos)
  4. Inversión
- Algunos ejemplos
- Comentarios finales

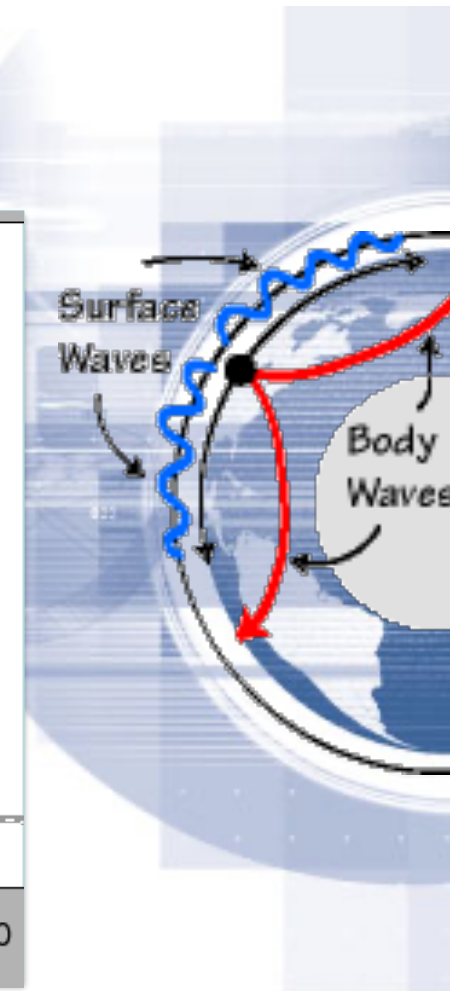
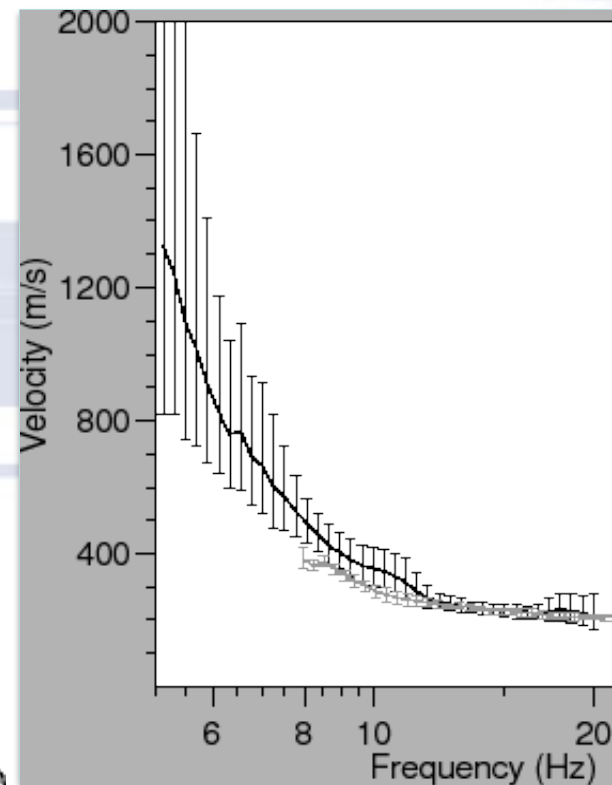
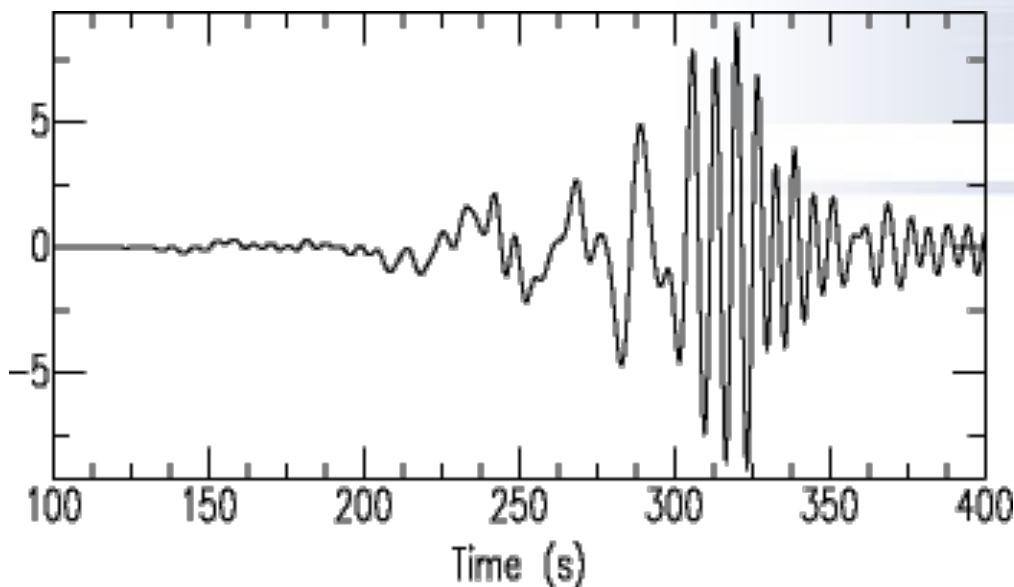


# Efecto de Sitio



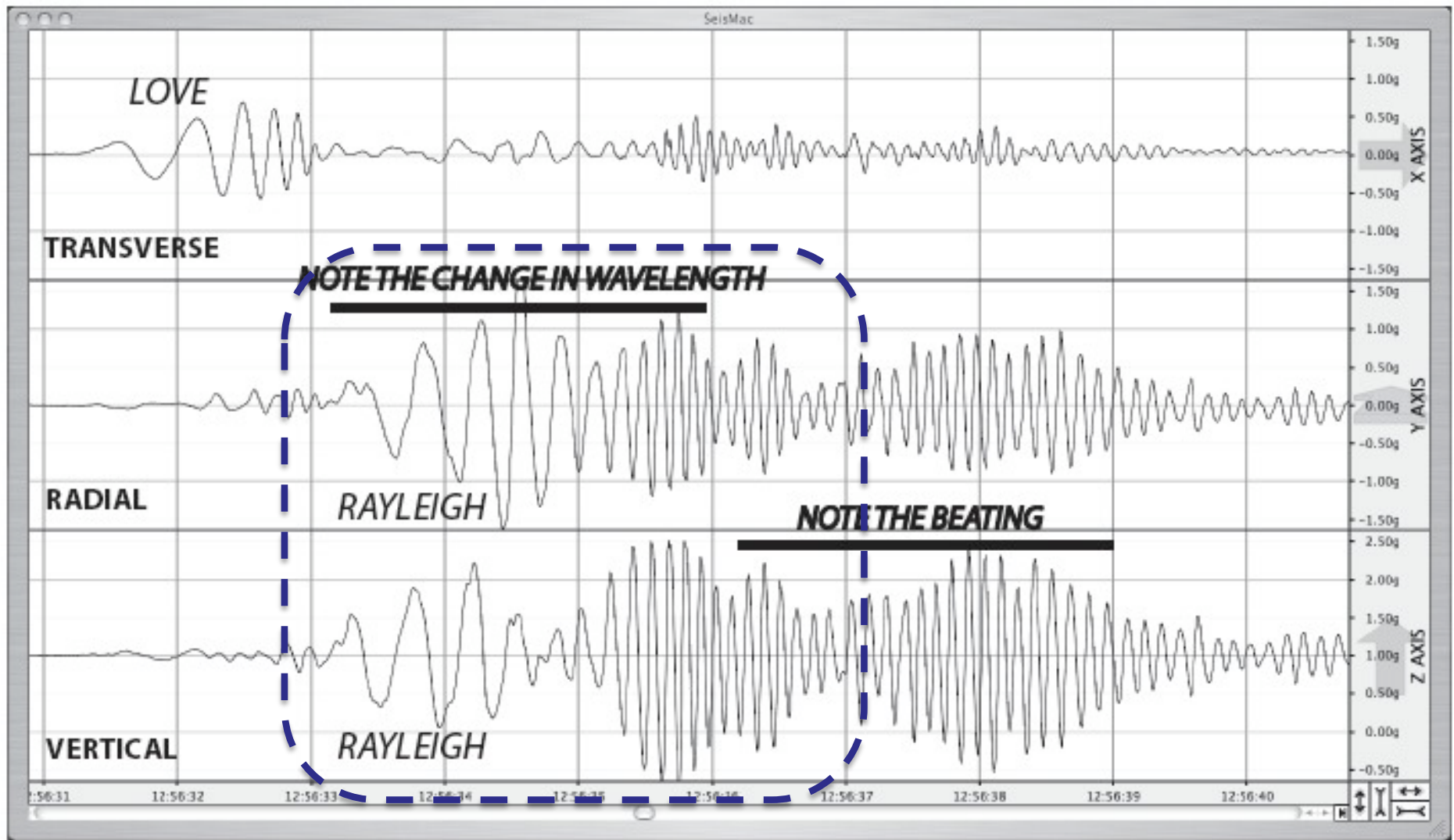
# De las ondas superficiales

- Ondas sísmicas
- Ondas superficiales son dispersivas
- Efectos en sismogramas



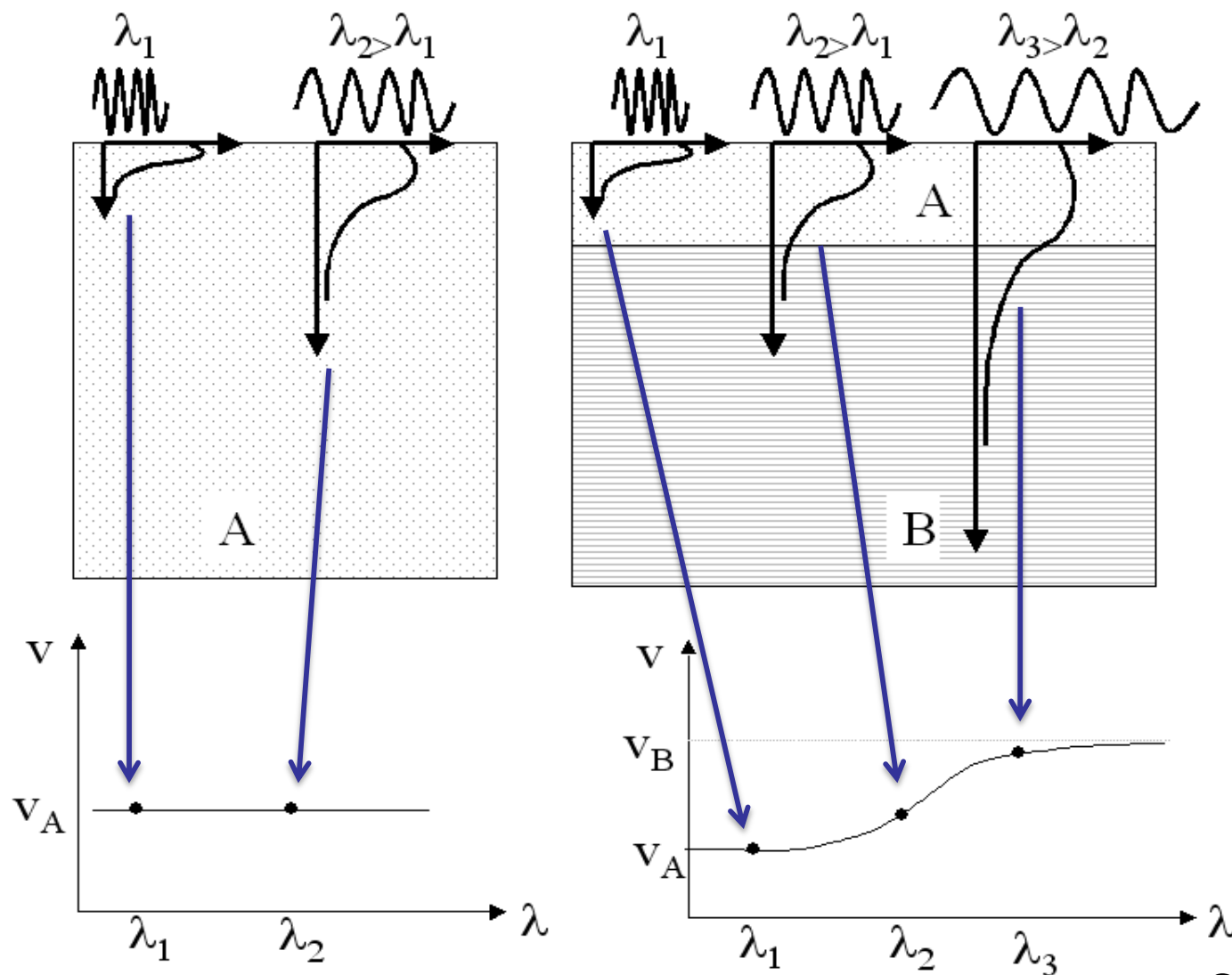


# Sobre la dispersión



Wyssesion (2010)

# Otro aspecto interesante



$$c = \lambda / f$$

Strobbia (2010)

