

# Manual de Usuario MASW

Jorge Pérez Quiroz

Escuela Nacional de Estudios Superiores; Unidad Morelia

Universidad Nacional Autónoma de México

Versión Final

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
1.1. Mapa de Clase (diagrama de flujo)	5
<b>2. MASW_main (Declaración de la clase)</b>	<b>5</b>
2.1. Entradas	5
2.2. Salidas	6
<b>3. Listado de las variables 'self' de la clase</b>	<b>6</b>
<b>4. Lectura de Datos</b>	<b>7</b>
4.1. read_data	7
4.2. plot_data	7
4.2.1. Entradas de clase	7
4.2.2. Entradas de la función	7
4.2.3. Salidas	7
<b>5. Dispersión</b>	<b>8</b>
5.1. dispersion_imaging	8
5.1.1. Entradas de clase	8
5.1.2. Entradas de la función	8
5.1.3. Salidas	8
5.2. plot_dispersion_image_2D	8
5.2.1. Entradas de clase	8
5.2.2. Entradas de la función	8
5.2.3. Salidas	9
5.3. plot_dispersion_image_3D	9
5.3.1. Entradas de clase	9
5.3.2. Entradas de la función	9
5.3.3. Salidas	9
5.4. extract_dispersion_curve	9
5.4.1. Entradas de clase	10
5.4.2. Entradas de la función	10
5.4.3. Salidas	10
5.5. plot_dispersion_curve	10
5.5.1. Entradas de clase	10
5.5.2. Entradas de la función	11
5.5.3. Salidas	11
<b>6. Inversión</b>	<b>11</b>
6.1. Ke_layer	11
6.1.1. Entradas de la función	11
6.1.2. Salidas	11
6.2. Ke_halfspace	12
6.2.1. Entradas de la función	12
6.2.2. Salidas	12

6.3.	stiffness_matrix . . . . .	12
6.3.1.	Entradas de la función . . . . .	12
6.3.2.	Salidas . . . . .	12
6.4.	theoretical_dispersion_curve . . . . .	12
6.4.1.	Entradas de clase . . . . .	13
6.4.2.	Entradas de la función . . . . .	13
6.4.3.	Salidas . . . . .	13
6.5.	plot_theor_exp_dispersion_curves . . . . .	13
6.5.1.	Entradas de clase . . . . .	13
6.5.2.	Entradas de función . . . . .	13
6.5.3.	Salidas . . . . .	14
6.6.	modelo de velocidades . . . . .	14
6.6.1.	Entradas de función . . . . .	14
6.6.2.	Salidas . . . . .	14

<b>7. Referencias</b>	<b>14</b>
-----------------------	-----------

# 1. Introducción

La librería MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves for assessing shear wave velocity profiles of soils) presentada, ya está programada en Matlab pero el objetivo principal es convertirlo a python para su libre comercio o distribución y tiene como función el calculo de espectros de ondas superficiales.

Consta de 2 partes. La primera evalúa curvas de dispersión experimentales y la segunda es aplicarle una inversión a los datos dispersos con el fin de una evaluación de perfiles de velocidad de ondas transversales.

El algoritmo de esta librería se almacena en una sola clase. A continuación se en lista las funciones que contiene la clase:

Archivo de ejecución:

- MASW\_main.ipynb

Funciones para la lectura de datos:

- read\_data
- plot\_data

Funciones para la Dispersión:

- dispersion\_imaging
- plot\_dispersion\_image\_2D
- plot\_dispersion\_image\_3D
- extract\_dispersion\_curve
- plot\_dispersion\_curve

Funciones para la Inversión:

- Ke\_layer
- Ke\_halfspace
- stiffness\_matrix
- theoretical\_dispersion\_curve
- misfit
- plot\_theor\_exp\_dispersion\_curves
- inversion

