

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**APLICACIÓN DEL ENSAYO MASW PARA LA DETERMINACIÓN DE
LA VELOCIDADES DE ONDAS DE CORTE Y CORRELACIONES
CON EL ENSAYO *CPT***

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Christian Jhosimar Rebata Lopez

ASESOR:

Jorge Víctor José Zegarra Pellanne

Lima, noviembre, 2021

Resumen

En la actualidad, conocer las propiedades del suelo, sin tener información previa del terreno en estudio, ha cobrado valor a través de los métodos geofísicos, especialmente en las obras de ingeniería civil. Las propiedades geofísicas están relacionadas con las propiedades geotécnicas mediante la velocidad de onda de corte (V_S), estas relacionan al módulo de corte (G), módulo de elasticidad (E), módulo de Poisson (ν), densidad (ρ), etc.

Por ello, la velocidad de onda de corte (V_S) es una de las propiedades que ha sido estudiada en las últimas décadas con mayor detalle, y es de vital importancia para el diseño sismo resistente de las estructuras. La velocidad de onda de corte es de vital importancia en evaluaciones del potencial de licuación, amplificaciones del suelo y clasificación sísmica del sitio (Kramer, 1996).

Los métodos geofísicos para investigaciones del terreno fueron desarrollados entre los años 1999 y 2000, empezando con el método del Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) por los ingenieros y científicos del Kansas Geological Survey (KGS); no obstante, en la actualidad el ensayo Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) es más aceptado debido a sus ventajas sobre su predecesor (SASW) (Park et al., 1999).

La presente tesis tiene como fin determinar perfiles de velocidad de onda de corte en función de la profundidad; para ello, pretende dar un conocimiento en la metodología del método MASW, explicando sus tres partes principales, a través de la metodología planteada: adquisición de datos de campo, análisis de dispersión y el análisis de inversión (Park et al. 1999). Para dicho fin, se toma como caso de estudio tres lugares ubicados en Europa: dos de ellos en Francia (Grenoble y Cadarache) y el último en Italia (Mirandola), lugares de donde se tiene información disponible de campo (esta información fue revisada y descargada, de libre acceso, en la página web interpacific.geopsy.org).

Para el desarrollo del trabajo se presenta primero las bases teóricas donde se apoya el método MASW, que son el análisis de dispersión mediante la aplicación del método de cambio de fase (phase-shift method) y el proceso de inversión mediante la aplicación del método de la matriz de rigidez (stiffness matrix method); así mismo, de los casos de estudio, se concluye la importancia de analizar varios casos, debido a que la metodología planteada es una metodología no determinista; para ello, se presentará la influencia de

algunos parámetros de entrada, para los modelos de tierra plana empleados, cuando estos varían, y se demostrará la sensibilidad del error (misfit) cuando se varía el número de capas usados en los modelos.

Además, a modo de complementar los resultados del método de MASW, se añaden las bases teóricas de las metodologías invasivas del terreno, tales como el *CPT* (cone penetration test); así como una relato de su literatura desde sus orígenes en la década de 1950 en la Universidad de Delft en Holanda, los parámetros obtenidos del mismo ensayo; así mismo, presentar la literatura disponible sobre la relación con el perfil de velocidad que es posible generar mediante correlaciones de diversos autores expertos en geotecnia; entre ellos, para el desarrollo de la tesis, se explicarán brevemente las correlaciones, a través de las ecuaciones planteadas por los siguientes autores: Hegazy & Mayne (1995), Piratheepan (2002), Mayne (2006), Robertson (2009) y McGann et al. (2015).



Dedicatoria

A mi familia por darme la vida y ayudarme en todo momento, muchas gracias mamá y papá; a mis hermanos: Luis, Camila y Sebastian, los amo y siempre veré que estén bien. Un agradecimiento muy especial a mi abuela Beatriz, porque siempre creyó en mí y me daba valor cuando yo, en ocasiones, lo perdía. Gracias a mis amigos por acompañarme durante en este camino y hacerlo más agradable para mí. Por último, un agradecimiento muy especial a mi asesor y amigo Jorge Zegarra Pellanne, por brindarme su tiempo y dedicación durante la ejecución del presente trabajo y los momentos vividos desde que fuimos alumno-profesor en los cursos de pregrado.

¡Gracias a todos ustedes!

Christian Rebata Lopez

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABLAS	x
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción general.....	1
1.2. Objetivos generales	3
1.3. Objetivos específicos.....	3
1.4. Planteamiento metodológico	4
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Marco teórico de ondas de cuerpo y superficie - <i>MASW</i>	6
2.1.1. Ondas de cuerpo	6
2.1.2. Ondas superficiales	7
2.2. Marco teórico del ensayo <i>CPT</i> y definición	10
3. CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO	15
3.1. Mirandola	16
3.2. Grenoble.....	16
3.3. Cadarache	17
4. CAPÍTULO IV: MÉTODOS NO INVASIVOS E INVASIVOS PARA LA CARACTERIZACIÓN SÍSMICA: <i>MASW</i> y correlaciones del ensayo <i>CPT</i>	18
4.1. Métodos no invasivos - Ensayo <i>MASW</i>	18
4.1.1. Adquisición de los datos	18
4.1.2. Análisis de dispersión.....	21
4.1.3. Análisis de inversión	26
4.1.4. Modelo de tierra en capas y parámetros del modelo.....	28
4.1.5. Cálculo de la curva de dispersión teórica.....	29
4.1.6. Cálculo del error estimado y minimización del error.....	31
4.2. Métodos invasivos – correlaciones del ensayo <i>CPT</i>	32
5. CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
5.1. Resultados y discusión – <i>MASW</i>	34
5.1.1. Importación de la data – inicio del algoritmo	34
5.1.2. Imágenes de dispersión	37

5.1.3. Curvas de dispersión experimental	42
5.1.4. Curvas de dispersión teórica – experimental	45
5.1.5. Perfil de velocidad de onda de corte	48
5.1.6. Discusión del desajuste entre las curvas de dispersión experimental y teórica	51
5.1.7. Comparación entre la tesis y el proyecto de la InterPACIFIC.....	61
5.2. Resultados y discusión – relación <i>MASW/CPT</i>	75
6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
7. CAPÍTULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 DEFORMACIÓN PRODUCIDA POR LAS ONDAS P FUENTE: GEOTHECNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING, 1996, p.19	6
FIGURA 2-2 DEFORMACIÓN PRODUCIDA POR LAS ONDAS SV FUENTE: GEOTHECNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING, 1996, p.19	7
FIGURA 2-3 DEFORMACIÓN PRODUCIDA POR LAS ONDAS RAYLEIGH FUENTE: GEOTHECNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING, 1996, p.20	8
FIGURA 2-4 DEFORMACIÓN PRODUCIDA POR LAS ONDAS LOVE FUENTE: GEOTHECNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING, 1996, p.20	8
FIGURA 2-5 COMPARACIÓN DE LAS ONDAS RAYLEIGH, DE COMPRESIÓN Y DE CORTE EN UN SEMI ESPACIO HOMOGÉNEO FUENTE: APLICACIONES. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA, 2021.	9
FIGURA 2-6 MOVIMIENTO HORIZONTAL Y VERTICAL DE LAS ONDAS RAYLEIGH FUENTE: GEOTHECNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING, 1996, p.161	10
FIGURA 2-7 ESQUEMA DE CONO DEL CPT Y CANTIDADES MEDIDAS EN EL ENSAYO FUENTE: MECÁNICA DOS SOLOS, 2006.	11
FIGURA 2-8 EJEMPLO DE ENSAYO CPT EN EJECUCIÓN FUENTE: HTTPS://ESTUDIOSGEOTECNICOS.INFO/INDEX.PHP/PENETRACION-ESTATICA-CPT-PIEZOCONO/	12
FIGURA 2-9 COMPORTAMIENTO DEL TIPO DE SUELOS A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL CPT FUENTE: ROBERTSON, 2016.	13
FIGURA 2-10 CORRELACIÓN ENTRE Q_c Y Φ' PARA ARENAS DE CUARZO NO CEMENTADAS	14
FIGURA 3-1 LOCALIZACIÓN DE LOS TRES SITIOS DE ESTUDIO: MIRANDOLA, GRENOBLE Y CADARACHE FUENTE: INTERPACIFIC PROJECT, 2016, p.223.....	15
FIGURA 3-2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA PARA MIRANDOLA FUENTE: INTERPACIFIC PROJECT, 2016.	16
FIGURA 3-3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA PARA GRENOBLE FUENTE: INTERPACIFIC PROJECT, 2016.	17
FIGURA 3-4 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA PARA CADARACHE FUENTE: INTERPACIFIC PROJECT, 2016.	17
FIGURA 4-1 TÍPICO PERFIL MEDIDO MASW PARA 24 RECIBIDORES FUENTE: TOOL FOR ANALYSIS OF MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW) FIELD DATA AND EVALUATION OF SHEAR WAVE VELOCITY PROFILES OF SOILS, 2017, p.219.....	19
FIGURA 4-2 REPRESENTACIÓN DE LA ADQUISICIÓN Y EL REGISTRO DE DATOS EN EL MASW FUENTE: MULTI-CHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES, 1999.	19
FIGURA 4-3 FLUJOGRAMA DE TRABAJO DEL MÉTODO DE CAMBIO DE FASE FUENTE: TOOL FOR ANALYSIS OF MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW) FIELD DATA AND EVALUATION OF SHEAR WAVE VELOCITY PROFILES OF SOILS, 2017, p.220.....	22
FIGURA 4-4 FLUJOGRAMA DE TRABAJO PROCESO DE INVERSIÓN FUENTE: TOOL FOR ANALYSIS OF MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW) FIELD DATA AND EVALUATION OF SHEAR WAVE VELOCITY PROFILES OF SOILS, 2017, p.224.....	28

FIGURA 4-5 MODELO DE CAPAS DE SUELO PARA EL ANÁLISIS DE INVERSIÓN FUENTE: TOOL FOR ANALYSIS OF MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW) FIELD DATA AND EVALUATION OF SHEAR WAVE VELOCITY PROFILES OF SOILS, 2017, p.223	29
FIGURA 5-1 REGISTRO MULTICANAL DEL FOLDER 211 PARA CADARACHE.....	35
FIGURA 5-2 REGISTRO MULTICANAL DEL FOLDER 117 PARA GRENOBLE.....	36
FIGURA 5-3 REGISTRO MULTICANAL DEL FOLDER 311 PARA MIRANDOLA	37
FIGURA 5-4 IMAGEN DE DISPERSIÓN 2-D PARA CADARACHE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	38
FIGURA 5-5 IMAGEN DE DISPERSIÓN 3-D PARA CADARACHE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	39
FIGURA 5-6 IMAGEN DE DISPERSIÓN 2-D PARA GRENOBLE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	40
FIGURA 5-7 IMAGEN DE DISPERSIÓN 3-D PARA GRENOBLE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	40
FIGURA 5-8 IMAGEN DE DISPERSIÓN 2-D PARA MIRANDOLA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	41
FIGURA 5-9 IMAGEN DE DISPERSIÓN 3-D PARA MIRANDOLA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	41
FIGURA 5-10 ILUSTRACIÓN DEL MODO FUNDAMENTAL Y SUPERIORES DE LAS ONDAS RAYLEIGH FUENTE: OFFSET AND LINEAR SPREAD GEOMETRY IN THE MASW METHOD, 2010, p.214.....	42
FIGURA 5-11 CURVA DE DISPERSIÓN EXTRAÍDA DE LA IMAGEN ESPECTRAL PARA CADARACHE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	43
FIGURA 5-12 CURVA DE DISPERSIÓN EXTRAÍDA DE LA IMAGEN ESPECTRAL PARA GRENOBLE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	44
FIGURA 5-13 CURVA DE DISPERSIÓN EXTRAÍDA DE LA IMAGEN ESPECTRAL PARA MIRANDOLA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	45
FIGURA 5-14 CURVA DE DISPERSIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTAL PARA CADARACHE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	46
FIGURA 5-15 CURVA DE DISPERSIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTAL PARA GRENOBLE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	47
FIGURA 5-16 CURVA DE DISPERSIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTAL PARA MIRANDOLA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	48
FIGURA 5-17 PERFIL DE VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE PARA CADARACHE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	49
FIGURA 5-18 PERFIL DE VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE PARA GRENOBLE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	50
FIGURA 5-19 PERFIL DE VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE PARA MIRANDOLA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	51
FIGURA 5-20 DESAJUSTE (MISFIT) ENTRE LAS CURVAS TEÓRICA Y EXPERIMENTAL EN UN MODELO DE 6 CAPAS PARA CADARACHE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	52
FIGURA 5-21 DESAJUSTE (MISFIT) ENTRE LAS CURVAS TEÓRICA Y EXPERIMENTAL EN UN MODELO DE 4 CAPAS PARA CADARACHE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	53
FIGURA 5-22 IMAGEN DE DISPERSIÓN 2-D Y CURVAS DE DISPERSIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTAL PARA CADARACHE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	54