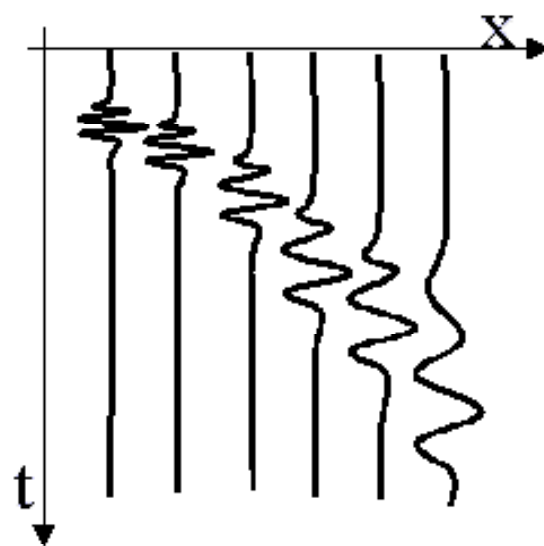
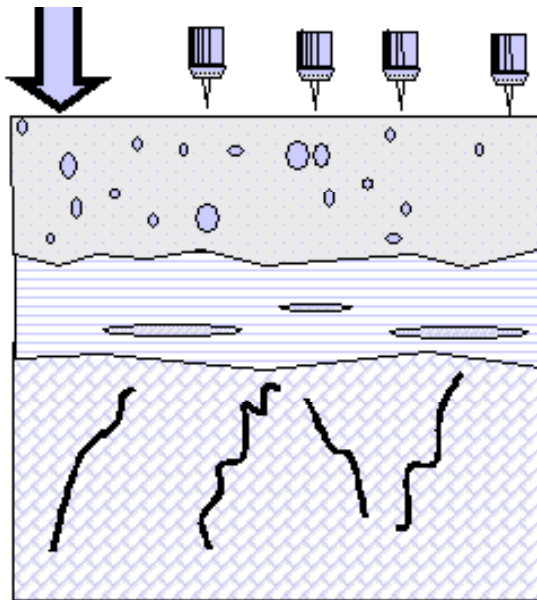
# Filosofía

1. Terreno

2. Los datos

3. Curvas de dispersión

4. Inversión



|               |
|---------------|
| $H_1, V_{S1}$ |
| $H_2, V_{S2}$ |
| $H_3, V_{S3}$ |

Strobbia (2010)



# 1. Del terreno

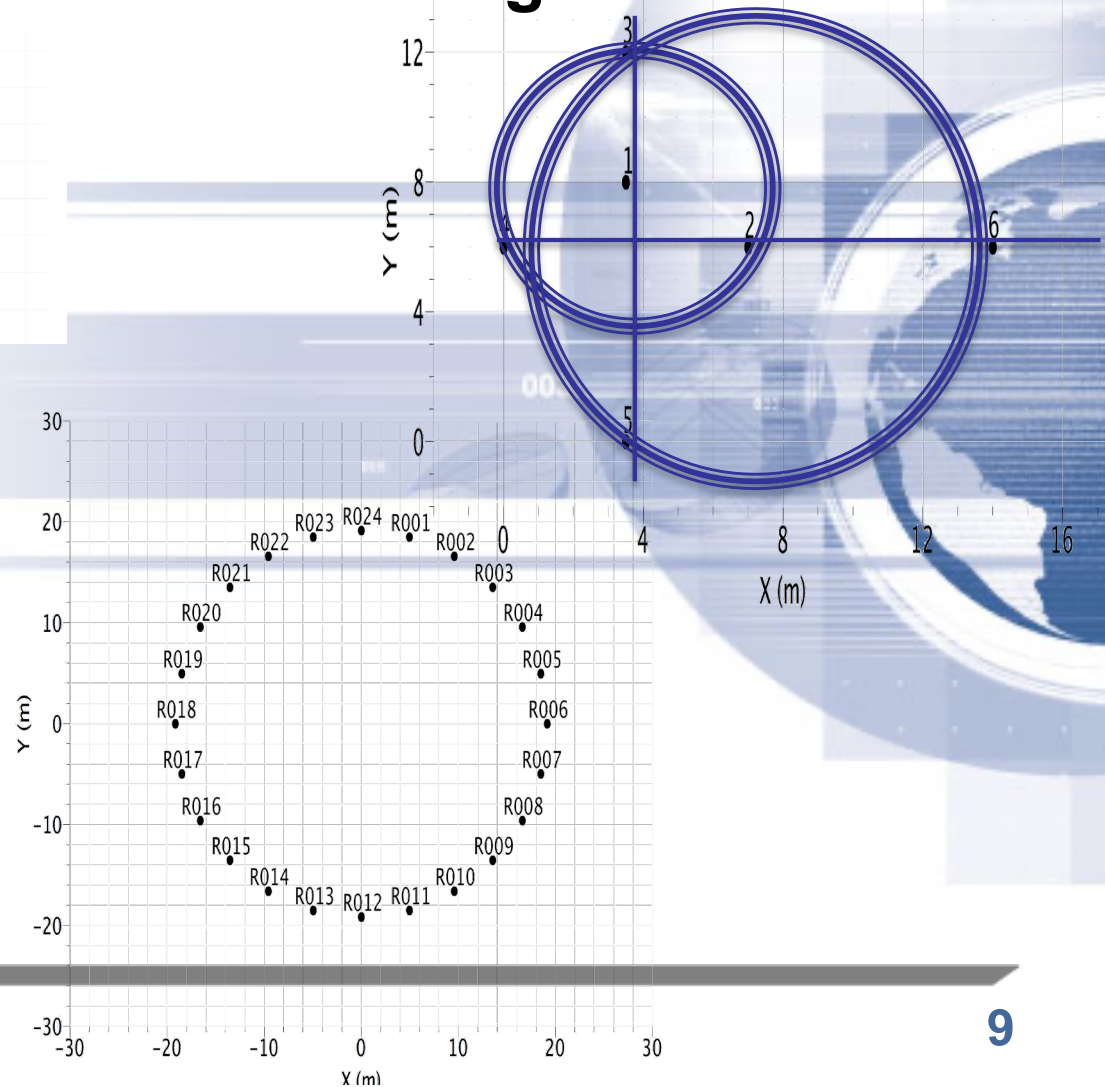


# 1. Del terreno

## Arreglos 1D



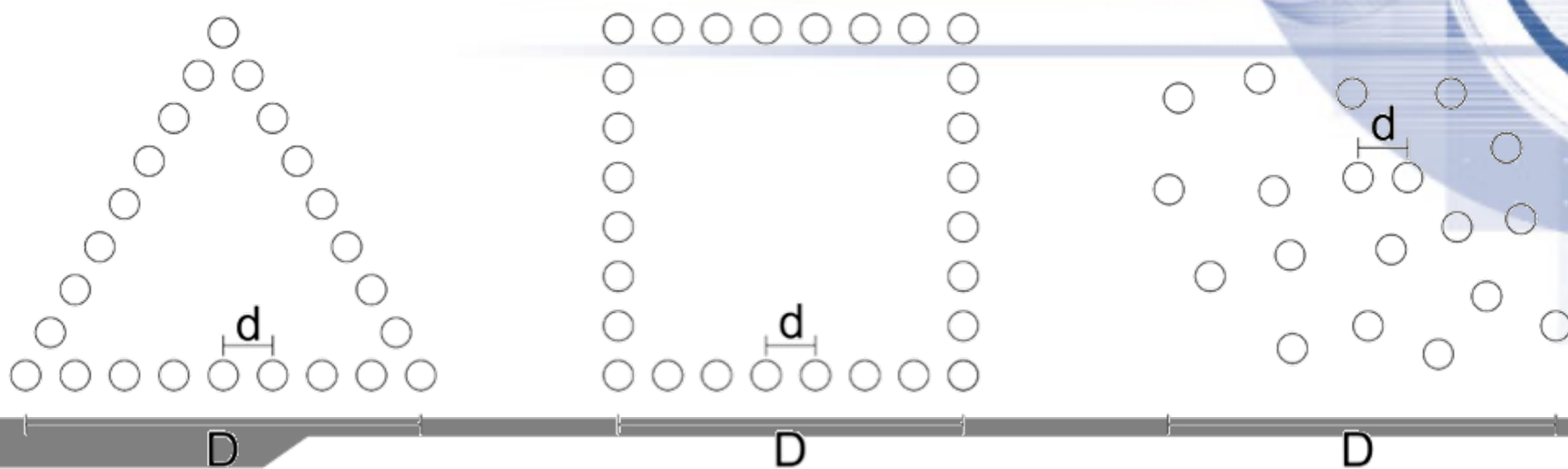
## Arreglos 2D



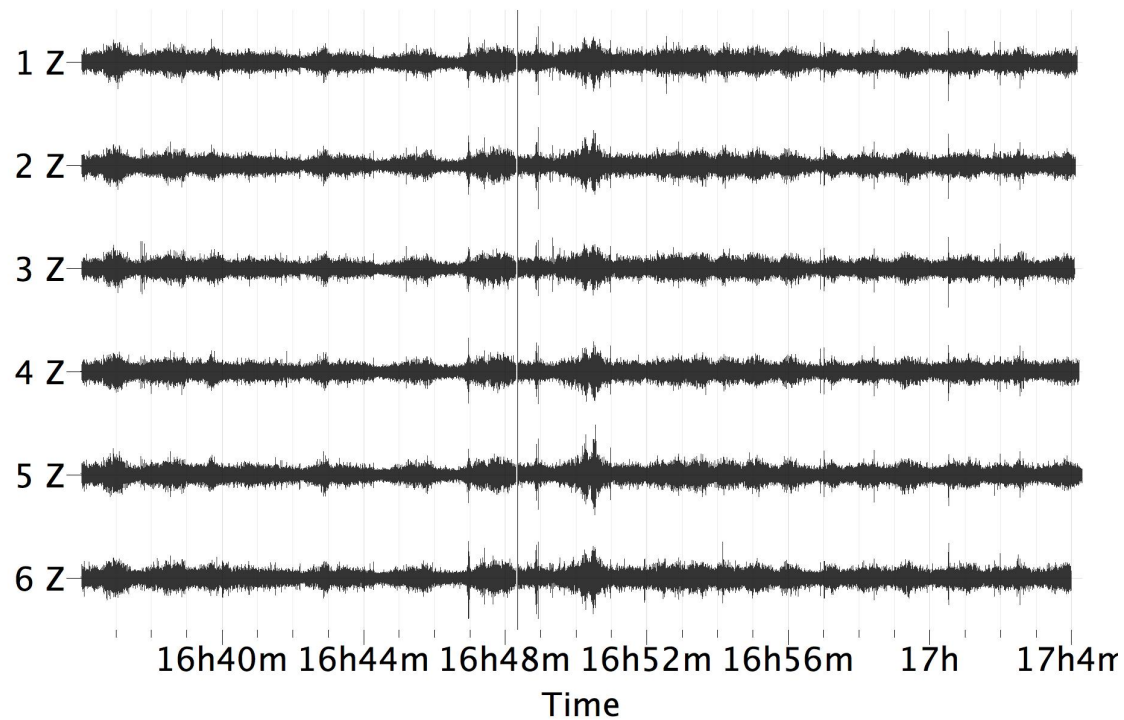
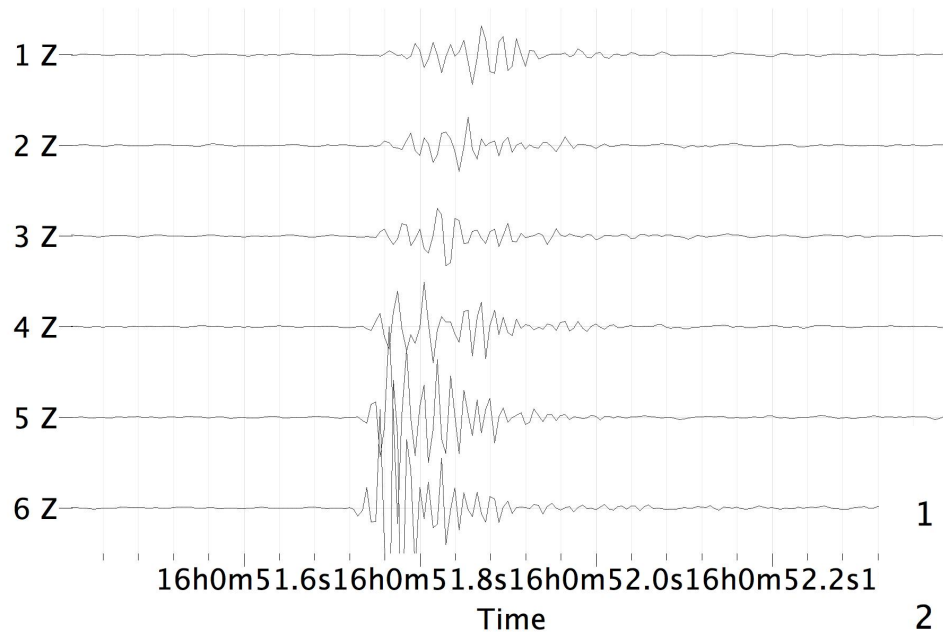


# 1. Del terreno

- Los arreglos poseen 2 dimensiones relevantes:
  - Distancia máxima  $D$  -> define la penetración en profundidad
  - Distancia mínima  $d$  -> define la resolución de la parte superficial
- Es importante diseñar el arreglo para investigar el sitio de manera apropiada