## 1.1. Mapa de Clase (diagrama de flujo)

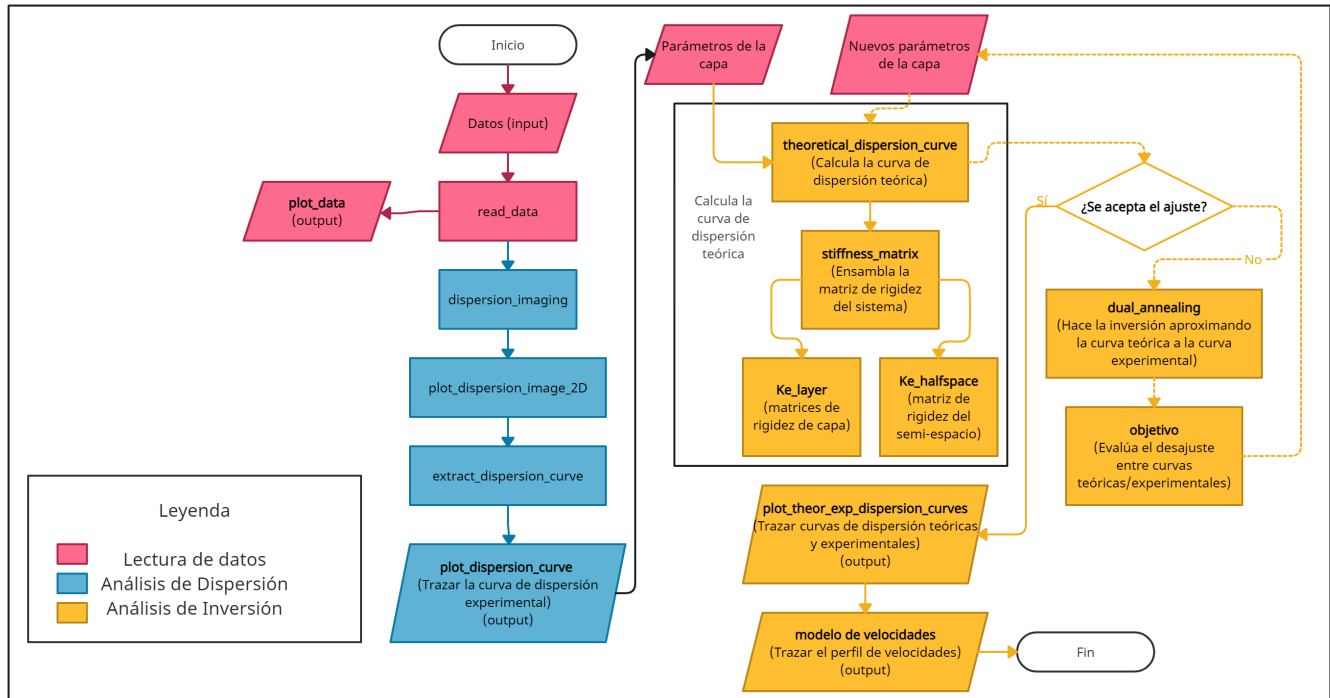


Fig1. Diagrama de flujo que representa la estructura de la clase.

## 2. MASW\_main (Declaración de la clase)

El archivo MASW\_main es un archivo elaborado en el cuaderno de Jupyter, desde donde se importa la librería y manda a llamar las funciones. También se importa el archivo de datos que se recolecto de los geófonos. Por último en este archivo se declaran variables iniciales, valores necesarios para graficar como la anchura y la altura de la gráfica, y se muestran las gráficas resultantes de los métodos de dispersión e inversión.

### 2.1. Entradas

- filename: Nombre del archivo que contiene los datos, con extensión ".dat"
- dt: Periodo [s]
- fs: Frecuencia de grabación [Hz]
- N: Número de receptores
- dx: Distancia entre receptores [m]
- x1: Compensación de origen [m]
- direction: Dirección del arreglo
- header: Encabezado = 6

## 2.2. Salidas

Sin salidas de función.