FIGURA 5-23 DESAJUSTE (MISFIT) ENTRE LAS CURVAS TEÓRICA Y EXPERIMENTAL EN UN MODELO DE 6 CAPAS PARA GRENOBLE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	55
FIGURA 5-24 DESAJUSTE (MISFIT) ENTRE LAS CURVAS TEÓRICA Y EXPERIMENTAL EN UN MODELO DE 4 CAPAS PARA GRENOBLE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	56
FIGURA 5-25 IMAGEN DE DISPERSIÓN 2-D Y CURVAS DE DISPERSIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTAL PARA GRENOBLE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	57
FIGURA 5-26 DESAJUSTE (MISFIT) ENTRE LAS CURVAS TEÓRICA Y EXPERIMENTAL EN UN MODELO DE 6 CAPAS PARA MIRANDOLA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	58
FIGURA 5-27 DESAJUSTE (MISFIT) ENTRE LAS CURVAS TEÓRICA Y EXPERIMENTAL EN UN MODELO DE 4 CAPAS PARA MIRANDOLA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	59
FIGURA 5-28 IMAGEN DE DISPERSIÓN 2-D Y CURVAS DE DISPERSIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTAL PARA MIRANDOLA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	60
FIGURA 5-29 COMPARACIÓN ENTRE CURVAS DE DISPERSIÓN EXPERIMENTAL DEL INTERPACIFIC PROJECT Y LA TESIS PARA CADARACHE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	63
FIGURA 5-30 COMPARACIÓN ENTRE PERFILES DE VELOCIDAD DE VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE (V_s) DEL INTERPACIFIC Y LA TESIS PARA CADARACHE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	64
FIGURA 5-31 IMÁGENES DE DISPERSIÓN DE LA ONDA RAYLEIGH DE ALGUNOS REGISTROS ANALIZADOS PARA CADARACHE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	65
FIGURA 5-32 COMPARACIÓN ENTRE CURVAS DE DISPERSIÓN EXPERIMENTAL DEL INTERPACIFIC PROJECT Y LA TESIS PARA GRENOBLE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	67
FIGURA 5-33 COMPARACIÓN ENTRE PERFILES DE VELOCIDAD DE VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE (V_s) DEL INTERPACIFIC Y LA TESIS PARA GRENOBLE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	68
FIGURA 5-34 IMÁGENES DE DISPERSIÓN DE LA ONDA RAYLEIGH DE ALGUNOS REGISTROS ANALIZADOS PARA GRENOBLE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	69
FIGURA 5-35 COMPARACIÓN ENTRE CURVAS DE DISPERSIÓN EXPERIMENTAL DEL INTERPACIFIC PROJECT Y LA TESIS PARA MIRANDOLA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	70
FIGURA 5-36 COMPARACIÓN ENTRE PERFILES DE VELOCIDAD DE VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE (V_s) DEL INTERPACIFIC Y LA TESIS PARA MIRANDOLA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	71
FIGURA 5-37 IMÁGENES DE DISPERSIÓN DE LA ONDA RAYLEIGH DE ALGUNOS REGISTROS ANALIZADOS PARA MIRANDOLA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	73
FIGURA 5-38 BANDA DE FRECUENCIAS ASOCIADAS AL TIPO DE DATA EMPLEADA POR LOS GRUPOS DE TRABAJO DEL INTERPACIFIC PROJECT PARA CADARACHE FUENTE: INTERPACIFIC, 2016, p.235.....	73
FIGURA 5-39 BANDA DE FRECUENCIAS ASOCIADAS AL TIPO DE DATA EMPLEADA POR LOS GRUPOS DE TRABAJO DEL INTERPACIFIC PROJECT PARA GRENOBLE FUENTE: INTERPACIFIC, 2016, p.232	73
FIGURA 5-40 BANDA DE FRECUENCIAS ASOCIADAS AL TIPO DE DATA EMPLEADA POR LOS GRUPOS DE TRABAJO DEL INTERPACIFIC PROJECT PARA MIRANDOLA FUENTE: INTERPACIFIC, 2016, p.228.....	73
FIGURA 5-41 RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DE ENSAYOS CPT EN EL ÁREA DEL PUERTO DE LANDEY FUENTE: 16 TH EUROPEAN CONFERENCE ON E. ENGINEERING, 2018.	76

FIGURA 5-42 PERFILES DE V_s OBTENIDOS PARA EL ÁREA DE LANDEY BASADOS EN CORRELACIONES CPT EN CONTRASTE CON LA OBTENIDA POR EL MÉTODO MASW FUENTE: 16TH EUROPEAN CONFERENCE ON E. ENGINEERING, 2018..... 76

FIGURA 5-43 PERFILES DE $V_{s,BIAS}$ OBTENIDOS PARA DIFERENTES CORRELACIONES DEL ENSAYO CPT FUENTE: 16TH EUROPEAN CONFERENCE ON E. ENGINEERING, 2018. 77



LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1 CORRELACIONES EMPÍRICAS ENTRE Q_c , ϕ' Y E'	14
TABLA 5.1 REGISTROS DISPONIBLES DE ENSAYOS MASW REALIZADOS PARA CADARACHE.....	34
TABLA 5.2 REGISTROS DISPONIBLES DE ENSAYOS MASW REALIZADOS PARA GRENOBLE	35
TABLA 5.3 REGISTROS DISPONIBLES DE ENSAYOS MASW REALIZADOS PARA MIRANDOLA.....	36
TABLA 5.4 PARÁMETROS DEL MODELO DE TIERRA PLANA PARA CADARACHE	45
TABLA 5.5 PARÁMETROS DEL MODELO DE TIERRA PLANA PARA GRENOBLE	46
TABLA 5.6 PARÁMETROS DEL MODELO DE TIERRA PLANA PARA MIRANDOLA	47
TABLA 5.7 PARÁMETROS DEL MODELO DE TIERRA PLANA DE 6 CAPAS PARA CADARACHE	52
TABLA 5.8 PARÁMETROS DEL MODELO DE TIERRA PLANA DE 4 CAPAS PARA CADARACHE	53
TABLA 5.9 PARÁMETROS DEL MODELO DE TIERRA PLANA DE 6 CAPAS PARA GRENOBLE	54
TABLA 5.10 PARÁMETROS DEL MODELO DE TIERRA PLANA DE 4 CAPAS PARA GRENOBLE	55
TABLA 5.11 PARÁMETROS DEL MODELO DE TIERRA PLANA DE 6 CAPAS PARA MIRANDOLA	57
TABLA 5.12 PARÁMETROS DEL MODELO DE TIERRA PLANA DE 4 CAPAS PARA MIRANDOLA	58
TABLA 5.13 CLASIFICACIÓN SÍSMICA DE SUELOS	60
TABLA 5.14 RANGO DE VELOCIDADES DE ONDAS DE COMPRESIÓN PARA SUELOS Y ROCAS.....	61
TABLA 5.15 ERROR OBTENIDO (MISFIT) SEGÚN EL NÚMERO DE CAPAS PARA CADARACHE, GRENOBLE Y MIRANDOLA	61
TABLA 5.16 MÉTODOS ADOPTADOS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA DATA DE ONDAS SUPERFICIALES.....	74
TABLA 5.17 RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SITIO Y DEL ENSAYO MASW EN EL PUERTO DE LANDEY.....	75
TABLA 6.1 ERROR OBTENIDO (MISFIT) SEGÚN EL NÚMERO DE CAPAS PARA CADARACHE, GRENOBLE Y MIRANDOLA	79

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción general

Hoy en día, conocer las propiedades del suelo, sin tener información a priori del terreno en estudio, ha cobrado valor a través de los métodos geofísicos, especialmente en las obras de ingeniería civil. Las propiedades geofísicas están relacionadas con las propiedades geotécnicas mediante la velocidad de onda de corte (V_s), estas relacionan al módulo de corte (G), módulo de elasticidad (E), módulo de Poisson (ν), densidad (ρ), etc. Por ello, la velocidad de onda de corte (V_s) es una de las propiedades que ha sido estudiada en las últimas décadas con mayor detalle, y es de vital importancia para el diseño sísmo resistente de las estructuras. La velocidad de onda de corte es de vital importancia en evaluaciones del potencial de licuación, amplificaciones del suelo y clasificación sísmica del sitio (Kramer, 1996).

Diversas normas clasifican a los tipos de suelo en función de este parámetro, y desde ese punto de partida se han desarrollado avances importantes en la ingeniería geotécnica, el desarrollo de equipos sofisticados y personal cada vez más calificado.

Con el fin de realizar investigaciones de dicho tipo, se realizan exploraciones geofísicas, que son métodos no invasivos en el terreno; entendiendo que los métodos invasivos son los que requieren realizar excavaciones, hincados y en muchos casos esto resulta costoso según la envergadura del proyecto.

Para tales investigaciones geofísicas, entre los años 1999 y 2000, fue desarrollado el método SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) por los ingenieros y científicos del Kansas Geological Survey (KGS); en la actualidad el ensayo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) es más aceptado debido a las ventajas sobre su predecesor (SASW) (Park et al., 1999).

Una de las ondas menos utilizadas en el pasado era la onda de superficie, también conocida como Rayleigh o *ground roll*, por interferir con las reflexiones y refracciones de las ondas de sonido, necesarias para los estudios sísmicos. Por esto, las ondas de superficie eran generalmente filtradas de los sismogramas.

En las investigaciones del KGS se pudo determinar que las ondas de superficie tienen una componente principal cercana al 98% de onda S y menos de 2% de onda P. También se

detalla de las investigaciones que las ondas de superficie se atenúan a mayores frecuencias y con una disminución de velocidad de fase (Park et al., 1999).

El presente trabajo presenta la metodología del método MASW, explicando sus tres partes principales: adquisición de datos de campo, análisis de dispersión y el análisis de inversión (Park et al. 1999). Para dicho fin, se toma como caso de estudio tres lugares de donde se tiene información disponible de campo. Estos lugares están ubicados en Europa, dos de ellos en Francia (Grenoble y Cadarache) y el último en Italia (Mirandola). Además, cabe mencionar que esta información fue revisada y descargada, por ser de libre acceso, en la página web de interpacific.geopsy.org.

Además, a modo de complementar los resultados del método de MASW, se añaden las bases teóricas de una de las metodologías invasivas del terreno más empleadas: el *CPT* (*cone penetration test*), para lo cual, se presenta su definición; del mismo modo, una referencia desde sus orígenes en la década de 1950 en la Universidad de Delft en Holanda, así como los parámetros obtenidos del mismo ensayo; y se presenta su relación con el perfil de velocidades, mediante correlaciones de diversos autores ; entre ellas, las ecuaciones planteadas por: Hegazy & Mayne (1995), Piratheepan (2002), Mayne (2006), Robertson (2009) y McGann et al. (2015).