## 2. Los datos



# Para obtener las curvas de dispersión

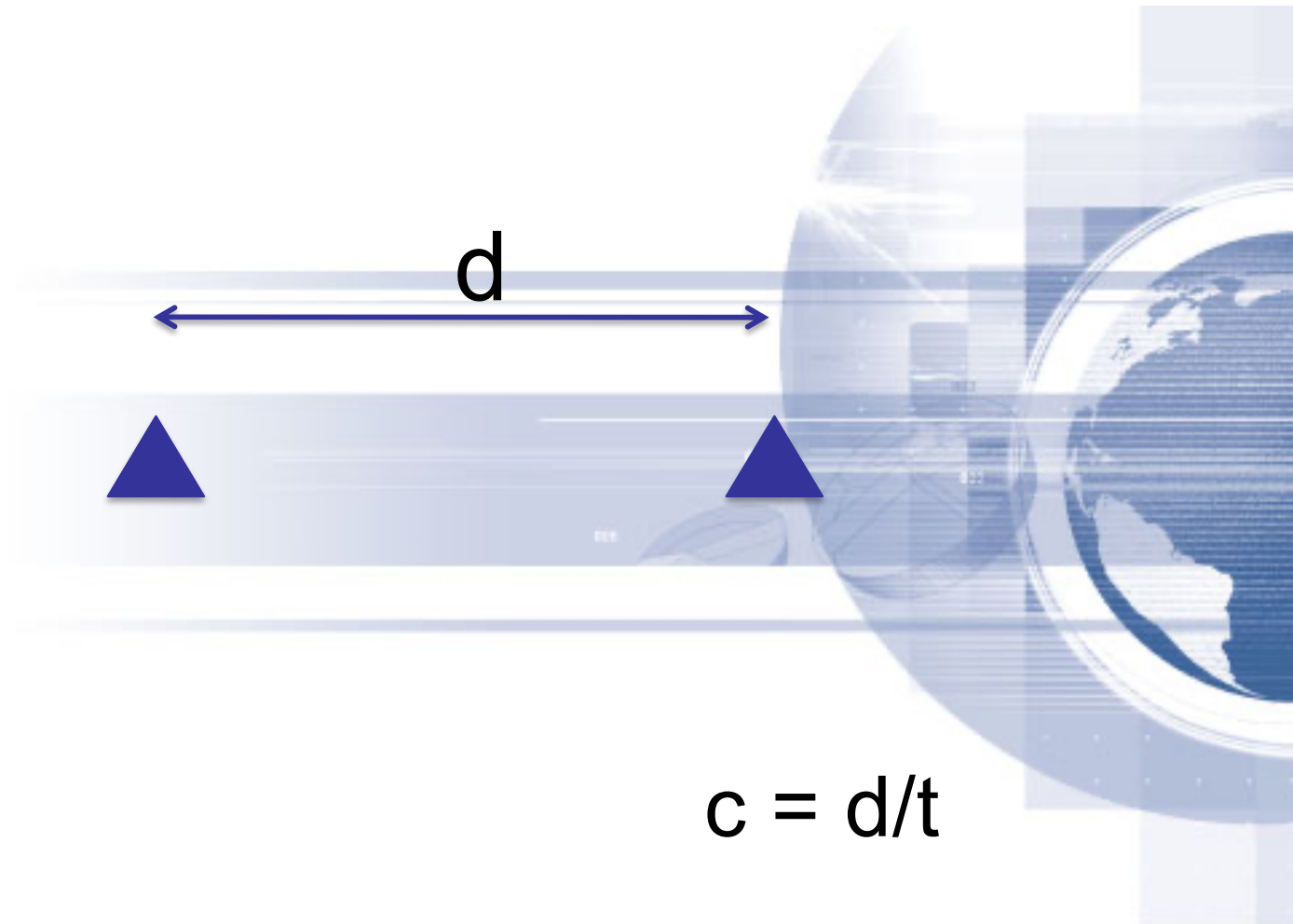
- Métodos de análisis más comunes:
  - FK (Lacoss et al., 1969; Capon, 1969)
  - ReMi (Louie, 2001)
  - SPAC (Aki, 1957; Chávez-García et al., 2005)
  - SASW / MASW (Park et al., 1999)
- Algunos son de amplitudes y otros de fase
- Algunos pueden ser pasivos y/o activos
- Algunos se usan en 1D y/o 2D

# De los métodos

| Método | Fase | Amplitud | Activo | Pasivo | 1D | 2D |
|--------|------|----------|--------|--------|----|----|
| FK     |      | X        | X      | X      |    | X  |
| ReMi   |      | X        | X      | ?      | X  |    |
| SPAC   | X    |          |        | X      | ?  | X  |
| SASW   | X    |          | X      |        | X  |    |
| MASW   |      | X        | X      | X      | ?  | X  |



# De los métodos 1D



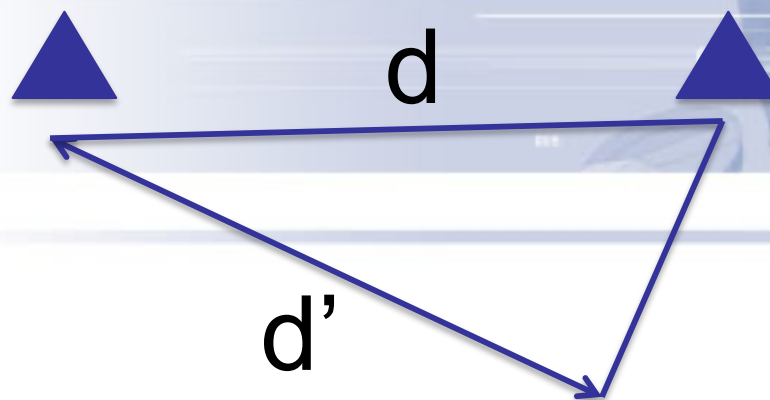
# De los métodos 1D

$$c = d'/t'$$

$$t' < t, \text{ pues } d' < d$$

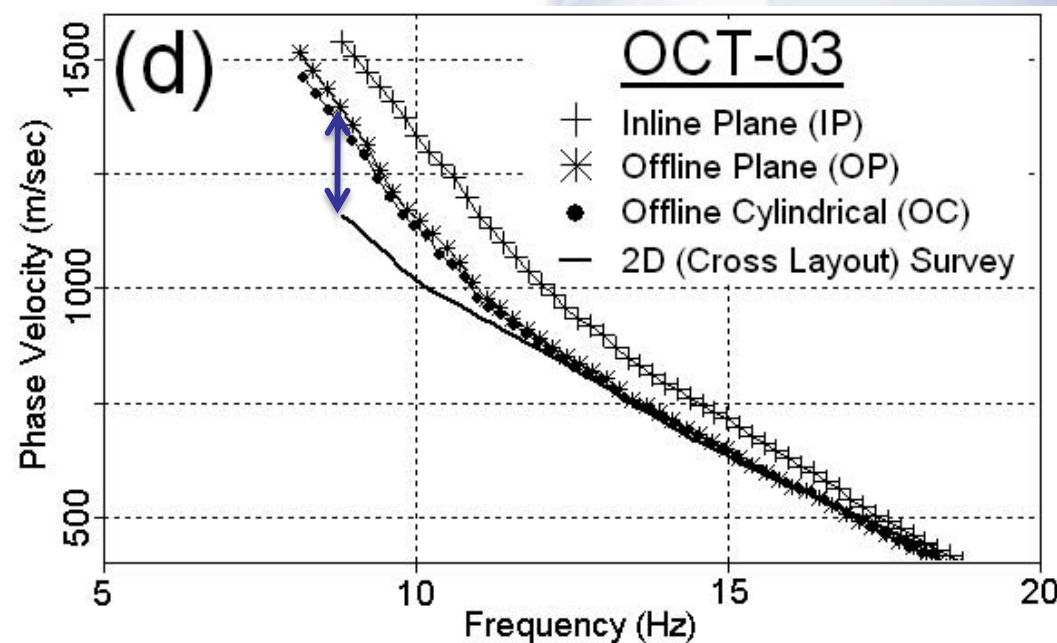
Pero, observamos

$$d/t' = c^* > c$$



# De los métodos 1D

- Se presentan resultados de medidas en 1D (línea) y 2D
- Es posible ver la diferencia en la estimación en bajas frecuencias
- Métodos 1D pasivos son no-conservadores

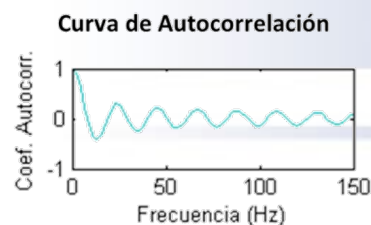
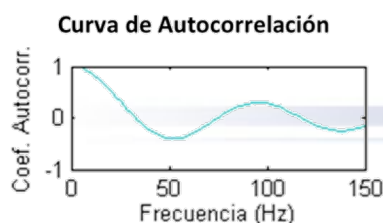
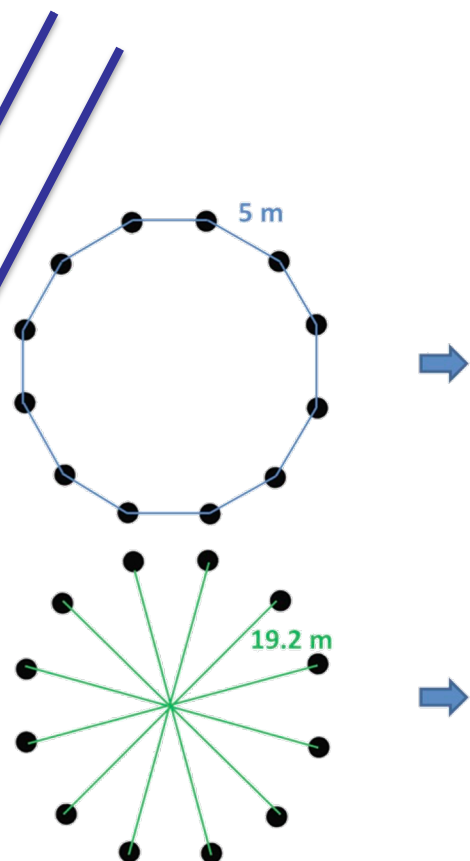


Park and Miller (2008)

# Métodos 2D

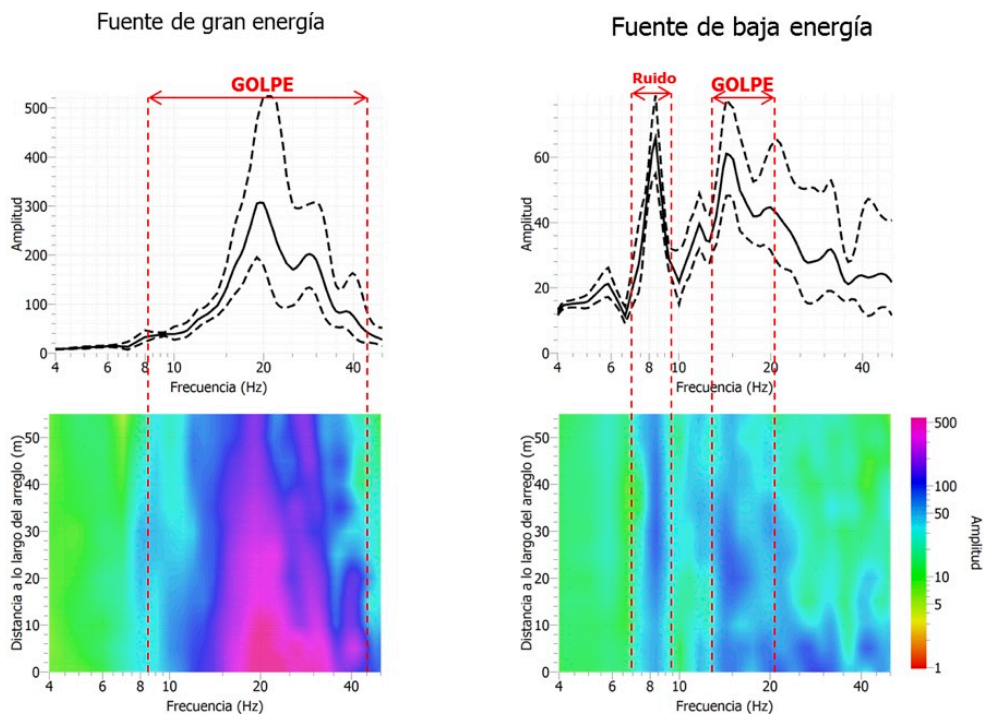
- Uno de los métodos más importantes es **SPAC**
- Viene de calcular el promedio de una onda plana en un círculo
- Ello se puede modelar como una función de Bessel de orden 0
- La variable es una combinación de frecuencia y radio entre sensores:

$$\omega c(\omega)/r$$



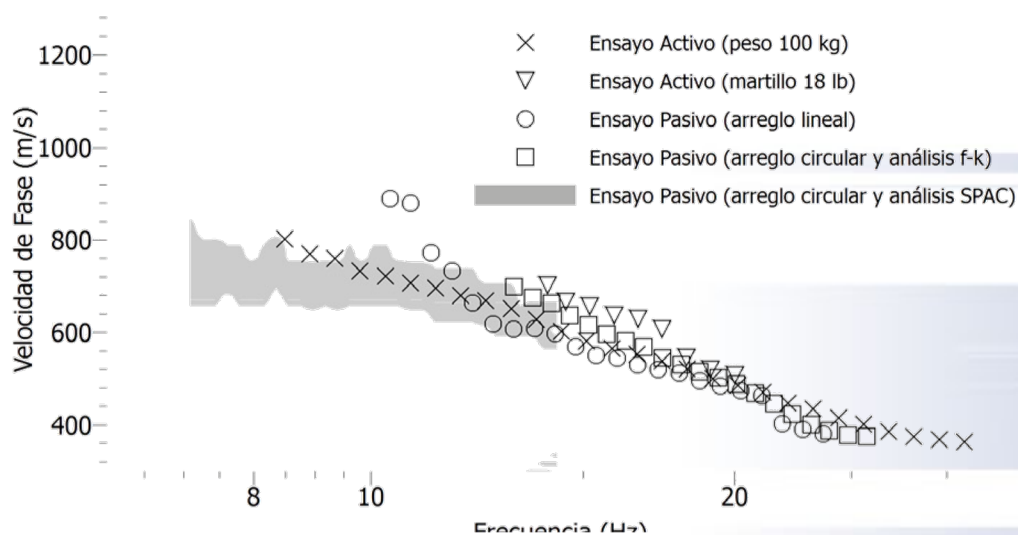


# Métodos activos con FK



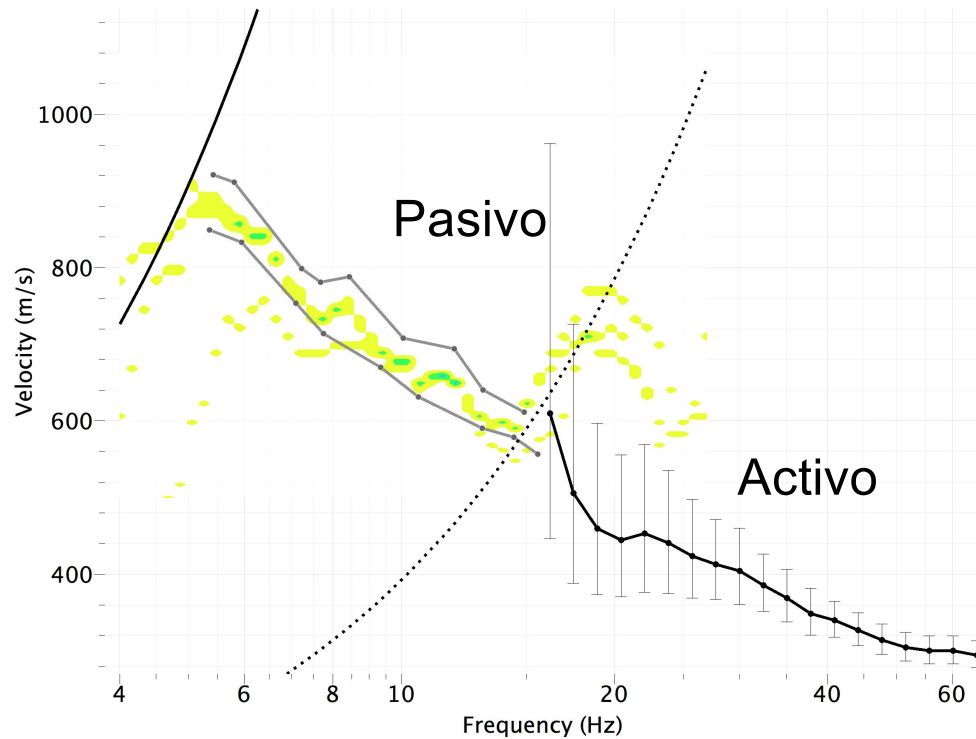
- Dependiendo del tipo de energía, se define el rango de frecuencias
- Fuentes de gran energía tendrán gran penetración
- Fuentes de baja energía sólo servirán para altas frecuencias, con poca penetración
- Ello se observa viendo la zona en la cual se excede el ruido

# 3. Curvas de dispersión

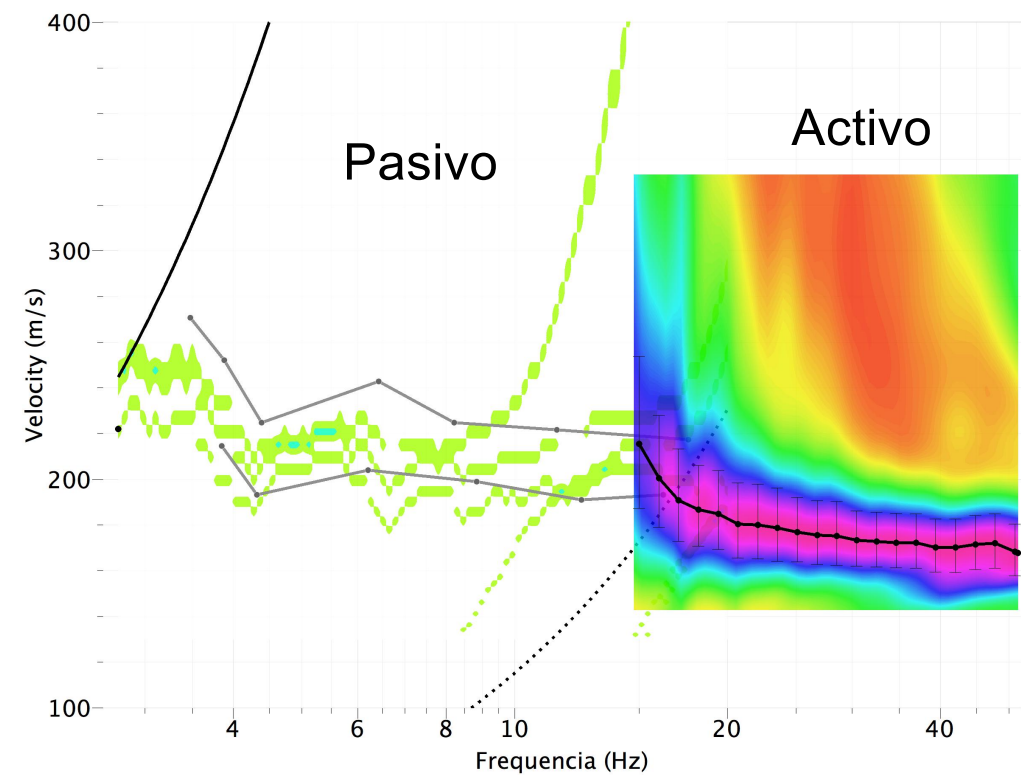


- La curva de dispersión debe ser construida por tramos
- Bajas frecuencias suelen ser bien representadas con **SPAC**
- Frecuencias medias con **FK pasivo**
- Altas frecuencias con **FK activo**
- Ojalá tengamos redundancia!!!

# 3. Curvas de dispersión

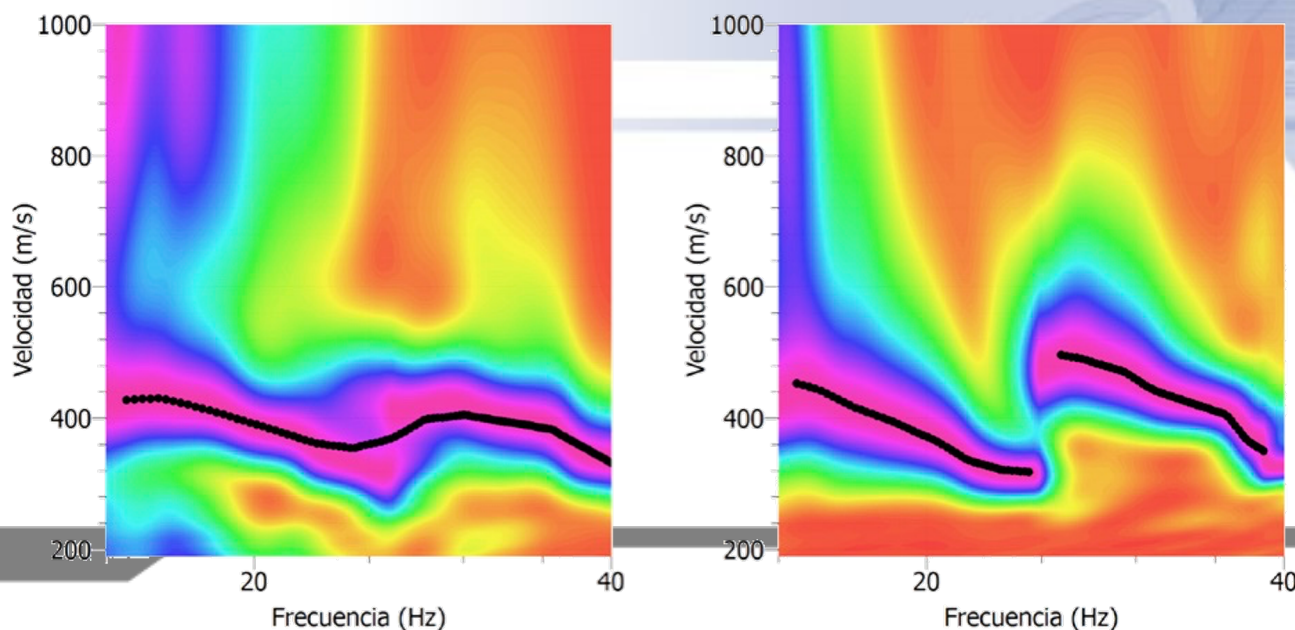


## Ejemplos



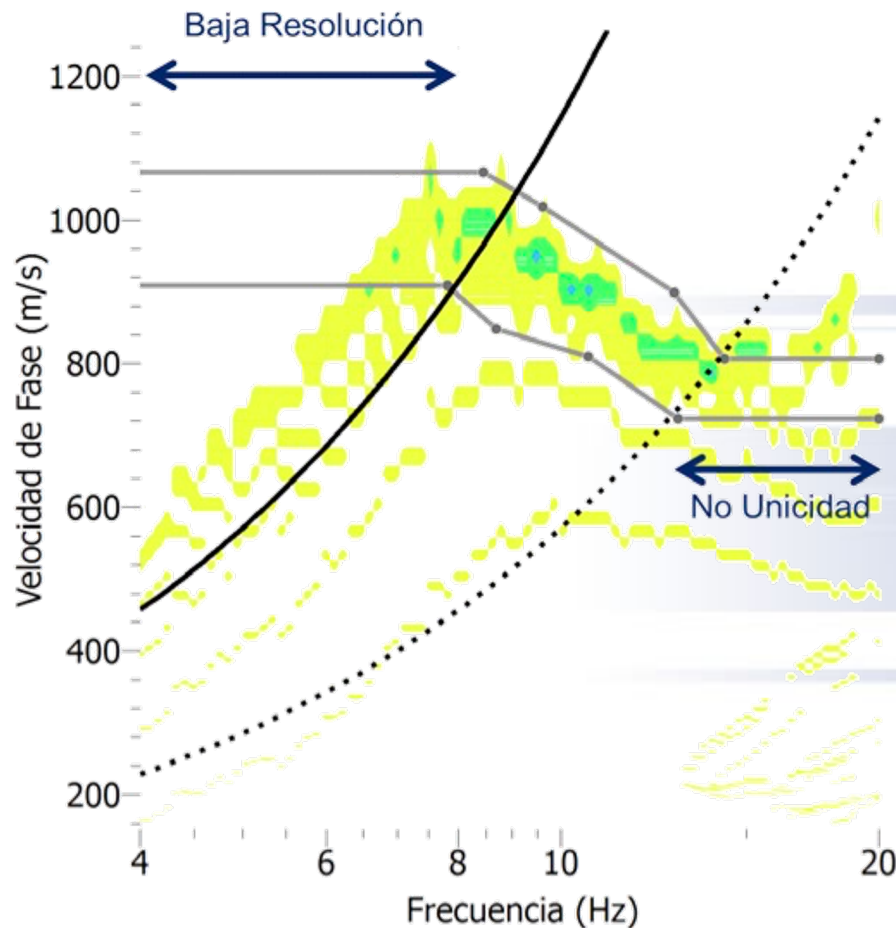
# 3. Curvas de dispersión

- Al momento de generar las curvas de dispersión es importante tener cuidado con los modos superiores
- En la figura se muestra cómo se genera una curva de dispersión compleja al superponer el modo fundamental con uno superior





# 3. Curvas de dispersión

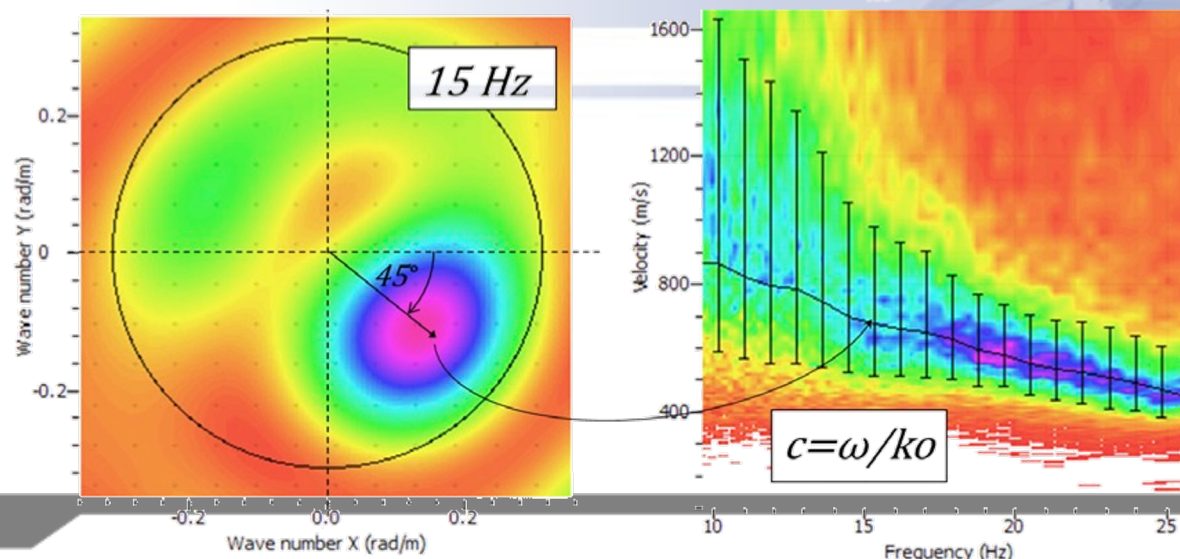


- Al momento de trabajar con los resultados de SPAC es importante tener en cuenta las zonas de buena resolución
- Son aquellas en las que los datos siguen una función de Bessel
- Cuidado con las zonas de baja resolución y/o no unicidad!