## 3. Listado de las variables 'self' de la clase

- **self.filename**: Nombre del archivo que contiene los datos, con extensión ".dat"
- **self.dt**: Periodo [s]
- **self.header**: Encabezado
- **self.data**: Es una variable tipo pandas\_cvs que contienen los datos sísmicos de entrada.
- **self.fs**: Frecuencia de grabación [Hz]
- **self.N**: Número de receptores
- **self.dx**: Distancia entre receptores [m]
- **self.x1**: Compensación de origen [m]
- **self.direction**: Dirección del arreglo
- **self.Lu**: Numero de datos de la primera llegada.
- **self.Tmax**: Tiempo total de grabación [s]
- **self.T**: Tiempo de grabaciones individuales [s]
- **self.L**: Longitud de la dispersión del receptor [m]
- **self.x**: Longitud del arreglo.
- **self.A**: Amplitud sumada (apilada inclinada) correspondiente a diferentes combinaciones de  $\omega = 2 * \pi * f$  y  $cT$
- **self.Aplot**: Suma de amplitudes (pila inclinada) correspondientes a fplot y cplot.
- **self.fplot**: Rango de frecuencia de la imagen de dispersión [Hz]
- **self.cplot**: Rango de velocidad de la imagen de dispersión [m/s]
- **self.cT**: Velocidad de la onda de Rayleigh [m/s]
- **self.f**: Frecuencia [Hz]
- **self.LcT**: Longitud de la velocidad de la onda Rayleigh.
- **self.f\_ curve0**: Frecuencia [Hz]
- **self.c\_ curve0**: Velocidad de onda de Rayleigh [m/s]
- **self.lambda\_ curve0**: Longitud de onda [m]

- **self.f\_curve0\_up**: Frecuencia, curva de límite superior [ $Hz$ ]  
`f_curve0_up = []` si no se desean los límites superior / inferior.
- **self.c\_curve0\_up**: Velocidad de onda de Rayleigh, curva de límite superior [ $m/s$ ]  
`c_curve0_up = []` si no se desean los límites superior / inferior.
- **self.lambda\_curve0\_up**: Longitud de onda, curva de límite superior [ $m$ ]  
`lambda_curve0_up = []` si no se desean los límites superior / inferior.
- **self.f\_curve0\_low**: Frecuencia, curva de límite inferior [ $Hz$ ]  
`f_curve0_low = []` si no se desean los límites superior / inferior.
- **self.c\_curve0\_low**: Velocidad de onda de Rayleigh, curva de límite inferior [ $m/s$ ]  
`c_curve0_low = []` si no se desean los límites superior / inferior.
- **self.lambda\_curve0\_low**: Longitud de onda, curva de límite inferior [ $m$ ]  
`lambda_curve0_low = []` si no se desean los límites superior / inferior.

## 4. Lectura de Datos

### 4.1. read\_data

Esta función no se encuentra en el archivo `masw.py` dentro de la clase, si no en el archivo `MASW_main` que es de donde se leen los datos.

Esta función carga los datos de ondas superficiales registrados por los geófonos y determina la longitud de la extensión del receptor, la ubicación de los receptores individuales y el tiempo total de grabación.

### 4.2. plot\_data

La función `plot_data` traza datos de ondas superficiales multicanal registrados en el dominio de tiempo de compensación.

#### 4.2.1. Entradas de clase

**self.x1**, **self.data**, **self.T**, **self.dx**

#### 4.2.2. Entradas de la función

- `scale`: Escala = 0.5

#### 4.2.3. Salidas

Un gráfico de datos de ondas superficiales registrados en el dominio del tiempo de compensación.

## 5. Dispersión

### 5.1. dispersion\_imaging

La función `dispersion_imaging` realiza los tres primeros pasos del análisis de dispersión de los datos de ondas superficiales registrados. El análisis se lleva a cabo mediante el método de cambio de fase.

#### 5.1.1. Entradas de clase

`self.u`, `self.data`, `self.Lu`, `self.cT`, `self.LcT`, `self.x`

#### 5.1.2. Entradas de la función

- `cT_min`: Prueba de la velocidad de fase de la onda de Rayleigh (valor mínimo) [ $m/s$ ]
- `cT_max`: Prueba de la velocidad de fase de la onda de Rayleigh (valor máximo) [ $m/s$ ]
- `delta_cT`: Prueba de incremento de velocidad de fase de onda de Rayleigh [ $m/s$ ]

#### 5.1.3. Salidas

`self.cT`, `self.LcT`, `self.f`, `self.A`

### 5.2. plot\_dispersion\_image\_2D

La función `plot_dispersion_image_2D` traza la imagen de dispersión bidimensional del campo de ondas registrado. La amplitud inclinada apilada (A) se presenta en el dominio de frecuencia-velocidad de fase-amplitud sumada normalizada utilizando una escala de colores.