Es importante señalar que no se cuenta con la data disponible de ensayos *CPT*, para los sitios estudiados (Grenoble, Cadarache y Mirandola), para los que solo se cuenta con la data de los ensayos MASW (que fue descargada de internet); sin embargo, se realizó la revisión exhaustiva del ensayo *CPT* y los parámetros que se obtienen de este ensayo.

Finalmente, en el presente trabajo se establecen las bases para que profesionales no expertos entiendan uno de los objetivos más importantes de la ingeniería geotécnica: mientras más estudios geotécnicos e investigaciones se puedan realizar en el terreno, se puede mejorar la caracterización del terreno, tomando en cuenta la envergadura del proyecto en el que se esté trabajando y las limitaciones del mismo.

1.2. Objetivos generales

Obtener los perfiles de velocidad de ondas de corte de estratos de suelo para el terreno, a través del análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), explicando su enfoque y sus tres principales pasos: adquisición de datos, análisis de dispersión y análisis de inversión. Con el último paso, obtener el desajuste entre las curvas de dispersión experimental y teóricas para verificar que se ha obtenido un perfil de velocidad resultante aceptable en los sitios de estudio, cuantificando su desajuste (*misfit*).

Además de ello presentar las bases teóricas de los ensayos *CPT* y correlaciones desarrolladas a la fecha entre sus parámetros y la velocidad de onda de corte (V_s), mediante ecuaciones desarrolladas por diversos autores expertos en el campo de la geotecnia.

1.3. Objetivos específicos

- Investigar en los fundamentos teóricos de la literatura disponible a la fecha, con relación a las mediciones de velocidad de onda de corte, a través del estudio de las ondas superficiales Rayleigh;
- Analizar la data disponible de los ensayos disponibles en la página de la InterPacific y con ello adquirir la información disponible para realizar los pasos del análisis de dispersión e inversión con fines de obtener los perfiles de velocidad de onda de corte en función de la profundidad;
- Descripción geotécnica de los sitios de estudio, basados en la información disponible para poder estimar la densidad y el módulo de poisson (o la velocidad de onda de compresión), que son parámetros de entrada en el modelo a plantear;
- Realizar el análisis de dispersión para los registros escogidos de los sitios de estudio, tomando en cuenta las implicancias del *phase-shift method* (Park et al.1998);
- Realizar el análisis de inversión, tomando en cuenta las implicancias de un modelo de suelo en capas semi infinitas y aplicar las formulaciones necesarias para hallar la curva de dispersión teórica, por medio del *stiffness matrix method* (Kausel and Roësset, 1981); y
- Analizar la curva de dispersión teórica obtenida y compararla con la curva de dispersión experimental, evaluando el desajuste entre ambas y dando como resultado del análisis de inversión un perfil de velocidad de onda de corte que represente de forma realista las características geotécnicas del sitio de estudio; así

mismo, dar conclusiones y recomendaciones en base al análisis realizado para personas no expertas en este campo.

- Investigar en los fundamentos teóricos de la literatura disponible a la fecha, y presentar la base teórica de los ensayos *CPT*; así como, presentar las correlaciones que fueron realizadas por diversos autores, expertos en el campo de la geotecnia para determinación de las velocidades de corte (V_s).
- A partir del desarrollo de la base teórica del ensayo *CPT*, concluir en base a los estudios disponibles, las ventajas que tendría aplicar métodos invasivos en apoyo a los no invasivos, al momento de determinar los perfiles de velocidad en función de la profundidad.

1.4. Planteamiento metodológico

Para el desarrollo de la tesis y alcanzar los objetivos planteados previos se ha definido la siguiente metodología de trabajo:

1.4.1.1. Revisión de la literatura

- Revisión de las definiciones de ondas de cuerpo y superficiales;
- Revisión de las formulaciones teóricas del *phase-shift method* y del *stiffness matrix method*, así como sus antecedentes;
- Variantes que influyen en la resolución de los datos y elección de parámetros para el modelo de tierra plana adoptado en la metodología *MASW*; y
- Revisión de la literatura disponible del ensayo *CPT* y de las correlaciones presentadas por diversos autores para el cálculo de la velocidad de onda de corte (V_s).

1.4.1.2. Elaboración de la metodología del trabajo para estudiar el método *MASW*

- Presentar la metodología planteada en el método del análisis multicanal de ondas superficiales (*MASW*), explicando dos flujogramas la metodología seguida en el análisis de dispersión e inversión, basadas en los antecedentes teóricos y principalmente en el *phase-shift method* y del *stiffness matrix method*, que son la base teórica de las rutinas de cálculo necesarias para obtener el perfil de velocidad en función de la profundidad, que es el objetivo final del método *MASW*, cuando no se tiene información previa de ensayos geotécnicos del terreno a estudiar.

1.4.1.3. Elaboración de la metodología del trabajo para el cálculo de la velocidad de corte mediante correlaciones del ensayo *CPT*

- Presentar la metodología planteada, a través de las ecuaciones desarrolladas por expertos, en el cálculo de las velocidades de onda de corte (V_S), explicando la terminología de estas ecuaciones; así como dar un valor promedio del cálculo de esta V_S obtenida por los siguientes autores: Hegazy & Mayne (1995), Piratheepan (2002), Robertson (2009) y McGann et al. (2015); introduciendo el concepto de $V_{S,bias}$ (*velocity bias*) usado para indicar la diferencia entre los valores de V_S obtenidos medidos por el método *MASW* y los obtenidos por los estimados con los *CPTs*, dando un ratio entre los valores estimados y medidos.



2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco teórico de ondas de cuerpo y superficie - *MASW*

Cuando un sismo ocurre, es posible que dos tipos de ondas se produzcan, estas ondas son conocidas como las ondas de cuerpo y de superficie (Kramer, 1996). Se presenta a continuación definiciones relevantes que servirán para un mejor entendimiento del trabajo:

2.1.1. Ondas de cuerpo

Las ondas de cuerpo pueden viajar por el interior de la tierra, y existen de dos tipos: las cuales pueden ser de compresión (ondas P) o de corte (ondas S).

2.1.1.1. Ondas de compresión (ondas P)

Son las ondas que transmiten las partículas del medio en dirección de la propagación longitudinal, produciendo compresiones y dilataciones en el medio. Es la onda más rápida de entre todas las ondas sísmicas existentes (alcanzando más de 5 km/s en las rocas graníticas cercanas a la superficie, y alcanzan más de 11 km/s en el interior de la tierra) (Benito, 2021).

Además, esta onda es la primera en ser registrada por los sismogramas; por ello, se les conoce también como ondas primarias. Estas ondas son análogas a las ondas del sonido, ya que el movimiento de una partícula que viaja por una onda P es paralelo a la dirección del movimiento. Estas ondas pueden viajar a través de sólidos y fluidos (Kramer, 1996). En la Figura 2-1 se presenta la acción de la onda P, a través de un medio no perturbado.

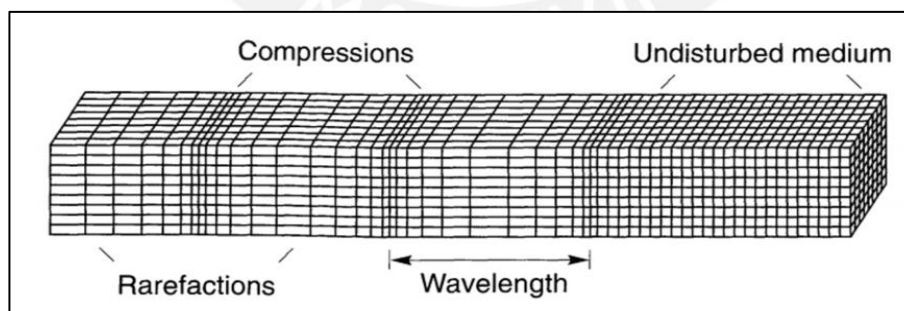


Figura 2-1 Deformación producida por las ondas P
Fuente: Geotechnical Earthquake Engineering, 1996, p.19

2.1.1.2. Ondas de corte (ondas S)

Las ondas S, también conocidas como ondas secundarias, de corte u ondas transversales, causan una deformación a cortante mientras viajan a través de un material (Kramer, 1996).

El movimiento de las partículas del medio se desplaza perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda. La onda S llega después que la onda P, y es la segunda en llegar; por ello, el nombre de ondas secundarias. Además, las ondas S no se propagan a través de los fluidos. En la Figura 2-2 se presenta la acción de la onda SV, a través de un medio no perturbado.

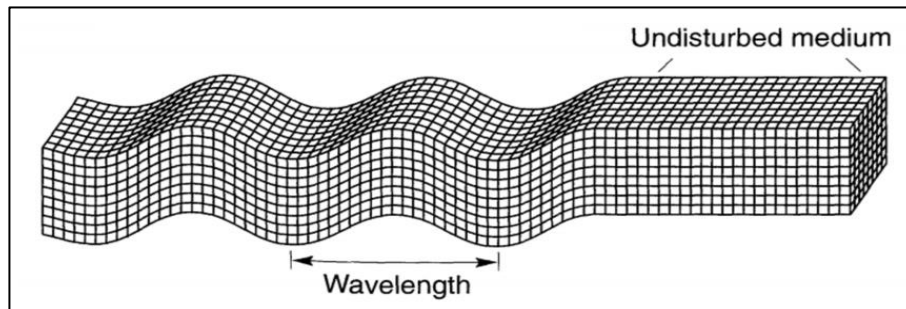


Figura 2-2 Deformación producida por las ondas SV
Fuente: *Geotechnical Earthquake Engineering*, 1996, p.19

2.1.2. Ondas superficiales

Las ondas que viajan por la superficie son las ondas superficiales y la amplitud de estas se hace máxima en la superficie y es casi nula en las grandes profundidades.

Las ondas superficiales resultan de la interacción entre ondas de cuerpo y la superficie, y las capas superficiales de la tierra. Estas viajan a lo largo de la superficie de la tierra con amplitudes que decrecen aproximadamente de un modo exponencial con la profundidad (Kramer, 1996).

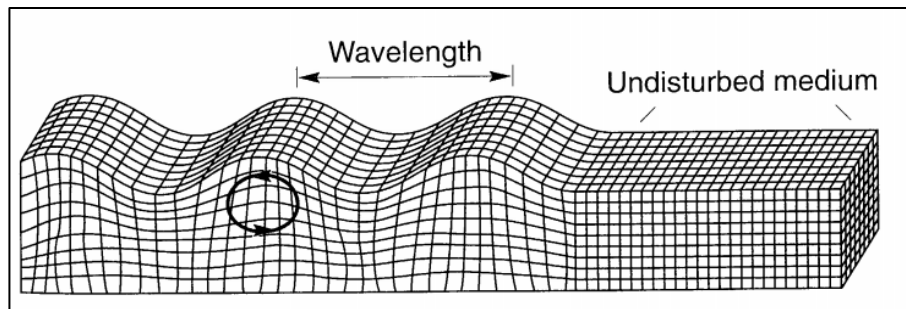
Las ondas más importantes de este tipo de ondas son las ondas Rayleigh y las ondas Love, estas últimas sobre todo para fines ingenieriles.

2.1.2.1. Ondas Rayleigh

También llamadas Groundroll, estas ondas son producidas por la interacción de ondas P y ondas SV con la superficie de la tierra, involucrando con ello movimientos de la partícula verticales y horizontal (movimientos elípticos) (Kramer, 1996).

Estas ondas son las más lentas en velocidad con que viaja la energía, que van de 1 a 4 km/s (Benito, 2021). Existen también diversos modos de propagación de la onda Rayleigh, entre ellos el modo fundamental y modos superiores. El modo cuya amplitud no cambia de signo con la profundidad es llamado modo fundamental, el que cambie de signo una vez es el llamado primer modo superior, el que cambia dos, segundo modo superior, etc. (Benito,

2021). Serán este tipo de ondas de especial interés y se tomarán como punto de partida en el desarrollo de la presente tesis. En la Figura 2-3 se presenta la acción de la onda Rayleigh, a través de un medio no perturbado.