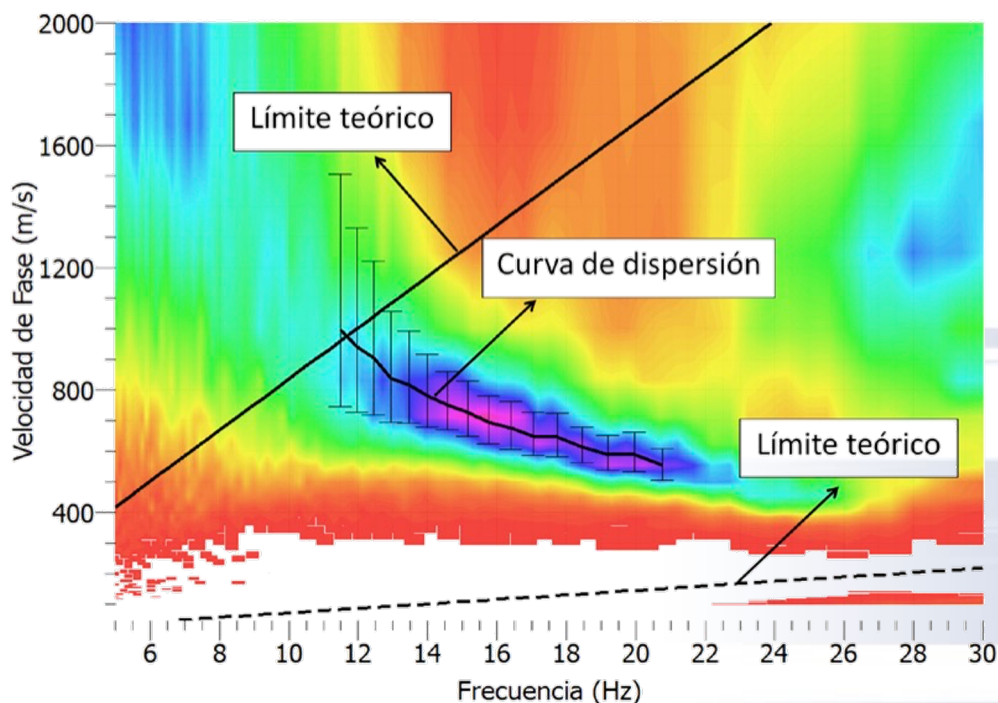


# 3. Curvas de dispersión

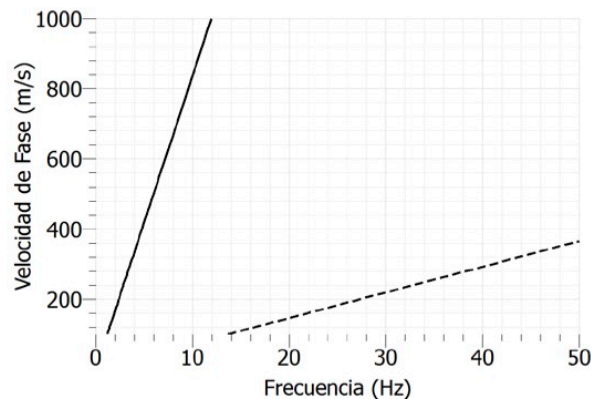
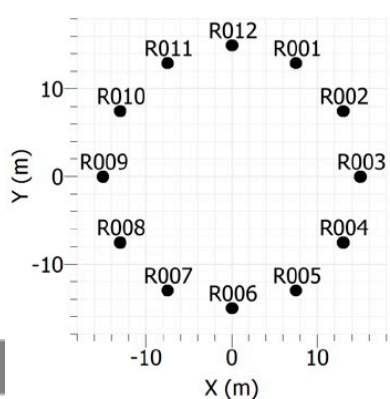
- El método FK busca la dirección y velocidad donde la energía suma en forma coherente
- Eso se repite para todas las frecuencias
- Así se construye la curva de dispersión



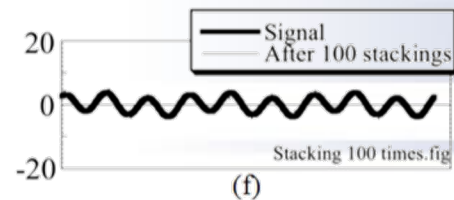
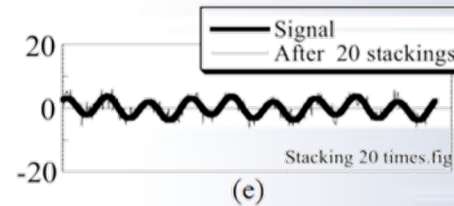
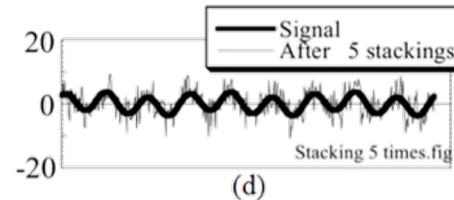
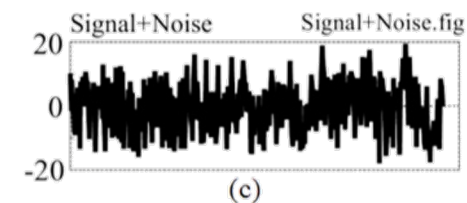
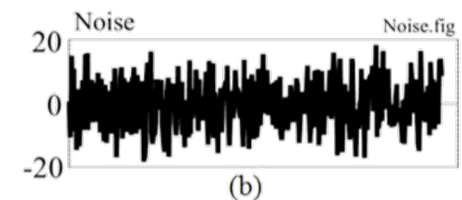
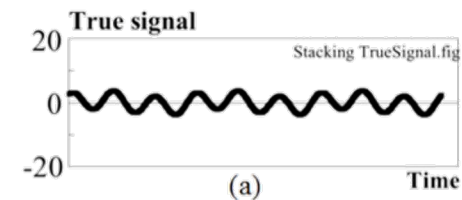
# 3. Curvas de dispersión



- Al igual que en el método SPAC, es importante considerar los resultados sólo en el sector válido
- Esto proviene de la geometría del arreglo
- Herramientas como Geopsy permiten hacer este cálculo



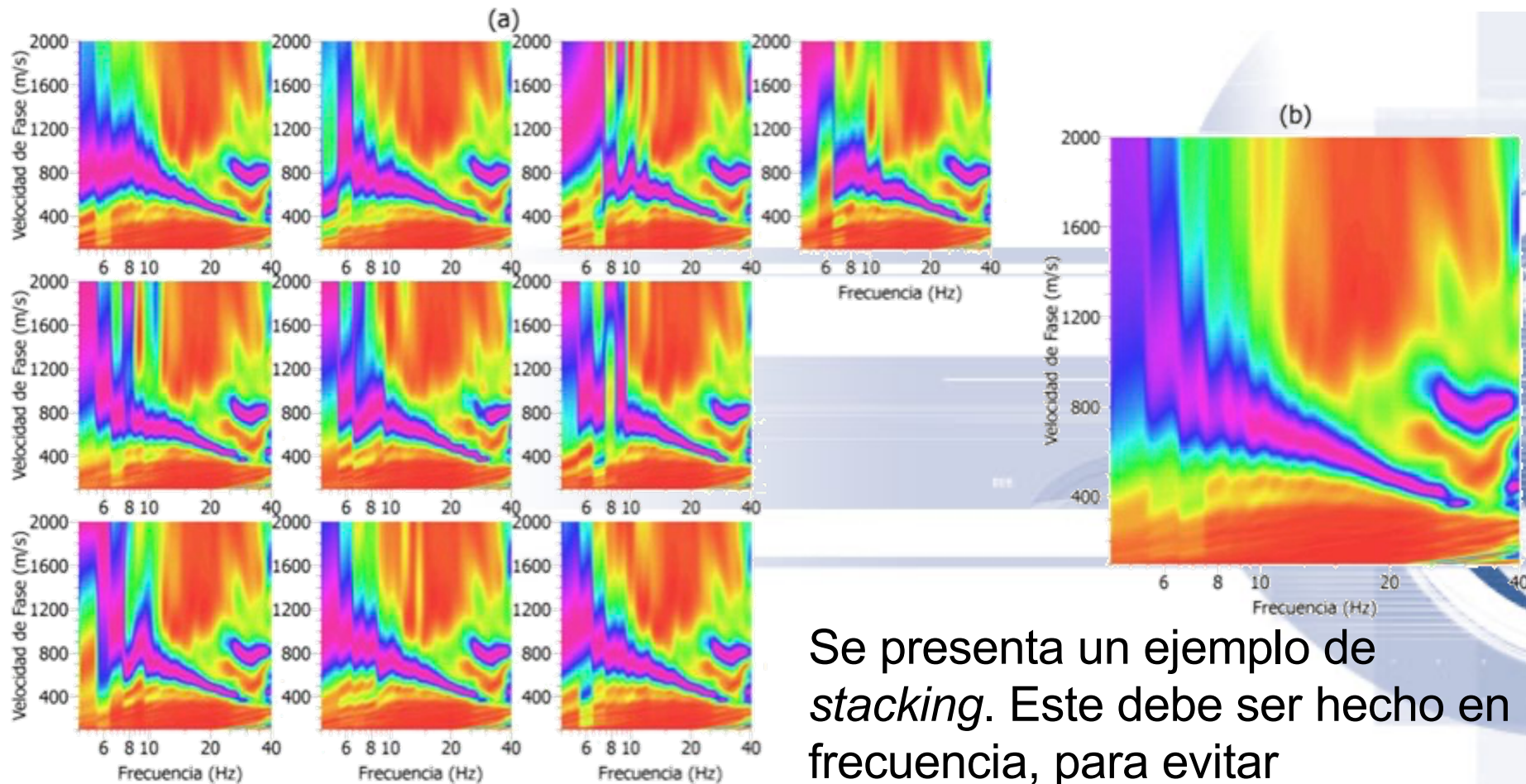
# 3. Curvas de dispersión



- Una técnica usual para mejorar los resultados es el *stacking*
- La idea es ir sumando señales para mejorar la razón señal/ruido
- La señal suma en forma coherente mientras que el ruido no



# 3. Curvas de dispersión



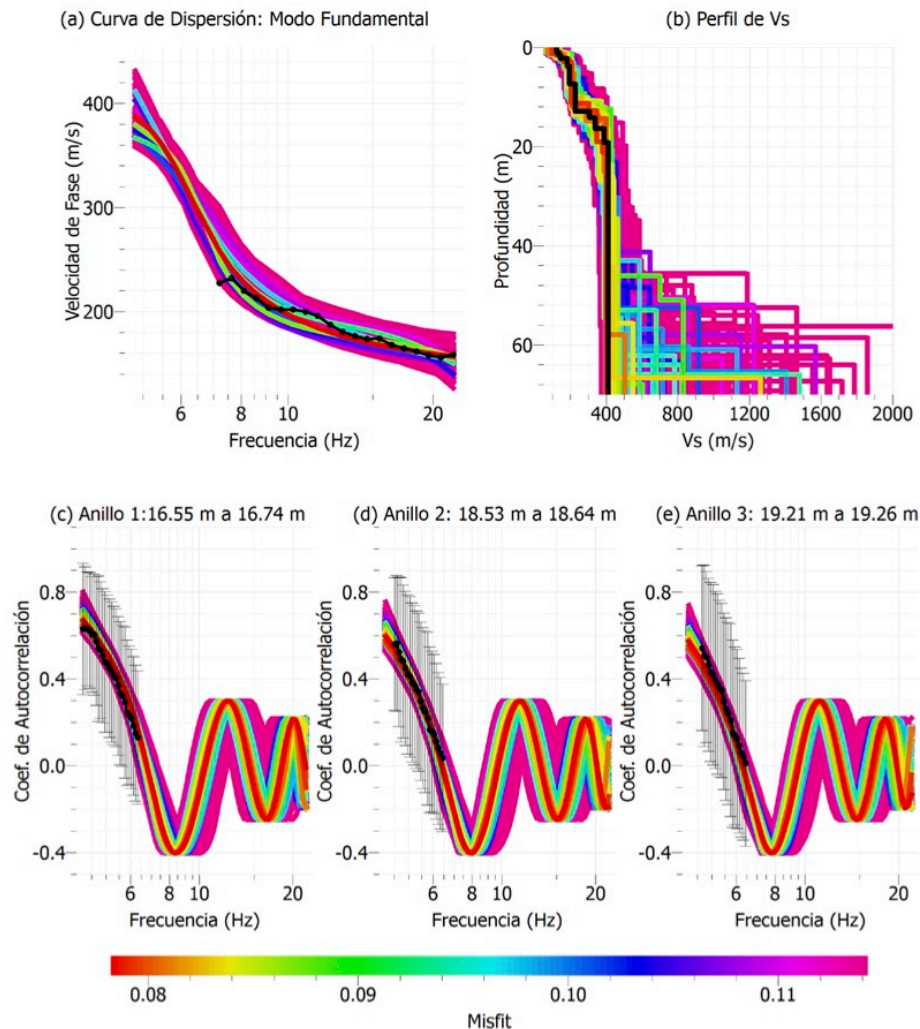
Se presenta un ejemplo de *stacking*. Este debe ser hecho en frecuencia, para evitar incoherencias entre disparos con inicios distintos.