`plot_dispersion_image_2D` traza la imagen de dispersión entre los límites [`f_min`, `f_max`, `cT_min`, `cT_max`].

#### 5.2.1. Entradas de clase

`self.f`, `self.A`, `self.cT`

#### 5.2.2. Entradas de la función

- `fmin`: Límite inferior del eje de frecuencia [ $Hz$ ]
- `fmax`: Límite superior del eje de frecuencia [ $Hz$ ]
- `resolution`: Número de curvas de nivel - generalmente se recomienda una resolución = 100
- `FigWidth`: Ancho de la figura [ $cm$ ]
- `FigHeight`: Altura de la figura [ $cm$ ]
- `FigFontSize`: Tamaño de fuente para etiquetas de eje [ $pt$ ]



### 5.2.3. Salidas

Imagen de dispersión bidimensional con límites [f\_min, f\_max, cT\_min, cT\_max].

`self.Aplot`, `self.fplot`, `self.cplot`

## 5.3. plot\_dispersion\_image\_3D

La función `plot_dispersion_image_3D` traza la imagen de dispersión tridimensional del campo de ondas registrado. La amplitud inclinada apilada (A) se presenta en el dominio frecuencia - velocidad de fase - amplitud sumada normalizada.

`plot_dispersion_image_3D` traza la imagen de dispersión entre los límites [f\_min, f\_max, cT\_min, cT\_max].

### 5.3.1. Entradas de clase

`self.Aplot`, `self.fplot`, `self.cplot`

### 5.3.2. Entradas de la función

- `fmin`: Límite inferior del eje de frecuencia [*Hz*]
- `fmax`: Límite superior del eje de frecuencia [*Hz*]
- `FigWidth`: Ancho de la figura [*cm*]
- `FigHeight`: Altura de la figura [*cm*]
- `FigFontSize`: Tamaño de fuente para etiquetas de eje [*pt*]

### 5.3.3. Salidas

Imagen de dispersión tridimensional con límites [f\_min, f\_max, cT\_min, cT\_max].

## 5.4. extract\_dispersion\_curve

La función `extract_dispersion_curve` se utiliza para identificar y extraer la curva de dispersión del modo fundamental basada en la imagen de dispersión 2D.

Las curvas de dispersión del modo fundamental se identifican manualmente en función de los máximos espectrales observados en cada frecuencia (utilizando un sistema de numeración). Además, se pueden obtener los límites superior e inferior para la curva de dispersión del modo fundamental, correspondiente a *p* del valor de amplitud espectral pico del modo fundamental identificado en cada frecuencia.

Se pueden agregar puntos adicionales a la curva de dispersión del modo fundamental (y las curvas de límite superior/inferior) usando el mouse.

Alternativamente, la curva de dispersión del modo fundamental, junto con los límites superior/inferior, se pueden seleccionar completamente usando el mouse.

#### 5.4.1. Entradas de clase

`self.Aplot`, `self.fplot`, `self.cplot`

#### 5.4.2. Entradas de la función

- `f_receivers`: Frecuencia propia de los receptores (geófonos) [ $Hz$ ]
- `select`: Controla cómo se selecciona la curva de dispersión del modo fundamental en función de la imagen de dispersión:
  - `'mouse'`: Puntos seleccionados al hacer clic con el mouse.
  - `'numbers'`: Puntos seleccionados según un sistema de numeración.  
Parámetros de entrada adicionales:  
`nP0`: Número de puntos que pertenecen a la curva de dispersión del modo fundamental.
  - `'both'`: Puntos seleccionados según un sistema de numeración.  
Se pueden seleccionar puntos adicionales haciendo clic con el mouse.  
Parámetros de entrada adicionales:  
`nP0`: Número de puntos que pertenecen a la curva de dispersión del modo fundamental.
- `up_low_boundries`:
  - `'yes'`: Se desean límites superior / inferior para la curva de dispersión del modo fundamental.
  - `'no'`: No se desean límites superior / inferior para la curva de dispersión del modo fundamental.
- `p`: Valor porcentual para la determinación de curvas de límite superior / inferior [%]

#### 5.4.3. Salidas

La Curva de dispersión del modo fundamental extraída.