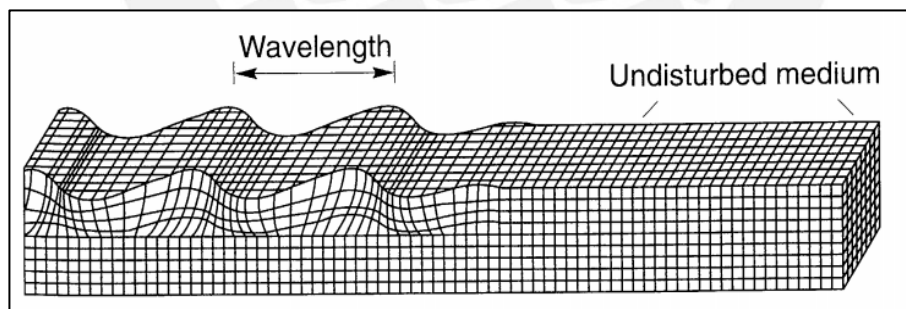


*Figura 2-3 Deformación producida por las ondas Rayleigh
Fuente: Geotechnical Earthquake Engineering, 1996, p.20*

2.1.2.2. Ondas Love

Estas ondas resultan de la interacción de las ondas SH con capas superficiales suaves y no tienen componente vertical del movimiento de la partícula. Estas son de periodo muy largo (Kramer, 1996).

Las ondas Love son más lentas que las ondas de cuerpo y la velocidad varía de 1 a 4,5 km/s, siendo más veloces que las ondas Rayleigh (Benito, 2021). En la Figura 2-4 se presenta la acción de la onda Love, a través de un medio no perturbado.



*Figura 2-4 Deformación producida por las ondas Love
Fuente: Geotechnical Earthquake Engineering, 1996, p.20*

Finalmente, en la Figura 2-5 se presenta una comparación entre la velocidad de propagación de las ondas Rayleigh, las ondas P (compresión), y las ondas S (corte) para un semiespacio homogéneo. Se puede notar que las ondas Rayleigh frente a las V_S son ligeramente menores para todos los valores del coeficiente de poisson menores a 0.5; por lo que una buena estimación para valores de Poisson menores de 0.5 es que la onda

Rayleigh se aproxima a 0.93 veces la velocidad de la onda de corte (V_S) (Bessason & Erlingsson, 2011).

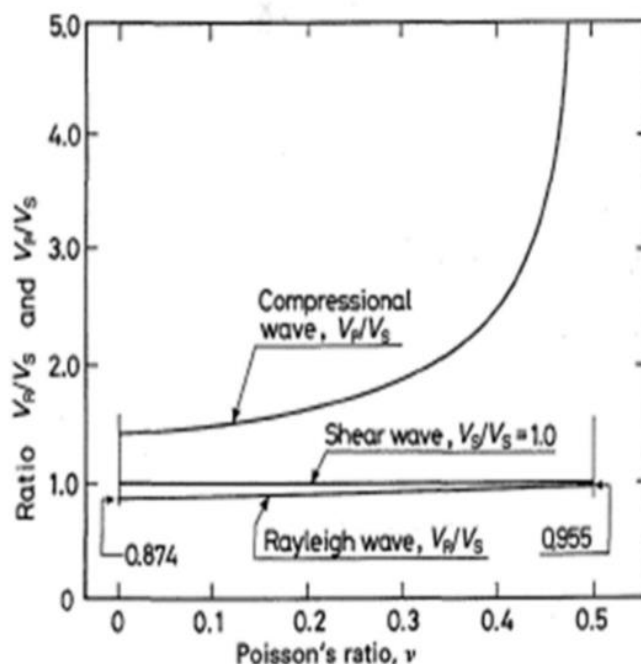


Figura 2-5 Comparación de las ondas Rayleigh, de compresión y de corte en un semi espacio homogéneo
Fuente: Aplicaciones. Prospección geofísica, 2021.

2.1.2.3. Dispersión de las ondas superficiales

Las ondas superficiales a diferencia de las ondas de cuerpo poseen propiedades dispersivas; estas propiedades se refieren a que longitudes de onda diferentes tienen diferentes profundidades de penetración y se propagan con diferente velocidad. En resumen, la dispersión es un fenómeno en que las ondas con diferente frecuencia (y diferente longitud de onda) se propagan con diferente velocidad (Kramer, 1996).

Para un semi espacio homogéneo, las ondas Rayleigh están relacionadas con las ondas de cuerpo por el coeficiente de Poisson. Mientras que las velocidades de las ondas de cuerpo son constantes con la profundidad, la velocidad de las ondas Rayleigh varían independientemente de la frecuencia, y por otro lado la velocidad de las ondas Love varía con la frecuencia para los límites superiores e inferiores del semi espacio homogéneo.

Por tanto, las ondas Love son claramente dispersivas, mientras que las ondas Rayleigh, en un semi espacio homogéneo, son no dispersivas. Sin embargo, en superficies cercanas a la tierra la rigidez de los suelos y de la roca usualmente incrementan con la profundidad. Además, dado que la profundidad a la que una onda de Rayleigh causa desplazamientos

significativos aumenta con aumentos de la longitud de onda (Ver Figura 2-6), las ondas Rayleigh con largas longitudes de onda (baja frecuencia) pueden propagarse más rápido que las ondas Rayleigh de corta longitud de onda (alta frecuencia).

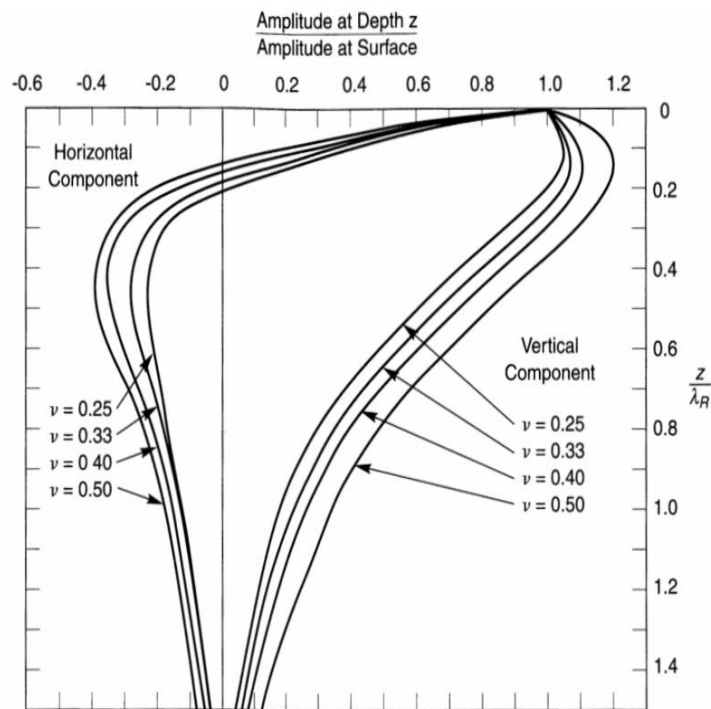


Figura 2-6 Movimiento horizontal y vertical de las ondas Rayleigh
Fuente: Geotechnical Earthquake Engineering, 1996, p.161

Por tanto, en el mundo real las ondas Rayleigh son también dispersivas (Kramer, 1996), y estas son por varias razones de especial interés en el campo de la ingeniería, y serán estudiadas con mayor detalle para los sitios de estudio en la presente tesis.

2.2. Marco teórico del ensayo *CPT* y definición

Los ensayos *CPT* (*cone penetration test*) son considerados internacionalmente como una de las herramientas más importantes de la investigación geotécnica. Este ensayo fue inicialmente desarrollado en Holanda en la década de 1950, en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad de Delft; actualmente es considerado también como uno de los ensayos in situ más utilizados y explicado también en diversas normas internacionales, tales como el ASTM, el Eurocódigo, entre otras.

El ensayo de *CPT* o llamado también prueba de penetración de cono o “cono holandés” en principio consiste en empujar en el suelo una punta cónica (con ángulo de apertura de 60°) y con un área de la sección transversal del cono de 10 cm^2 a una velocidad constante de 20 mm/s .

En el ensayo *CPT* se mide la resistencia del cono (q_c) y lateral (f_s); por medio del hincado del sistema hidráulico, con una punta cónica de acero estándar; ello es representado en la Figura 2-7. Mediante un transductor colocado dentro de la punta es posible medir durante el hincado, la llamada resistencia del cono q_c , y la resistencia lateral f_s se mide a lo largo de la manga mediante otro transductor colocado junto a la superficie de la manga.

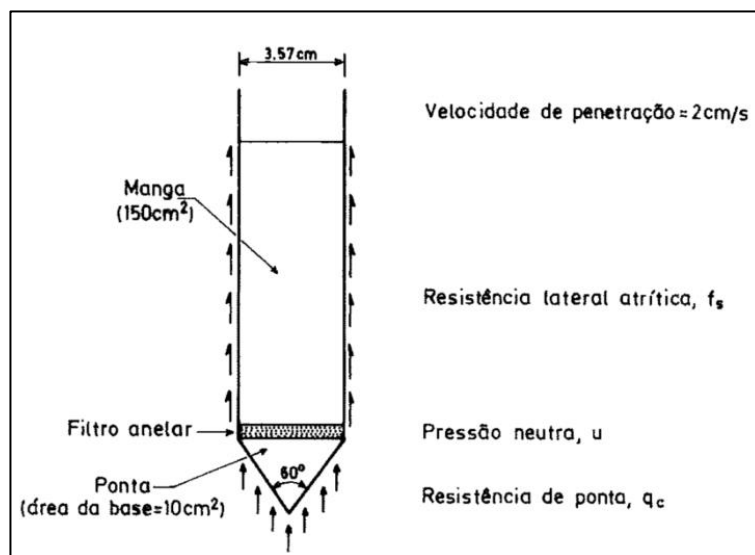


Figura 2-7 Esquema de cono del CPT y cantidades medidas en el ensayo
Fuente: Mecânica dos Solos, 2006.

Como se muestra en la Figura 2-7, entre la punta cónica y la manga hay un filtro de anillo (constituido por una liga metálica porosa) que permite la transmisión de las presiones de agua en el suelo a un transductor de presión alojado dentro del dispositivo, luego se miden la presión de poros de penetración. Esta versión antes descrita del dispositivo está designada como “piezocono” o a lo que también se le conoce como *CPT_u*; añadiendo la “u” al final del acrónimo de *CPT*, ya que indica que es posible que durante la ejecución del ensayo se determine, además de la resistencia del terreno, el valor de la presión intersticial detrás de la punta.

En la Figura 2-8 se presente un ejemplo del ensayo *CPT* en campo, y se puede ver la punta y las barras que se van añadiendo a medida que avanza la penetración; dentro de las barras se pasa un cable para conectarse a los diversos transductores de la punta. También hay una caja de lectura digital conectada al cable mencionado anteriormente; esta caja, a su vez, está conectada a un microordenador que procesa y almacena las lecturas de las diferentes cantidades. El sistema permite un registro continuo de las tres cantidades referidas (q_c , f_s

y u), un registro que se observa en el monitor durante la prueba y que se obtiene al final en un archivo.