## 4. Inversión

- Pasar de una curva de dispersión a un modelo de capas requiere resolver un problema no-lineal
- No es fácil!
- Una posibilidad es linealizar el problema: tomamos la derivada en un punto, minimizamos linealmente y volvemos a derivar
- Otra son métodos de búsqueda, tipo Montecarlo
- O búsquedas inteligentes, tipo algoritmos genéticos

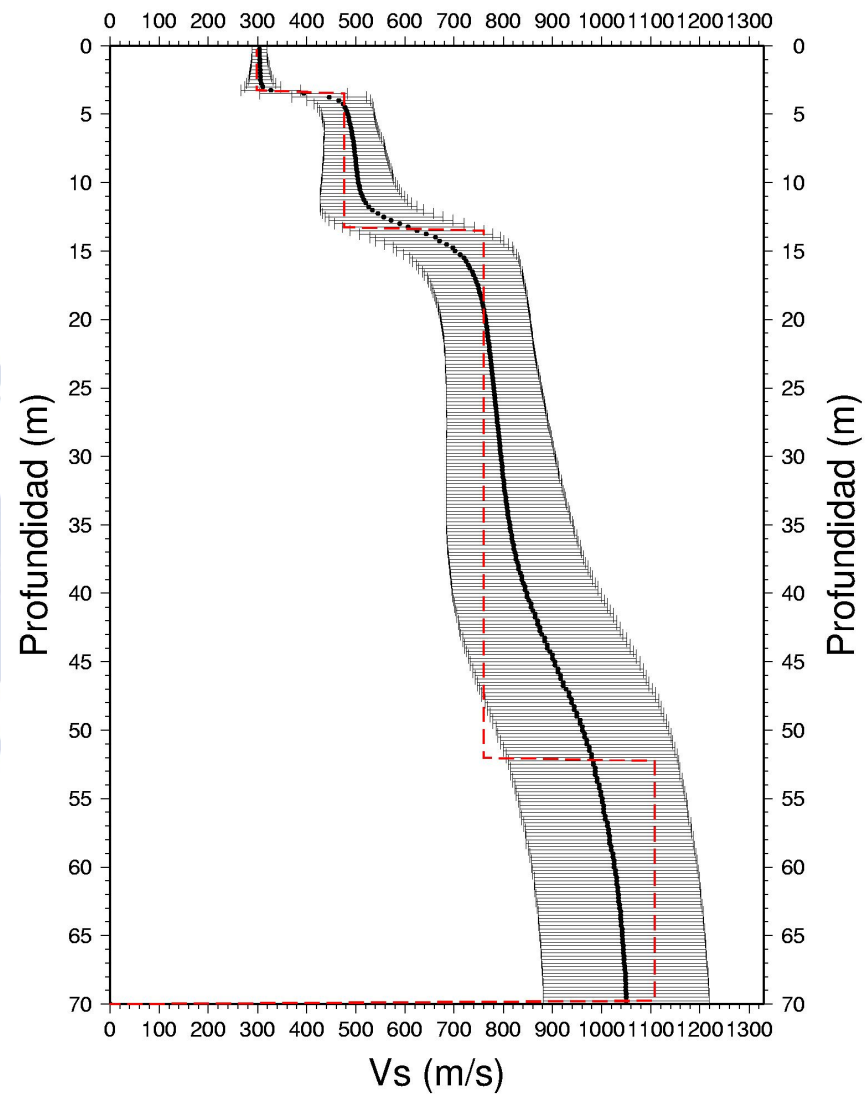
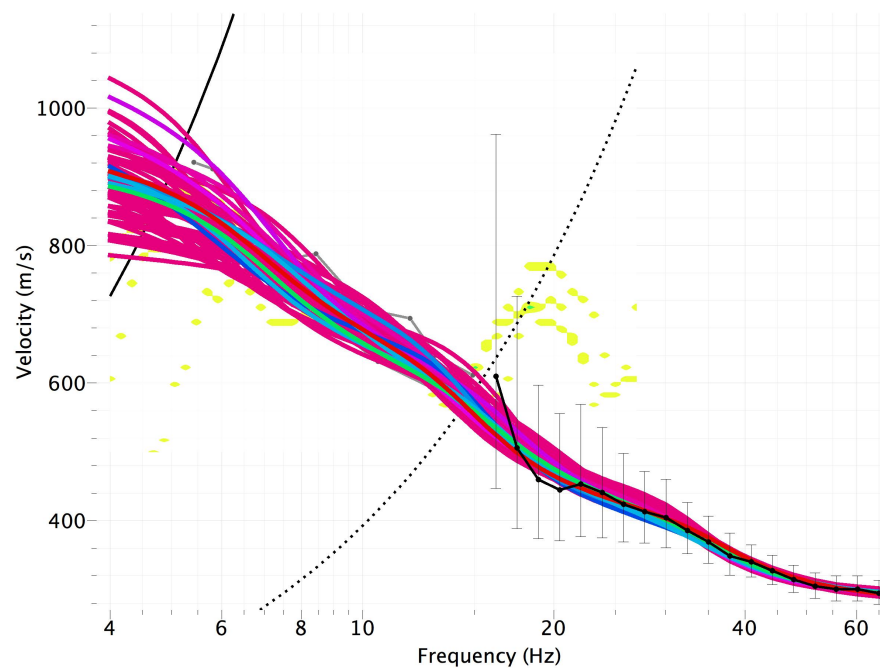


# 4. Inversión

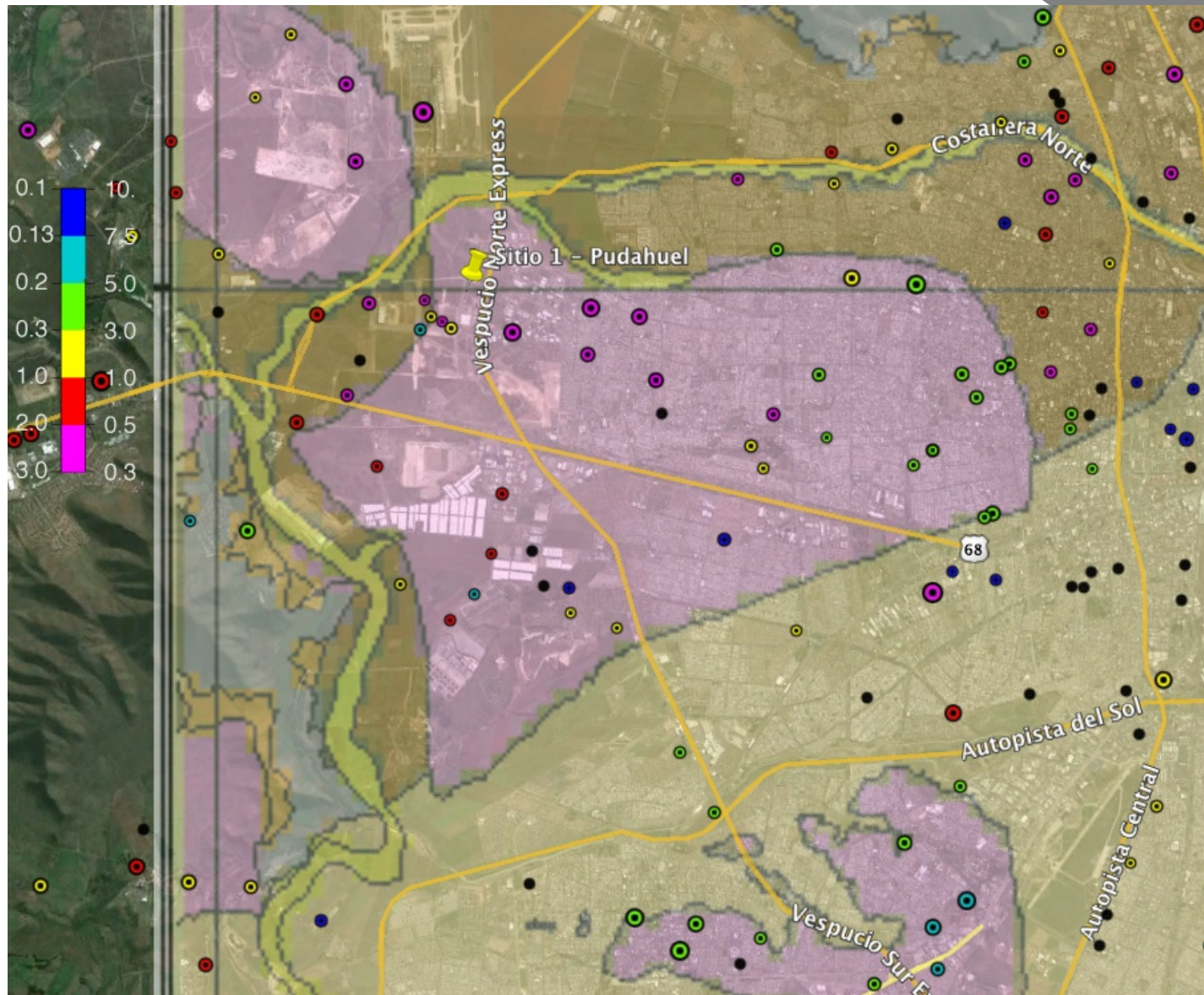


- Al momento de hacer la inversión es importante verificar que se ajusten los datos
- En este ejemplo, es la curva de dispersión de FK y las funciones de Bessel de SPAC
- Es ideal incluir los errores de cada modelo