`self.f_curve0`, `self.c_curve0`, `self.lambda_curve0`, `self.f_curve0_up`, `self.c_curve0_up`, `self.lambda_curve0_up`,  
`self.f_curve0_low`, `self.c_curve0_low`, `self.lambda_curve0_low`

### 5.5. plot\_dispersion\_curve

La función `plot_dispersion_curve` se usa para trazar la curva de dispersión de modo fundamental, con o sin límites superior/inferior. La curva de dispersión se presenta como frecuencia vs la velocidad de onda de Rayleigh o como velocidad de onda de Rayleigh vs longitud de onda.

#### 5.5.1. Entradas de clase

`self.f_curve0`, `self.c_curve0`, `self.lambda_curve0`, `self.f_curve0_up`, `self.c_curve0_up`, `self.lambda_curve0_up`,  
`self.f_curve0_low`, `self.c_curve0_low`, `self.lambda_curve0_low`

### 5.5.2. Entradas de la función

Curva de dispersión de modo fundamental.

- type: Controla cómo se presenta la curva de dispersión:
  - 'f\_c': Frecuencia vs Velocidad de onda de Rayleigh.
  - 'c\_lambda': Velocidad de onda de Rayleigh vs Longitud de onda.
- up\_low\_boundaries:
  - 'yes': Los límites superiores/inferiores para la curva de dispersión de modo fundamental se buscan.
  - 'no': los límites superior/inferior para la curva de dispersión de modo fundamental no se buscan.
- FigWidth: Ancho de la figura [cm]
- FigHeight: Altura de la figura [cm]
- FigFontSize: Tamaño de fuente para etiquetas de eje [pt]

### 5.5.3. Salidas

Dos gráficos que contienen las curvas de dispersión: frecuencia vs velocidad de onda Rayleigh, y la curva longitud de onda contra velocidad de onda Rayleigh.

## 6. Inversión

### 6.1. Ke\_layer

La función Ke\_layer calcula la matriz de rigidez del elemento de la j-ésima capa ( $j = 1, \dots, n$ ) del modelo de tierra estratificada que se utiliza en el análisis de inversión.

#### 6.1.1. Entradas de la función

- h: Espesor de capa (espesor de la j-ésima capa de espesor finito) [m]
- alpha: Velocidad de onda de compresión de la j-ésima capa [m/s]
- beta: Velocidad de la onda de corte de la j-ésima capa [m/s]
- rho: Densidad de masa de la j-ésima capa [kg/m<sup>3</sup>]
- c\_test: Prueba de la velocidad de fase de la onda de Rayleigh [m/s]
- k: Número de onda.

#### 6.1.2. Salidas

- Ke: Matriz de rigidez del elemento de la j-ésima capa.

## 6.2. Ke\_halfspace

La función `Ke_halfspace` calcula la matriz de rigidez del elemento para el medio espacio (capa  $n + 1$ ) del modelo de tierra estratificada que se utiliza en el análisis de inversión.

### 6.2.1. Entradas de la función

- `alfa`: Velocidad de onda compresional de medio espacio [ $m/s$ ]
- `beta`: Velocidad de onda de corte de medio espacio [ $m/s$ ]
- `rho`: Densidad de masa de medio espacio [ $kg/m^3$ ]
- `c_test`: Prueba de la velocidad de fase de la onda de Rayleigh [ $m/s$ ]
- `k`: Número de onda.

### 6.2.2. Salidas

- `Ke_halfspace`: Matriz de rigidez del elemento de medio espacio.

## 6.3. stiffness\_matrix

La función `stiffness_matrix` ensambla la matriz de rigidez del sistema del modelo de tierra estratificada que se utiliza en el análisis de inversión y calcula su determinante.

### 6.3.1. Entradas de la función

- `c_test`: Prueba de la velocidad de fase de la onda de Rayleigh [ $m/s$ ]
- `k`: Número de onda.
- `h`: Espesores de capa [ $m$ ] (vector de longitud  $n$ )
- `alpha`: Velocidad de onda de compresión [ $m/s$ ] (vector de longitud  $n + 1$ )
- `beta`: Velocidad de la onda de corte [ $m/s$ ] (vector de longitud  $n + 1$ )
- `rho`: Densidad de masa [ $kg/m^3$ ] (vector de longitud  $n + 1$ )
- `n`: Número de capas de espesor finito.