Figura 2-8 Ejemplo de ensayo CPT en ejecución

Fuente: <https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/penetracion-estatica-cpt-piezocono/>

El programa de procesamiento del registro también permite obtener la denominada relación de fricción, tal como se presenta en la Ecuación 2.1.

$$FR = \frac{f_s}{q_c} (\%) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde

FR = relación de fricción (%)

f_s = resistencia de la fricción en el fuste (kPa)

q_c = resistencia del cono (kPa)

La Ecuación 2.1 resulta muy útil para la identificación del tipo de estrato de suelo atravesado. La Figura 2-9 muestra un diagrama que permite deducir el tipo de terreno que es atravesado con base a los valores de la relación de fricción y de la resistencia normalizada en la punta, la cual es actualizada por Robertson (2009). La razón de ser de las propuestas con este diagrama radica en que, a diferencia del SPT (*standard penetration test*), con el CPT o CPTu no es posible recolectar muestras. Por lo tanto, el CPT es estrictamente una prueba "in situ", generalmente realizada en complemento de los sondeos

de perforación que permiten identificar visualmente la estratigrafía del terreno. Sin embargo, en situaciones en las que ya existen campañas de investigación geotécnica previas en localidades cercanas, el *CPT* se utiliza a veces de forma aislada, naturalmente con el objetivo de permitir la estimación de parámetros mecánicos para el proyecto. También vale la pena mencionar la utilidad particular del *CPT* y el *CPTu* en una caracterización de suelo en el océano, por ejemplo, para el diseño de estructuras localizadas a lo largo de la costa usada para la investigación y exploración de petróleo. Para motivos de la tesis no se explicará más acerca del método de *CPTu*, no siendo necesario mayores definiciones que las que explican en el presente sub capítulo.

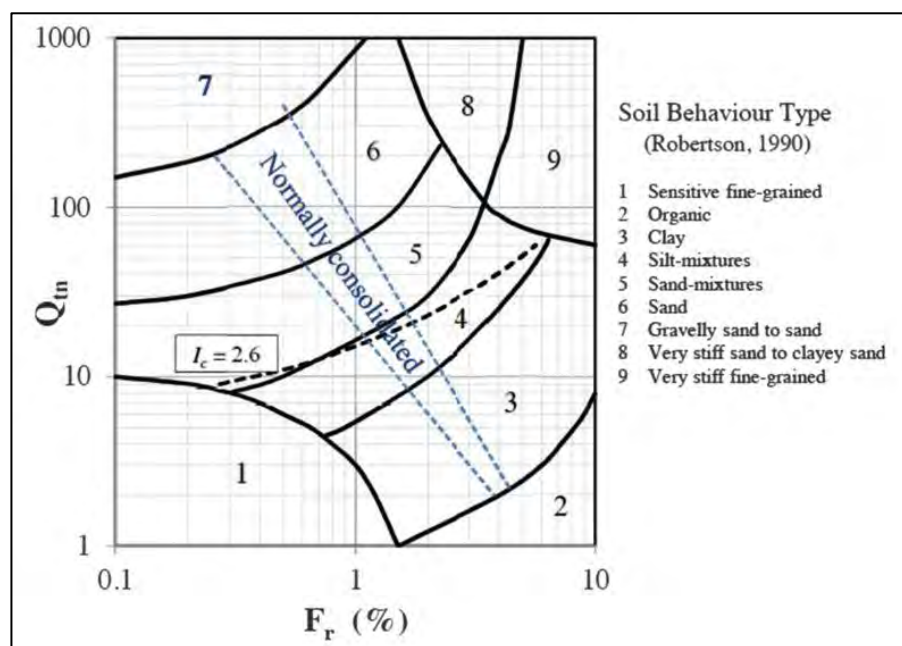


Figura 2-9 Comportamiento del tipo de suelos a partir de los resultados del CPT
Fuente: Robertson, 2016.

De la Figura 2-9 se resalta que se relacionan la relación de fricción F_r y la resistencia del cono normalizada (Q_{tn}) que requiere la medida de presión de poros para realizar la corrección. La diferencia entre q_t (resistencia del cono corregida) y q_c (resistencia del cono) es generalmente mínima; la primera es la que se utiliza para el cálculo de la resistencia del cono normalizada, para más detalle se recomienda revisar la guía de CPT para ingeniería geotécnica preparada por Robertson (2016), para efectos de la tesis se presentan las bases del ensayo CPT.

Adicionalmente, en la Figura 2-10 se incluye una correlación empírica entre la resistencia del cono (q_c) y el ángulo de fricción de arenas (ϕ'). Esta correlación es válida para arenas cuyas partículas están formadas esencialmente por cuarzo y que no presentan cementación;

se debe tener en cuenta además que los valores del ángulo de fricción para un suelo dado dependen naturalmente de la tensión de reposo efectiva en la profundidad en cuestión.

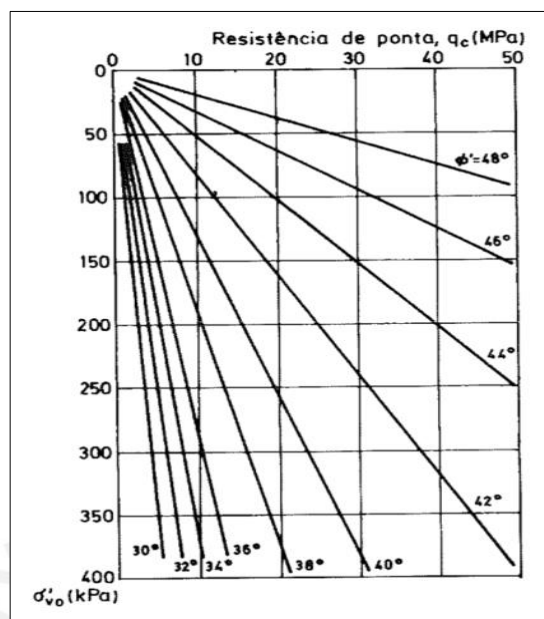


Figura 2-10 Correlación entre q_c y ϕ' para arenas de cuarzo no cementadas
Fuente: Robertson & Campanella, 1983.

Adicionalmente, la Tabla 2.1, perteneciente al Eurocódigo 7, se presenta una correlación empírica entre la resistencia en la punta del *CPT*, q_c , y el ángulo de fricción (ϕ'), y el módulo de deformabilidad (E') de arenas de cuarzo o feldespato.

Tabla 2.1 Correlaciones empíricas entre q_c , ϕ' y E'

Compacidad	q_c (Mpa)	ϕ' (°)	E' (Mpa)
Muy baja	0 – 2,5	29 – 32	<10
Baja	2,5 – 5,0	32 – 35	10 – 20
Media	5,0 – 10,0	35 – 37	20 – 30
Alta	10,0 – 20,0	37 – 40	30 – 60
Muy alta	> 20,0	40 – 42	60 – 90

Fuente: Eurocódigo 7, 1997

Se señala también que, en suelos arcillosos, el *CPT* implica naturalmente la carga en condiciones no drenadas. Como primera aproximación, se puede usar la siguiente correlación entre q_c y la resistencia del suelo no drenado C_u , donde σ_{vo} es la tensión vertical total en reposo.

$$\frac{q_c - \sigma_{vo}}{C_u} = 15 \pm 5 \quad (\text{Ec. 2.2})$$

3. CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

Con el fin de desarrollar los objetivos propuestos en el presente trabajo de tesis, se propone estudiar los sitios de Mirandola (Italia), Cadarache (Francia) y Grenoble (Francia). En la Figura 3-1 se presenta la localización de los tres sitios de estudio.

Para ello, será necesario describir los sitios de estudio con la información disponible, ya que, como parte de la metodología planteada, no se conoce previamente mayor información geotécnica, más allá de la observada en el sitio; con ello, a modo de poder definir el modelo de tierra plana dividido en capas a usarse para cada sitio como parte de la metodología propuesta, estimando con ello valores acordes a sus características geotécnicas con propiedades físicas de materiales de similares características, ya que no se cuenta con ensayos geotécnicos previos; no obstante, se escogieron estos lugares, ya que existía data disponible para poder descargar de la web: interpacific.geopsy.org. Estos datos forman parte del documento: *“Interpacific project: comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization, Part I: Intra-comparison of surface wave methods (Garofalo et al.,2016)”*

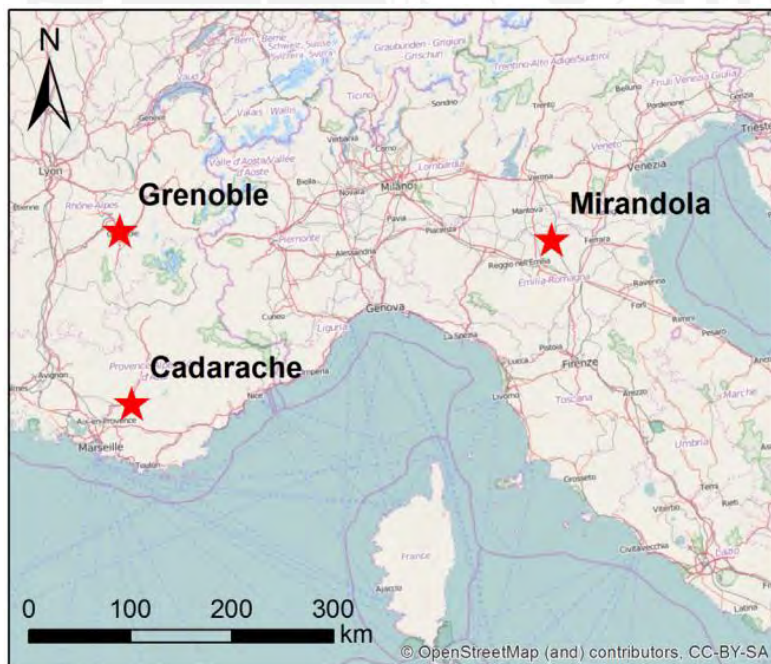


Figura 3-1 Localización de los tres sitios de estudio: Mirandola, Grenoble y Cadarache
Fuente: Interpacific project, 2016, p.223.

3.1. Mirandola

La geología de este sitio consiste en depósitos aluviales con capas arenos arcillosas sobre capas marinas más rígidas y depósitos de transición similares a rocas de la edad del medio Pleistoceno en una profundidad de entre 50 a 150 m desde el suelo. Se trataría de un suelo blando sobre roca, con 100 m de suelo sobre roca (*Interpacific project, 2016, p.226*). Se presenta en la Figura 3-2 la línea investigada por parte del proyecto del *Interpacific Project* para el sitio de Mirandola.



Figura 3-2 Línea de investigación geofísica para Mirandola
Fuente: *Interpacific project, 2016*.

3.2. Grenoble

Se trata de un suelo rígido con amplia profundidad y se encuentran depósitos aluviales en los primeros 10 m sobre una capa de depósitos cuaternarios. Además, según el informe de la *Interpacific* se estima una capa de roca mesozoica que empieza a varios cientos de metros de profundidad (entre 500 a 800 m). En el mismo informe se señala que se espera una capa de baja velocidad de 10 m de espesor encontrada a 25 m de profundidad (*Interpacific project, 2016, p.227*).

Se presenta en la Figura 3-3 la línea investigada por parte del proyecto del *Interpacific Project* para el sitio de Grenoble.



Figura 3-3 Línea de investigación geofísica para Grenoble
Fuente: Interpacific project, 2016.

3.3. Cadarache

Se trata de una zona plana en la parte superior de una pequeña colina. Se sabe además que existen afloramientos rocosos de roca caliza cretácica (*Interpacific project, 2016, p.229*). Se presenta en la Figura 3-4 la línea investigada por parte del proyecto del *Interpacific Project* para el sitio de Cadarache.



Figura 3-4 Línea de investigación geofísica para Cadarache
Fuente: Interpacific project, 2016.

4. CAPÍTULO IV: MÉTODOS NO INVASIVOS E INVASIVOS PARA LA CARACTERIZACIÓN SÍSMICA: *MASW* y correlaciones del ensayo *CPT*

4.1. Métodos no invasivos - Ensayo *MASW*

El *Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)* es un método sísmico que puede ser usado para la caracterización geotécnica de materiales cercanos a la superficie (Park et al., 1999a; Xia et al., 1999; Miller et al., 1999a). Son una forma alternativa de investigación del terreno, si es que no se conoce previa información geotécnica del terreno.