# 4. Inversión



# Veamos un ejemplo



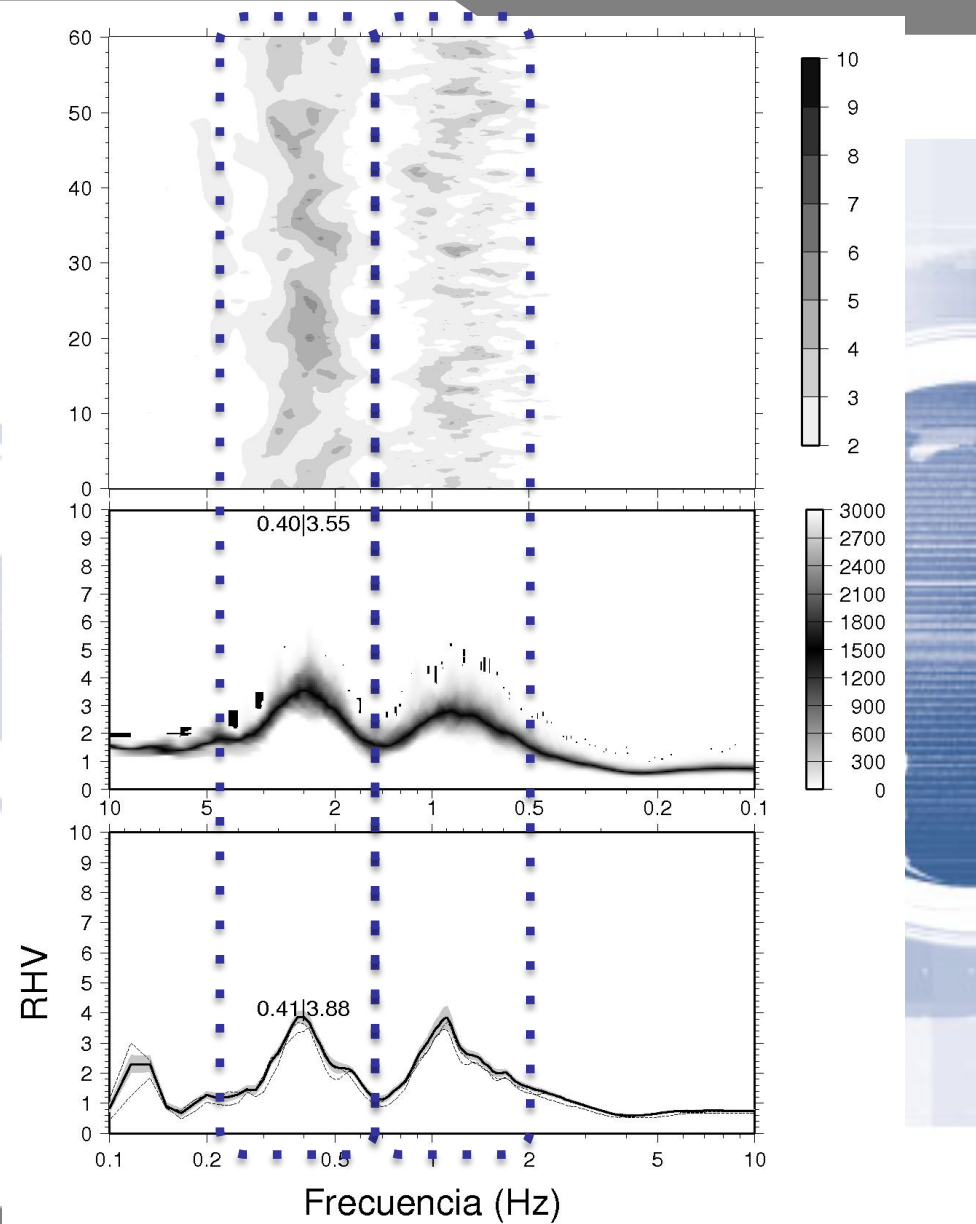
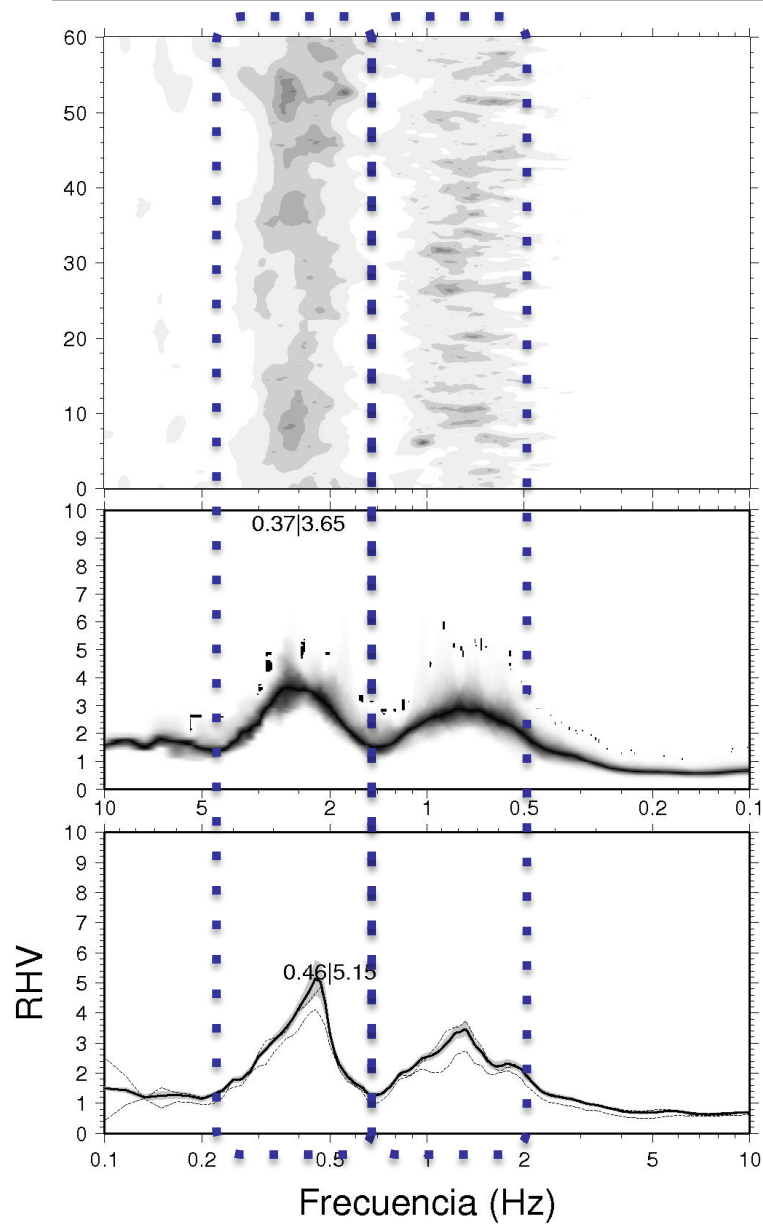