### 6.3.2. Salidas

- `D`: Determinante de la matriz de rigidez del sistema.

## 6.4. theoretical\_dispersion\_curve

La función `theoretical_dispersion_curve` calcula la curva de dispersión teórica en modo fundamental para el modelo de capa definido por `h`, `alfa`, `beta`, `rho` y `n` en longitudes de onda `lambda`.

#### 6.4.1. Entradas de clase

`self.lambda_curve0`.

#### 6.4.2. Entradas de la función

- `c_test`: Prueba del vector de velocidad de fase de onda de Rayleigh [ $m/s$ ]
- `lambda`: Vector de longitud de onda [ $m$ ]
- `h`: Espesores de capa [ $m$ ] (vector de longitud  $n$ ).
- `alfa`: Velocidad de onda de compresión [ $m/s$ ] (vector de longitud  $n + 1$ ).
- `beta`: Velocidad de la onda de corte [ $m/s$ ] (vector de longitud  $n + 1$ ).
- `rho`: Densidad de masa [ $kg/m^3$ ] (vector de longitud  $n + 1$ ).
- `n`: Número de capas de espesor finito.

#### 6.4.3. Salidas

- `c_t`: Vector de velocidad de fase de la onda de Rayleigh (curva de dispersión del modo fundamental teórico) [ $m/s$ ]
- `lambda_t`: Longitud de onda de la onda de Rayleigh (curva de dispersión del modo fundamental teórico) [ $m$ ]

### 6.5. `plot_theor_exp_dispersion_curves`

La función `plot_theor_exp_dispersion_curves` se utiliza para trazar las curvas de dispersión de modo fundamental teóricas y experimentales, con o sin los límites experimentales superior/inferior.

La curva de dispersión se presenta como la velocidad de fase de la onda de Rayleigh frente a la longitud de onda.

#### 6.5.1. Entradas de clase

Para la curva de dispersión del modo fundamental experimental:

`self.c_curve0`, `self.lambda_curve0`, `self.c_curve0_up`, `self.lambda_curve0_up`, `self.c_curve0_low`, `self.lambda_curve0_low`

#### 6.5.2. Entradas de función

Para la curva de dispersión del modo fundamental teórico:

- `c_t`: Velocidad de fase [ $m/s$ ]
- `lambda_t`: Longitud de onda [ $m$ ]

De la curva de dispersión del modo fundamental experimental se importa:

- `up_low_boundaries`:
  - 'yes': Se buscan límites superior/inferior para la curva de dispersión del modo fundamental experimental.
  - 'no': No se desean límites superior/inferior para la curva de dispersión del modo fundamental experimental.
- `FigWidth`: Ancho de la figura [cm]
- `FigHeight`: Altura de la figura [cm]
- `FigFontSize`: tamaño de fuente para etiquetas de eje [pt]

### 6.5.3. Salidas

Grafica la curvas de dispersión teórica y experimental con/sin límites.

## 6.6. modelo de velocidades

La función modelo de velocidades realiza la gráfica resultante con los parámetros resultantes del método de inversión del dual-annealing. Para esto realiza el cálculo del vector de profundidad.

### 6.6.1. Entradas de función

- `h`: Espesores de capa [m] (vector de longitud  $n$ ).
- `beta`: Velocidad de la onda de corte [m/s] (vector de longitud  $n + 1$ ).
- `n`: Número de capas de espesor finito.
- `FigWidth`: Ancho de la figura [cm]
- `FigHeight`: Altura de la figura [cm]
- `FigFontSize`: tamaño de fuente para etiquetas de eje [pt]

### 6.6.2. Salidas

Gráfica de el perfil de velocidades/modelo de velocidades en el dominio de la velocidad de onda de corte contra la profundidad o espesor del sitio.

## 7. Referencias

- Olafsdottir, E., Erlingsson, S., & Bessason, B. (2018). Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(2), 217-233. doi: 10.1139/cgj-2016-0302