En los métodos de ondas superficiales, las ondas de superficie son generadas y usadas para inferir perfiles de velocidad de ondas de corte del sitio en estudio como función de la profundidad. Las ondas de corte de capas de suelo individuales están relacionadas directamente con el módulo de corte, el cual es la rigidez del material (Kramer, 1996).

La base de la mayoría de métodos de análisis de ondas de superficie es la determinación precisa de la velocidad de fase dependiente de la frecuencia del modo fundamental de ondas Rayleigh (Park et al., 1997). Con ello, por la inversión de la velocidad de fase dispersiva de ondas Rayleigh registradas, el perfil de velocidad de ondas de corte puede ser obtenido para el sitio en estudio (Xia, Miller & Park, 1999). En resumen, cuando la onda de superficie ha sido correctamente identificada, se procede al modelado de la onda S mediante un proceso iterativo, para obtener como resultado final una curva de variación de velocidad de ondas de corte a diversas profundidades.

El método *MASW* se divide en tres principales pasos: (i) adquisición de datos, (ii) análisis de dispersión (determinación de la curva de dispersión de onda Rayleigh) y (iii) análisis de inversión (determinación del perfil de velocidad de ondas de corte). A continuación, se describen los pasos como parte de la metodología de análisis:

4.1.1. Adquisición de los datos

En primer lugar, para adquirir los datos del terreno se parte por definir el eje del sondaje sísmico en el sitio a estudiar, luego se procede con la instalación de los geófonos, estos deben estar igualmente espaciados en la línea del eje trazado (Park et al., 1997). Seguido de ello, una onda es generada con una carga de impacto al extremo de uno de los geófonos, y la amplitud del movimiento de las ondas resultantes es registrado como una función del tiempo (Park et al., 1999).

En segundo lugar, se debe tener en cuenta que los geófonos solo registran el movimiento vertical, y por tanto es importante la disposición de estos en el terreno de forma vertical a él. Estos deben estar conectados a una tarjeta de adquisición de datos y una computadora equipada con un programa adecuado para el registro de los datos. Son recomendados usar geófonos de baja frecuencia, tales como los de 4.5 Hz. Adicionalmente, el número de geófonos usado es, por lo general, más de 20, cada uno conectado a un canal de registro, usualmente se usan 24 o 48 geófonos; así mismo, al incrementar el número de geófonos usados para el registro, se obtiene una mejor resolución en la imagen de dispersión obtenida (Park et al., 2001).

Un arreglo general de 24 geófonos se presenta en la Figura 4-1 y la adquisición de datos y registro en un sismógrafo convencional es presentado en la Figura 4-2.

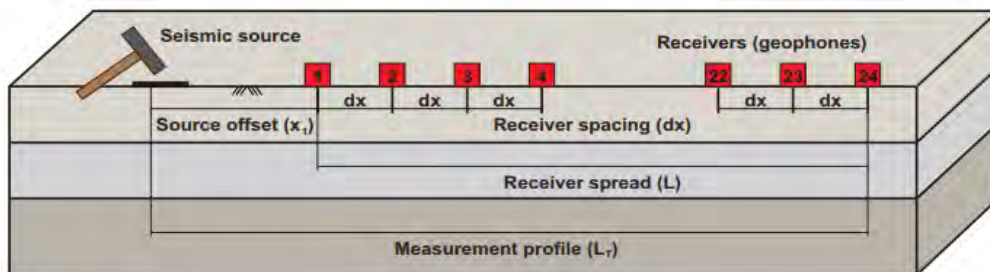


Figura 4-1 Típico perfil medido MASW para 24 recibidores

Fuente: Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils, 2017, p.219

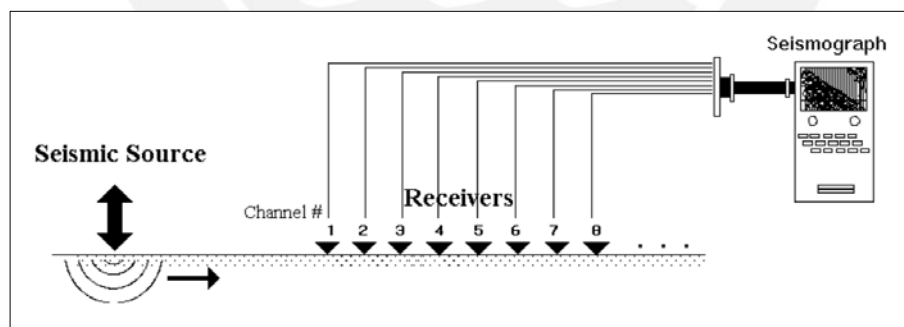


Figura 4-2 Representación de la adquisición y el registro de datos en el MASW

Fuente: Multi-Channel Analysis of Surface Waves, 1999.

La frecuencia de muestreo se define como la cantidad de muestras por segundo (o su inversa en Hertz) que se toma de una señal continua para utilizar una señal discreta. Una frecuencia de muestreo comúnmente usada en ensayos MASW es de 1000 Hz, la cual corresponde a un intervalo de muestreo de 1 ms, con ello el tiempo total de registro sería de 1 s; para mayores extensiones de geófonos ($L < 100$ m), o si son esperadas bajas

velocidades de onda de corte ($V_s < 100$ m/s) es recomendado un tiempo mayor de registro, por ejemplo 2 s.

La máxima profundidad de investigación (z_{\max}) dependerá del sitio y el tipo de fuente sísmica usada; esta profundidad será determinada por la longitud de onda más larga que es obtenida durante la adquisición de los datos (λ_{\max}). Un enfoque empírico adoptado es el criterio empírico de la mitad del λ_{\max} (Park & Carnavale, 2010), el cual es presentado en la Ecuación 4.1:

$$z_{\max} \simeq 0.5 \lambda_{\max} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Para la profundidad a investigar también influirá el peso de la fuente sísmica; comúnmente es usado un martillo de 10 kg, el cual sirve para obtener profundidades a investigar dentro de un rango de entre 10 a 30 m. Esta profundidad podría aumentar si es que el poder de la fuente sísmica es mayor, como por ejemplo dejar caer una carga pesada con una grúa, podría representar obtener una profundidad de investigación por debajo de los 30 m. Se puede también utilizar un plato que sirva para impactar el martillo en él, el plato puede ser metálico o no metálico, puede además ayudar a generar ondas superficiales de baja frecuencia.

La longitud de la extensión de los recibidores (L) está relacionada con la longitud de onda más larga que puede ser relacionada con la máxima profundidad de investigación. Un criterio común es que la longitud de onda más larga puede ser analizada con alta precisión y es aproximadamente igual a la longitud de extensión de los recibidores (Park & Carnevale, 2010), se presenta ello en la Ecuación 4.2; para el caso del MASW los geófonos son los llamados recibidores.

$$\lambda_{\max} \simeq L \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Adicionalmente, estudios más recientes, muestran que el rango de profundidades está limitado por las longitudes de onda adquiridas de la curva de dispersión del modo fundamental (Garofalo et al. 2016). Por ello, cuanto mayor sea la longitud de onda máxima, darán profundidades de investigación más largas, y mientras más corta sea la longitud de onda mínima se mejorará la resolución a poca profundidad. Una regla ampliamente aceptada para la interpretación de las curvas de dispersión del modo fundamental es limitar la máxima profundidad del perfil de ondas de corte (V_s) como se presenta en la Ecuación

4.3, y para limitar el espesor de la capa de suelo superior (h_1) a usar en el método la Ecuación 4.4 (Park et al.199; Garofalo et al. 2016; Cox & Teague 2016).

$$z_{\max} \leq \gamma \cdot \lambda_{\max}, \frac{1}{3} \leq \gamma \leq \frac{1}{2} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

$$h_1 \leq \xi \cdot \lambda_{\max}, \frac{1}{3} \leq \xi \leq \frac{1}{2} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Finalmente, para el caso de estudio, por parte del proyecto de la *Interpacific project* se sabe que se hicieron mediciones con espaciamentos de los geófonos de entre 0.5 a 2 m, se usó un martillo de 8 kg para la generación de las ondas Rayleigh para los ensayos *MASW*.

4.1.2. Análisis de dispersión

En el análisis de dispersión, las curvas de dispersión son extraídas de los datos de onda superficiales conseguidas. Existen varios métodos basados en transformaciones, en donde las series de tiempo son transformadas desde el dominio de espacio temporal a diferentes dominios, por ejemplo: frecuencia y número de onda ($f-k$); también, métodos basados en transformadas de frecuencias bajas ($p-w$) y el método de cambio de fase (*phase-shift method*).

Cada transformada o imagen provee una imagen de las propiedades dispersivas de las ondas superficiales registradas, desde donde las curvas de dispersión de ondas Rayleigh son identificadas y extraídas basadas en los máximos espectrales. Para la presente tesis se decide emplear el método de cambio de fase (*phase-shift method*), este se detalla a continuación:

4.1.2.1. Método de cambio de fase (*phase-shift method*)

El *phase-shift method*, también conocido como *wavefield transformation method* es una técnica que sirve para poder obtener el espectro de velocidad de fase (imagen de dispersión) que se basa en el registro de impulsos multicanal (Park et al.,1998).

Por medio de este método las propiedades de las ondas (de cuerpo y de superficie) contenidas en un conjunto de datos registrados son visualizados en el dominio de energía transformada (suma de amplitudes de onda), velocidad de fase y frecuencia (Park et

al.,1998); gracias a ello, diferentes modos de ondas superficiales son reconocidos para cierto contenido de frecuencias y caracterizan para cada frecuencia una velocidad de fase.

Las curvas de ondas Rayleigh son extraídas de las imágenes de dispersión para análisis más detallados; para el caso de interés de la tesis será extraer estas curvas y seguir con el proceso de análisis de inversión para determinar perfiles de profundidad vs velocidad de onda de corte (V_S).

El método se divide en cuatro pasos: (1) importación de la data e inicio del algoritmo, (2) transformada de Fourier (FFT) y normalización de la amplitud, (3) imagen de dispersión, y (4) extracción de curvas de dispersión. En la Figura 4-3 se presenta el flujograma a seguir con este método, seguido por una descripción de cada paso.