# En detalle

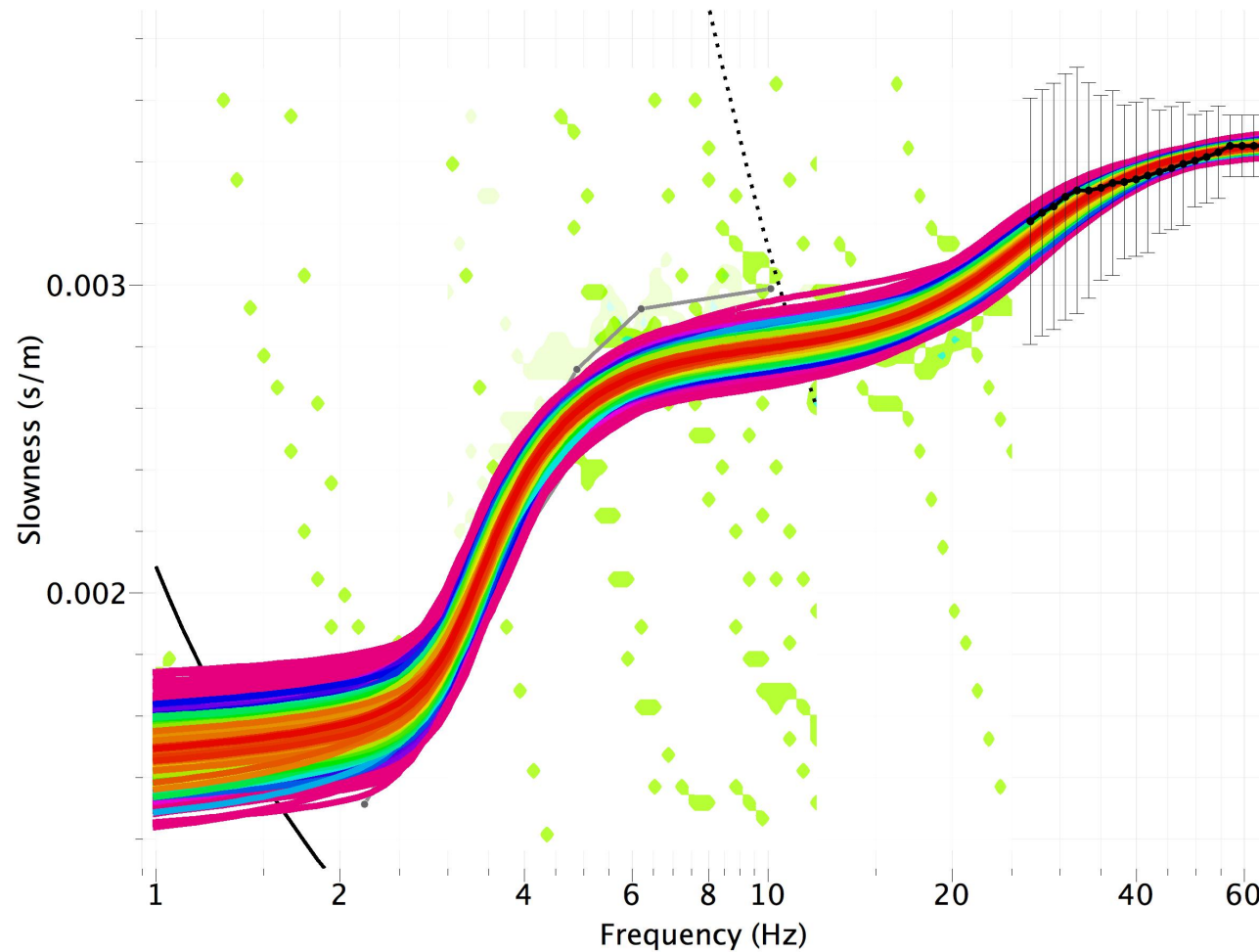




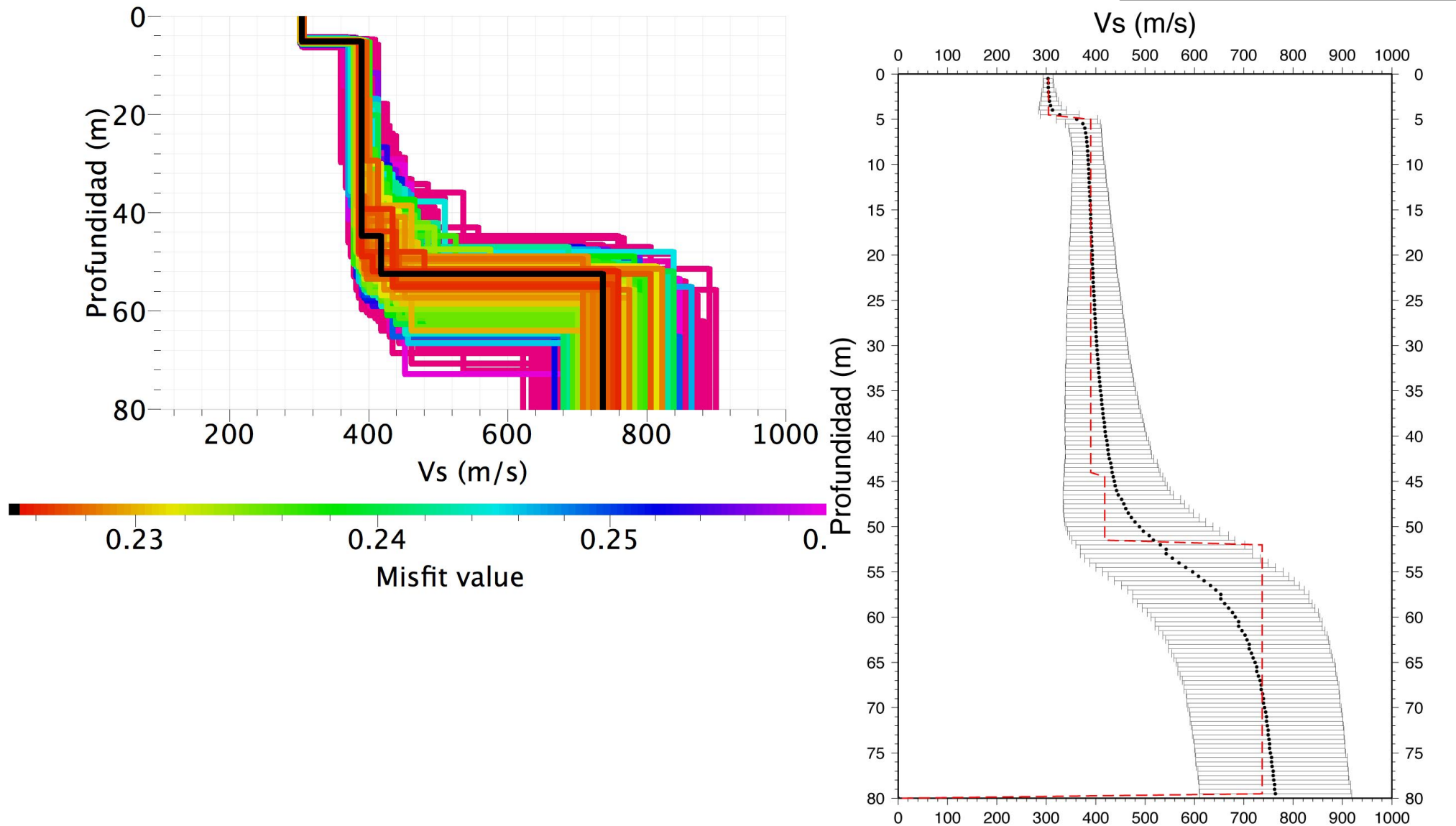
# Un poco de Nakamura



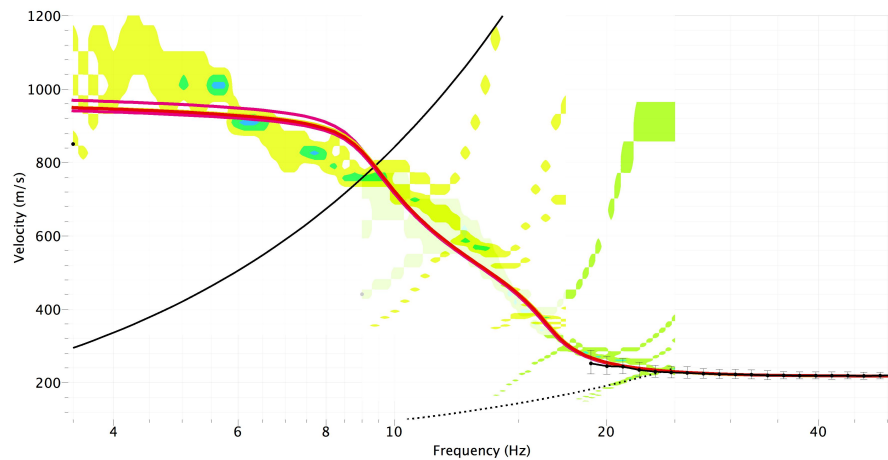
# Curva de Dispersión



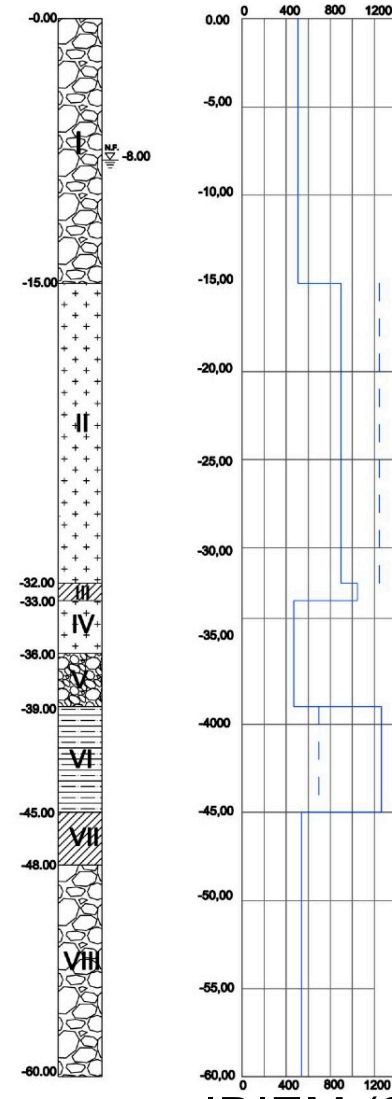
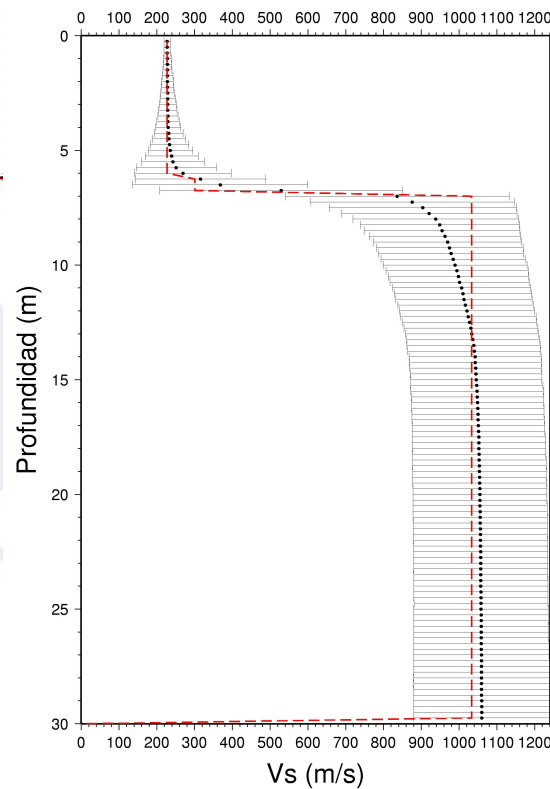
# Perfil de velocidades ( $V_s$ )



# Otras inversiones



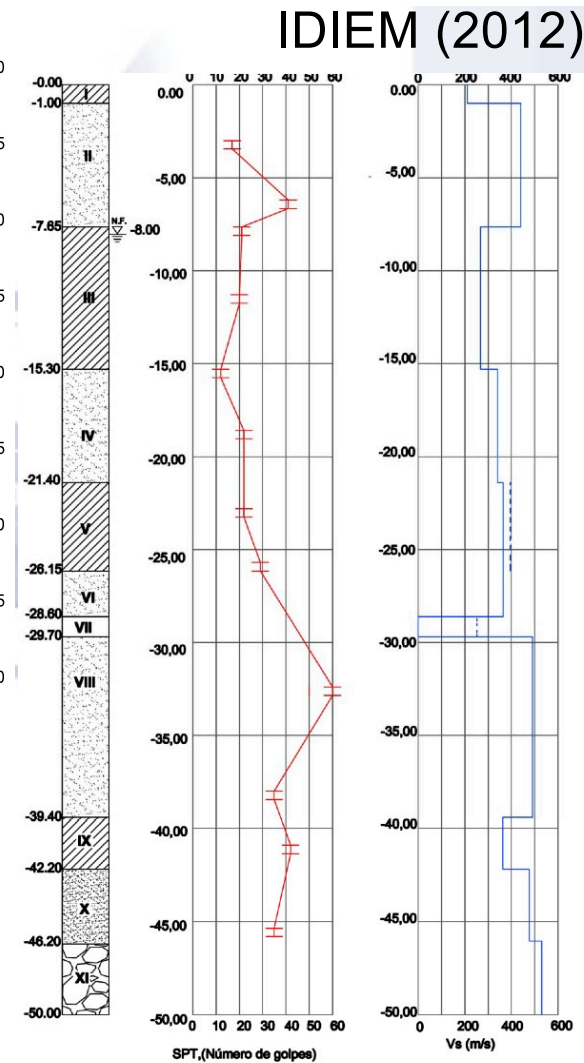
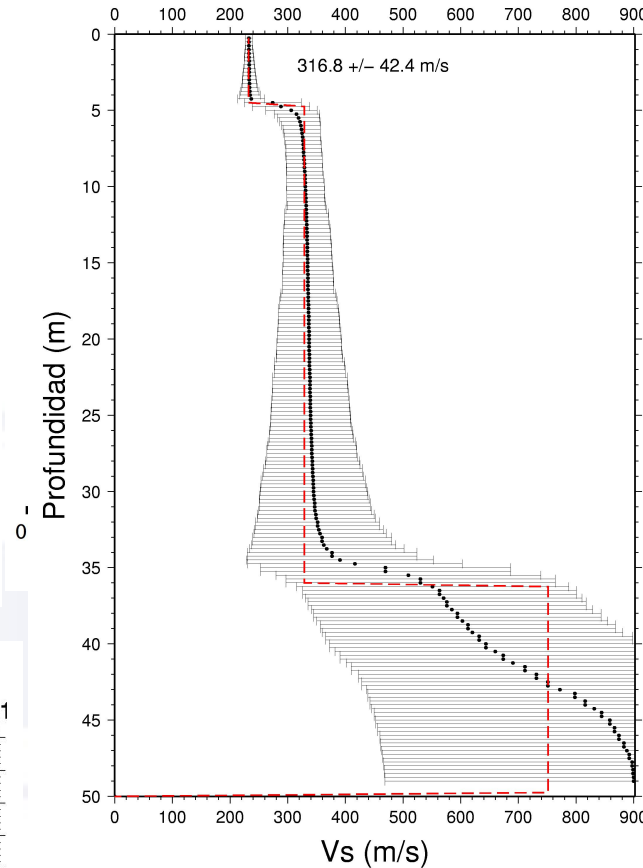
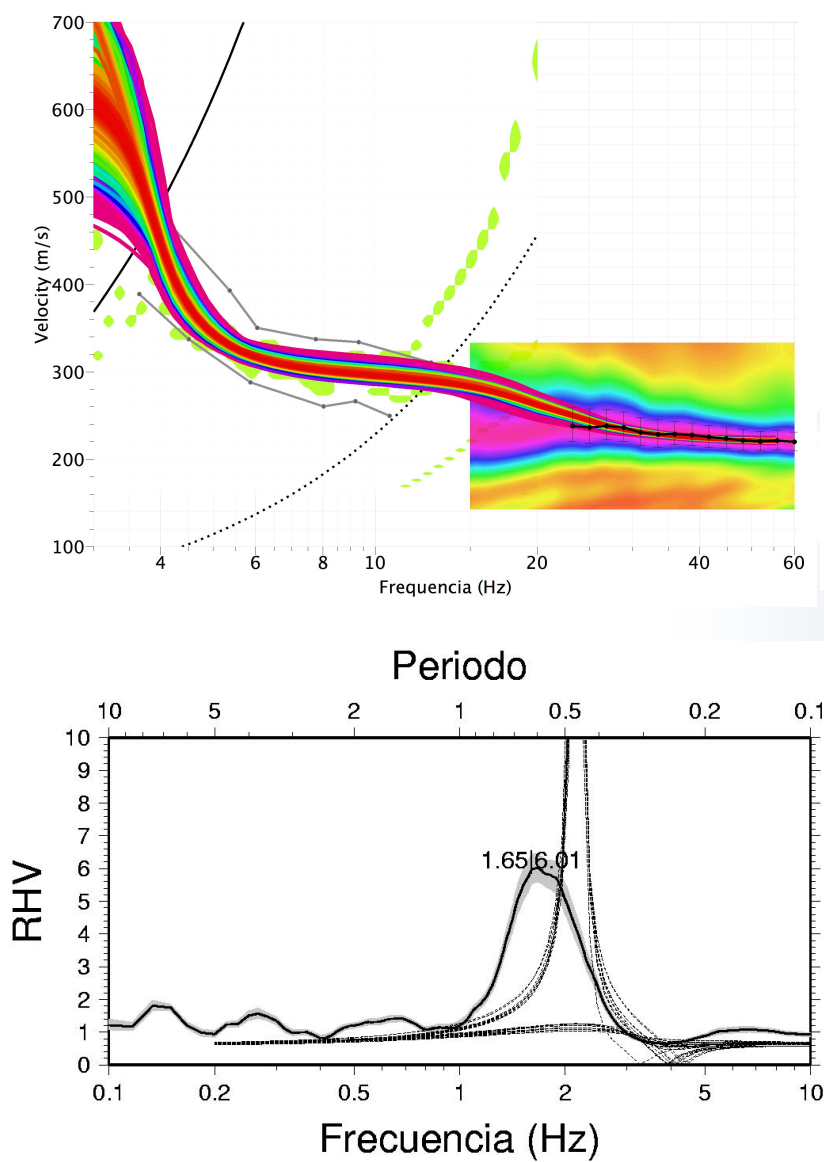
Resultados en Talca



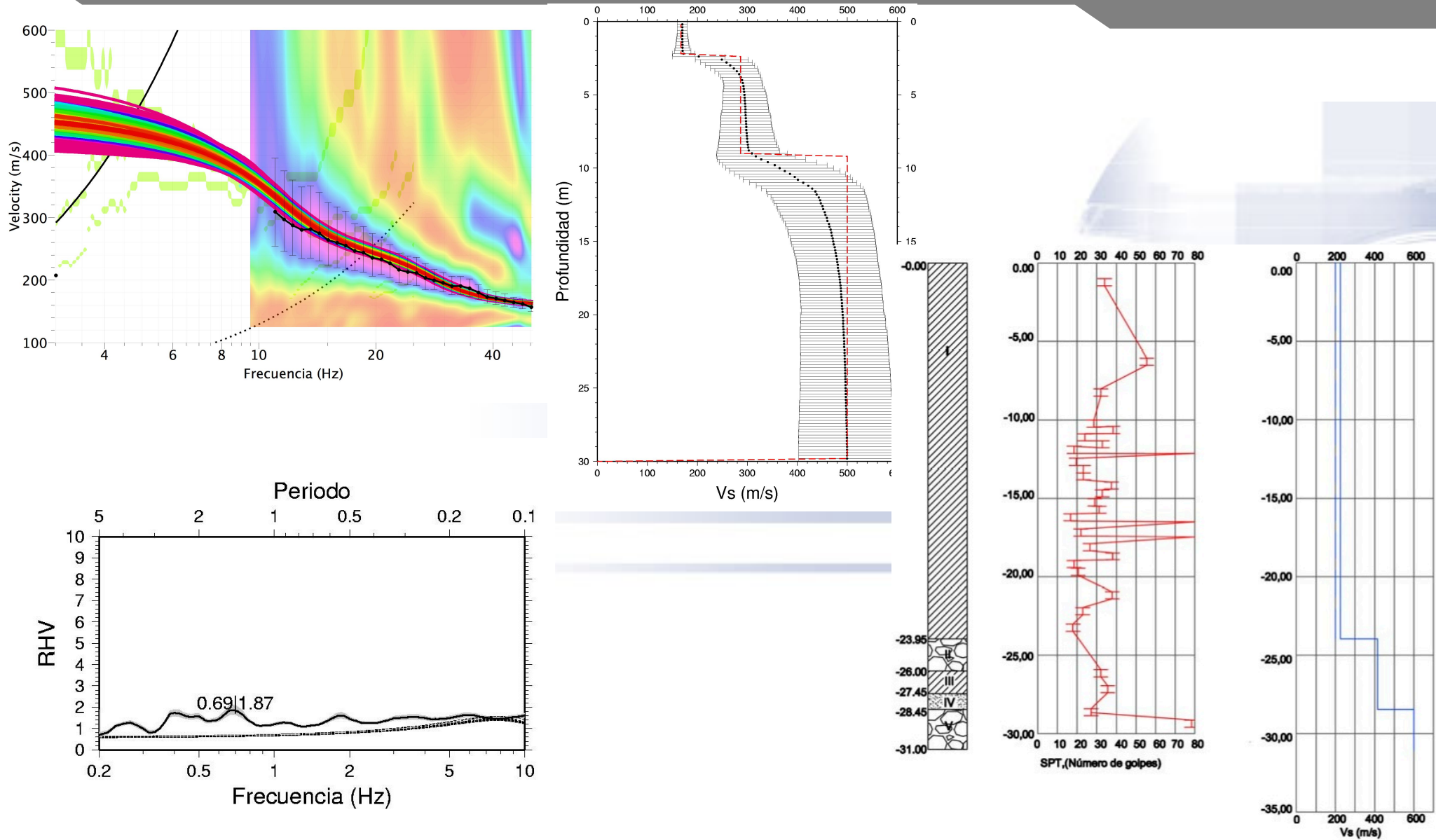
IDIEM (2012)



# Otro Ejemplo: Casablanca



# Un caso interesante: Peñalolén



# Comentarios Finales

- Las ondas superficiales son dispersivas
- Bajas frecuencias muestrean mayores profundidades
- Proceso:
  1. Terreno
  2. Toma de datos
  3. Curvas de dispersión
  4. Inversión
- Métodos de proceso e inversión

# ¡GRACIAS!