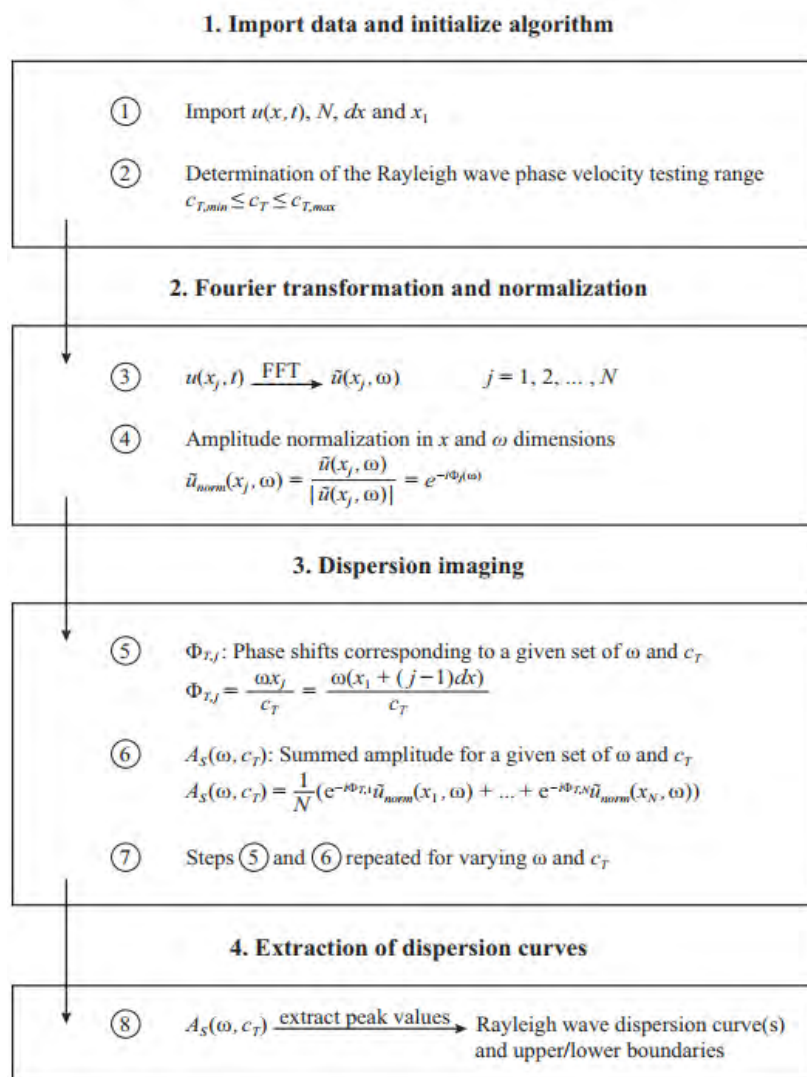


Figura 4-3 Flujograma de trabajo del método de cambio de fase

Fuente: Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils, 2017, p.220

En primer lugar, empezando por el paso 1, se comienza con el registro de ondas de superficie multicanal, el cual es denotado por $u(x_j, t)$, donde x_j es la distancia sobre el punto de carga de impacto a el j^{th} receptor y se puede calcular como sigue: $x_j = x_1 + (j - 1)dx$, donde t es el tiempo. Seguido a ello, a cada parte del registro se le aplica la transformada de Fourier (FFT) obteniendo así su representación en el dominio de la frecuencia ($\tilde{u}(x_j, w)$) (Park et al., 1998; Park, 2011). Ello se presenta en la Ecuación 4.5.

$$\tilde{u}(x_j, w) = \text{FFT} [u(x_j, w)] \quad (\text{Ec. 4.5})$$

En segundo lugar, luego se procede a transformar el registro, el cual puede ser representado en términos de amplitud ($A_j(w)$) y fase ($\phi_j(w)$), lo que se entiende también como un registro transformado. Seguido a ello, relacionando la velocidad de fase característica de cada componente de frecuencia ($c(w)$) y la distancia (x_j) se obtendrá el término de fase. Se debe recalcar que el término de amplitud proporciona valiosa información respecto a otras propiedades, tales como la extensión geométrica y la atenuación de la señal (Park et al. 1998; Park 2011). Ello es presentado en la Ecuación 4.6 y 4.7.

$$\tilde{u}(x_j, w) = A_j(w)e^{-i\phi_j(w)} \quad (\text{Ec. 4.6})$$

$$\phi_j(w) = \frac{wx_j}{c(w)} = \frac{w[x_1 + (j - 1)dx]}{c(w)} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Después, se procede a normalizar la amplitud del registro transformado en términos de distancia y dimensiones de frecuencia para desligarlos de los efectos de extensión geométrica y atenuación (Park et al. 1998; Park 2011). Ello debido a que se pretende que el análisis represente las propiedades dispersivas de la señal, tal como se muestra en la Ecuación 4.8.

$$\tilde{u}_{\text{norm}}(x_j, w) = \frac{\tilde{u}(x_j, w)}{|\tilde{u}(x_j, w)|} = e^{-i\phi_j(w)} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Con ello, se procede con la representación del dominio temporal de cada componente de frecuencia de $\tilde{u}_{\text{norm}}(x_j, w)$ mostrará un arreglo de curvas sinusoidales normalizadas se representarán en toda la pendiente determinada por su actual velocidad de fase C_w .

Por consiguiente, para una velocidad de fase de testeo (C_T) y una frecuencia circular obtenida (w), la cantidad de cambios de fase requeridas para balancear el tiempo retardado

correspondiente a distancias específicas x_j son determinadas. Así, los cambios de fase son aplicados a los distintos rastros de registros normalizados y transformados $\tilde{u}_{\text{norm}}(x_j, w)$ que son después de esto añadidos para obtener la amplitud apilada inclinada ($A_s(w, c_T)$) correspondiente a cada par de w y c_T (Park et al.1998; Park 2011). Ello se representa mediante el sumatorio del número Euler elevado al negativo de la fase transformada multiplicado por el número imaginario (i), sin olvidar que la sumatoria debe incluir al producto de la representación del dominio temporal de cada componente de frecuencia de ($\tilde{u}_{\text{norm}}(x_j, w)$), todo ello normalizado por el número de datos (N) (Ver la Ecuación 4.9 y 4.10).

$$A_s(w, c_T) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{-i\phi_{Tj}} \tilde{u}_{\text{norm}}(x_j, w) \quad (\text{Ec. 4.9})$$

$$\phi_{Tj} = \frac{wx_j}{c(w)} \quad (\text{Ec. 4.10})$$

En consecuencia, las ecuaciones presentadas previamente son repetidas a lo largo del registro transformado, que engloban al resto de componentes de frecuencia, en una manera de iterativa, variando la velocidad de fase testeada en pequeños incrementos dentro de un rango testeado especificado previamente $c_{T,\text{min}} \leq c_T \leq c_{T,\text{max}}$. La imagen de dispersión es después de ello obtenida por plotear la amplitud apilada inclinada ($A_s(w, c_T)$) en el dominio de la frecuencia y velocidad de fase, pudiendo graficarse estos en 2 o 3 dimensiones, como se presentará más adelante para los sitios estudiados.

Así mismo, es importante conocer que las bandas de grande amplitud visualizan las propiedades de dispersión de todos los tipos de ondas contenidas en los datos registrados y son usados para construir la curva de dispersión del modo fundamental (y modo superior) para el sitio en estudio (Park et al.1998; Park 2011). Por lo general para la construcción de estas curvas se utilizarán más de un registro; en el trabajo de tesis se analizaron todos los registros para todos los sitios.

La curva experimental es denotada por $(C_{e,q}, \lambda_{e,q})(q = 1, \dots, Q)$ donde Q es el número puntos de información del registro, $C_{e,q}$ es la velocidad de fase experimental de onda Rayleigh del q^{th} punto de información, y $\lambda_{e,q}$ es la longitud de onda experimental correspondiente.

La propagación de ondas Rayleigh, del modo fundamental, normalmente prevalece en zonas donde la rigidez incrementa gradualmente con el incremento de la profundidad (con ello se produce un incremento de la velocidad de ondas de corte). Por lo tanto, existen casos en donde hay una capa rígida, una capa rígida entre dos capas blandas o un incremento muy grande de rigidez con la profundidad, modos superiores pueden jugar un rol significativo en ciertos rangos de frecuencia. En tales casos, la falta de investigación del número de modos o superposición de la información de dispersión de dos o más modos puede ocurrir (Foti et al., 2015; Gao et al., 2016; Zhang & Chan 2003).

Contar con experiencia en la identificación de los modos es de gran ayuda en campos como la geofísica, ya que una equivocada identificación de modo, puede ser, por ejemplo, un modo superior incorrectamente identificado como modo fundamental, mientras que la superposición modal resulta en una curva de dispersión aparente que no corresponde a alguno de los modos reales y tal sobreestimación de velocidad de fase del modo fundamental, en el análisis de inversión, dirigirá sobreestimaciones de velocidad de corte (V_s) y profundidades erróneas.

Otros factores que influyen en la resolución de la imagen de dispersión es la longitud de extensión de los receptores (geófonos) es, en general, preferible para mejorar la resolución de la imagen de dispersión. Sin embargo, una longitud muy larga de extensión de los receptores pone en riesgo la variación lateral a lo largo de los arreglos de geófonos (violando así la asunción del modelo de suelo de una dimensión hecho en el análisis de inversión).

Finalmente, bajo la asunción de que los frentes de ondas Rayleigh son planos es que cobra valor el análisis de registros de ondas de superficie multicanal. En adición, para evitar efectos cercanos a la superficie, es aconsejable establecer una distancia mínima de fuente, la cual depende de la longitud de onda más larga a analizarse. No obstante, una distancia muy corta de distancia a la fuente puede resultar en una irregular y muy grande tendencia de amplitud en la imagen de dispersión a bajas frecuencias (Park et al., 2010). Del mismo modo, una longitud de distancia a la fuente muy larga pone en riesgo excesivo de atenuación de los componentes en frecuencia para el modo fundamental.

4.1.3. Análisis de inversión

El perfil de V_S (velocidad de ondas de corte) es obtenido por resolver un problema inverso. La parametrización es basada en la asunción de un modelo de capas 1D que consiste en una pila de capas homogéneas sobre un semi espacio infinito.

Cada capa es caracterizada por: espesor y dos propiedades elásticas (velocidad de onda S y un parámetro, ya sea la onda P o el coeficiente de Poisson) (Park et al, 2010).

La dispersión de la onda superficial depende fuertemente de la rigidez cortante del suelo, menos que la rigidez volumétrica e insignificamente de la densidad. Así, la onda P o el coeficiente de Poisson se asumen como parámetros conocidos a priori a veces. Este problema fue considerado de primordial importancia para dar valores de los parámetros del modelo que no son considerados como incógnitas en la inversión (densidad y coeficiente Poisson de cada capa). Con ello, la V_S y el espesor son parámetros de primer interés. Una vez un modelo ha sido parametrizado, la inversión consiste en encontrar el modelo final cuya curva de dispersión teórica se ajuste a la curva experimental con un error no mayor al 5%. Diversos autores recomiendan que el máximo de error admisible debería estar de entre 2 a 5% (Garofalo et al., 2018).

4.1.3.1. Curvas de dispersión teórica

Las curvas de dispersión teóricas son generalmente determinadas por métodos matriciales basados en teorías de propagación de ondas. Thompson (1950) y Haskell (1953) presentaron el problema de propagación de ondas superficiales y dispersión en medios de capas superficiales. Es así que el método Thompson-Haskell para la determinación de curvas de dispersión de ondas superficiales es basado en el uso de las matrices de transferencia en el dominio de la frecuencias y número de onda ($f-k$), y es que de aquí parte el nombre del método conocido como *transfer-matrix method*. En consecuencia, basados en el método de Thompson-Haskell, varios métodos han sido desarrollados para estudiar la propagación de ondas en medios de capas; será para interés del presente trabajo, el estudio del método de Kausel y Roësset (1981).

La alternativa presentada por Kausel y Roësset (1981) trata sobre una formulación alternativa del método de Thompson-Haskell usando matrices de rigidez, similares a las usadas en el método de los elementos finitos. El método es el llamado método de la matriz de rigidez (*stiffness-matrix method*); entonces, un elemento de la matriz de rigidez es

obtenido para cada capa, formulada en el dominio de la frecuencia. Las matrices de rigidez del elemento de capas distintas relacionan las tensiones de cada interfaz de capa al correspondiente desplazamiento. Para un problema de muchas capas, los elementos de la matriz de rigidez son ensambladas utilizando comunes grados de libertad asociados a las interfaces de capas para formar una matriz de rigidez global. La matriz de rigidez global es entonces usada con las tensiones externas (globales) en cada interfaz de capa, para resolver para los desplazamientos con análogos a los métodos de los elementos finitos. Los componentes de la matrix de rigidez son presentados en el Anexo A; así como, el ensamblaje de las matrices, lo cual parte de base en el cálculo de la curva de dispersión teórica mediante rutinas en Matlab.

4.1.3.2. Inversión de la curva de dispersión

La inversión de la curva de dispersión involucra invertir toda la imagen de dispersión sin extraer alguna curva de dispersión modal. Al invertir todo el espectro de velocidad se puede evitar el riesgo de identificar de modo erróneo y evitar que los modos se mezclen.

Con el procedimiento de cálculo planteado en la presente tesis, será de interés la inversión para las curvas de dispersión de los modos fundamentales, ya que es donde usualmente se representará la mayor energía, y el enfoque que se adopta es el tradicional, decidiendo e identificando el modo fundamental y los superiores.

Por otro lado, otros enfoques más recientes, en un intento de aumentar la precisión de los perfiles de velocidad obtenidos por el método del *MASW*, han sido desarrollados donde la inversión es no solo basada en la curva de dispersión del modo fundamental. Entre ellos destacan los *multi-modal inversión methods* y *dispersion mage inversión methods* (Ryden & Park, 2004, Xia et al., 2000b).

La desventaja con ello es que el tiempo computacional se vuelve más grande que el requerido en los modos fundamentales tradicionales basados en los procedimientos de inversión (Ryden & Park, 2004).

El proceso de inversión se divide en tres pasos: (1) inicio estimado de los parámetros del modelo, (2) cálculo de la curva de dispersión teórica y (3) cálculo del error estimado y minimización del error. En la Figura 4-4 se presenta el flujograma a seguir con este método, seguido por una descripción de cada paso.

1. Initial estimate of model parameters

- ① Estimate β and h based on the experimental dispersion curve $(c_{e,q}, \lambda_{e,q})$ ($q = 1, \dots, Q$) or assign values to β and h manually
- ② Estimate ρ and ν (or α) based on knowledge of the test site

2. Computation of a theoretical dispersion curve

- Obtain a range of Q wave numbers at which the theoretical dispersion curve is computed $k_{t,q} = 2\pi/\lambda_{e,q}$ ($q = 1, \dots, Q$). Repeat ③ to ⑥ for $q = 1, \dots, Q$.
- ③ c_T : Testing Rayleigh wave phase velocity, $c_{T,min} \leq c_T \leq c_{T,max}$
 - ④ Compute layer stiffness matrices $\mathbf{K}_{e,j}$ for layers $j = 1, \dots, (n+1)$ and assemble into the system stiffness matrix \mathbf{K}
 - ⑤ Vary c_T and repeat ④ until $F_R(c_T, k_{t,q}) = \det(\mathbf{K}) = 0$
 - ⑥ Let $c_{t,q} = c_T$

3. Error estimation and misfit minimization

- ⑦ Evaluate misfit $\varepsilon = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \frac{\sqrt{(c_{e,q} - c_{t,q})^2}}{c_{e,q}} \cdot 100\%$
- ⑧ Check if $\varepsilon < \varepsilon_{max}$
- ⑨ If ⑧ is true: Stop
If ⑧ is false: Update β (or β and h) and repeat ③ to ⑧

Figura 4-4 Flujograma de trabajo proceso de inversión

Fuente: Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils, 2017, p.224

4.1.4. Modelo de tierra en capas y parámetros del modelo

Para dar inicio al flujograma de la Figura 4-4 antes descrito, con el fin de obtener la curva de dispersión teórica, se debe asumir un problema de capas, entonces, el problema es aproximado como un problema de deformación plana en el plano X-Z (Haskell 1953; Kausel and Roësset 1981). En donde se establece que el eje X es paralelo a las capas, siendo el eje positivo en dirección de propagación de las ondas superficiales, y el eje positivo Z es en dirección vertical hacia abajo. Se asume que las capas son planas y las propiedades de estas es que son homogéneas e isotrópicas.

Por tanto, para definir las propiedades de cada capa será necesario definir parámetros tales como el espesor de la capa (h), la velocidad de onda de corte (β), el módulo de Poisson (ν)

o la velocidad de onda de compresión y la densidad de la masa (ρ). Un claro ejemplo del modelo de capas planas es presentado gráficamente en la Figura 4-5.

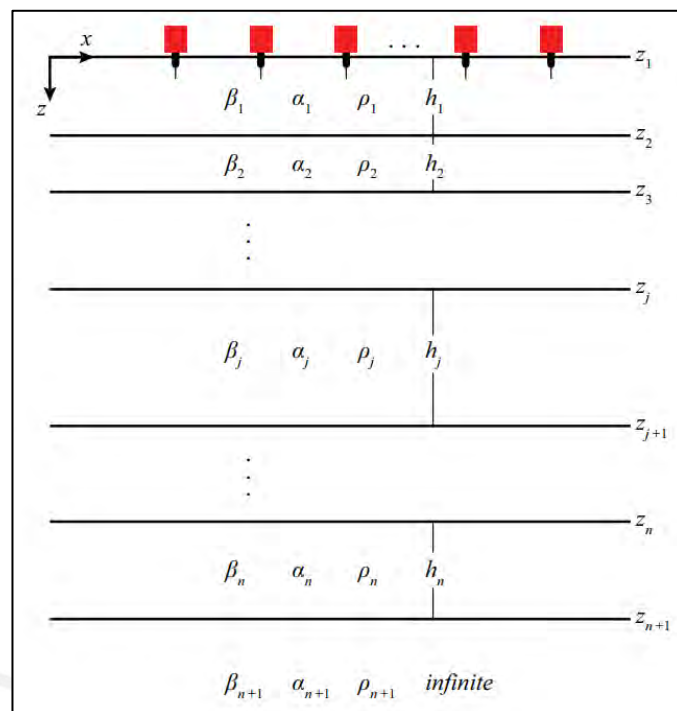


Figura 4-5 Modelo de capas de suelo para el análisis de inversión

Fuente: *Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils*, 2017, p.223

4.1.5. Cálculo de la curva de dispersión teórica

Las curvas de dispersión teóricas del modo fundamental son calculadas por el método de la matriz de rigidez (*stiffness matrix method*) de Kausel y Roësset (1981) de una manera iterativa (Revisar el Anexo A). A continuación, se explica este proceso:

En primer lugar, en cada iteración, la curva teórica de dispersión del modo fundamental ($C_{e,q}, \lambda_{e,q}$) ($q = 1, \dots, Q$) se calcula a la misma longitud de onda mientras es incluida en la curva de dispersión experimental, tal como se presenta en la Ecuación 4.11.

$$\lambda_{t,q} = \lambda_{e,q}; \quad q = 1, \dots, Q \quad (\text{Ec. 4.11})$$

El correspondiente número de onda ($k_{t,q}$) puede escribirse como en la Ecuación 4.12.

$$k_{t,q} = \frac{2\pi}{\lambda_{t,q}}; \quad q = 1, \dots, Q \quad (\text{Ec. 4.12})$$

Luego, para cada etapa, se obtiene una matriz de rigidez ($\mathbf{K}_{e,j}$). Esta matriz que representa a las capas, relaciona las tensiones con los desplazamientos en interfaces superiores e inferiores de la capa (Kausel y Roësset, 1981) (Ver Ecuación 4.13).

$$\mathbf{p}_{e,j} = \mathbf{K}_{e,j} \cdot \mathbf{u}_{e,j} \quad j = 1, \dots, (n + 1) \quad (\text{Ec. 4.13})$$

Donde $\mathbf{p}_{e,j}$ es el vector de carga externo de la j^{th} capa y $\mathbf{u}_{e,j}$ es el vector de desplazamiento de la j^{th} capa.

$$\mathbf{p} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} \quad (\text{Ec. 4.14})$$

La matriz de rigidez del sistema (matriz \mathbf{K}) y los vectores \mathbf{p} y \mathbf{u} son el sistema de carga y desplazamientos, respectivamente (Revisar el Anexo A para las componentes de la matriz $\mathbf{K}_{e,j}$). Así mismo, al considerar un sistema de cargas externas se entiende que se ha establecido que los modos naturales de propagación de ondas Rayleigh

$$0 = \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} \quad (\text{Ec. 4.15})$$

También, con el objetivo de no obtener soluciones triviales se debe considerar que el determinante de \mathbf{K} debe ser nulo para la Ecuación 4.15. Por tanto, para números de onda que representan las soluciones modales en varias frecuencias, estas soluciones se obtienen por resolver la Ecuación 4.16.

$$F_R(c, k) = \det(\mathbf{K}) = 0 \quad (\text{Ec. 4.16})$$

Por consiguiente, la solución que se le da a la Ecuación 4.16 para un valor dado de $\mathbf{K}_{t,q}$ es determinado por variar la velocidad de fase (C_T) en pequeños incrementos de ΔC_T , empezando por un valor pequeño de 0.1 m/s y proceder del mismo modo hasta que el determinante de la matriz de rigidez tenga un cambio de signo.

Finalmente, se recomienda que la velocidad de prueba se encuentre en el rango de $\Delta C_T \in [0.1, 0.5] \frac{\text{m}}{\text{s}}$, para modelos de capas de suelo caracterizados por una variación irregular de la velocidad de onda de corte (rigidez), pudiendo variar esta velocidad en incrementos recomendados de 0.1 m/s. No obstante, para cálculos basados en modelos de tierra donde la velocidad de onda de corte incrementa gradualmente con la profundidad, un valor grande de ΔC_T de 1 m/s es aceptable.

4.1.6. Cálculo del error estimado y minimización del error

La velocidad de onda de corte inicial para cada capa fue obtenida por el mapeo de los puntos de las curvas de dispersión media en valores aproximados de velocidad de ondas de corte (Park et al. 1999). Seguido a ello se debe discretizar los pseudo-perfiles resultantes para que coincidan con las capas previamente asumidas. Del mismo modo, la velocidad de onda de corte fue actualizada durante el proceso de inversión, mientras que los otros parámetros fueron conservados sin cambios. La velocidad de onda de corte del semi espacio fue dada igual a la velocidad de onda de corte de la capa más inferior de espesor finito a lo largo de la inversión. El desajuste entre las curvas teóricas y experimentales se evalúan según la Ecuación 4.17.

$$\epsilon = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q \frac{(C_{e,q} - C_{t,q})^{1/2}}{C_{e,q}} \times 100\% \quad (\text{Ec. 4.17})$$

Donde

Q = número de puntos (información) incluida en cada curva

$C_{t,q}$ = velocidad de fase del q -ésimo punto en la curva de dispersión teórica

$C_{e,q}$ = velocidad de fase del q -ésimo punto en la curva de dispersión experimental

Además, como el valor de C_T (velocidad de fase de la onda Rayleigh para la iteración) se ha obtenido de forma cuidadosa, e iterando con criterio, entonces el valor de $C_{t,q}$ es representado por la Ecuación 4.18.

$$C_{t,q} = C_T \quad (\text{Ec. 4.18})$$

Por consiguiente, el cálculo de los diferentes números de onda $k_{t,q}$ (diferentes longitudes de onda $\lambda_{t,q}$, la curva de dispersión del modo fundamental teórica es construida.

El procedimiento de iteración es terminado cuando ϵ ha alcanzado un valor pequeño aceptable, por ejemplo: $\epsilon \leq \epsilon_{\max}$, donde ϵ_{\max} es el máximo desajuste permitido, el cual se encuentra comúnmente aceptado por autores entre 2%-5% (Garofalo et al., 2016).

4.2. Métodos invasivos – correlaciones del ensayo *CPT*

Luego de explicar el ensayo *CPT* en el sub capítulo 2.2, en el presente sub capítulo se presentan las correlaciones desarrolladas por diversos autores con el fin de obtener velocidades de onda de corte, partiendo de diversos parámetros obtenidos con el ensayo *CPT*.

Desde la década de 1990 hasta la actualidad, se han desarrollado varios estudios, en los que se desarrollaron ecuaciones de correlación entre la velocidad de onda de corte V_S y diferentes parámetros de *CPT* relacionados; parámetros tales como la resistencia en la punta (q_c), la resistencia del cono corregida (q_t), la fricción de la manga o fuste (f_s), la tensión vertical total en reposo (σ_{vo}), la tensión efectiva (σ'_{vo}) y la profundidad (z); sin embargo, no se correlacionaría, para altas deformación en el *CPT* y a bajas deformaciones para la V_S . Con ello, varios ejemplos de correlaciones de *CPT*- V_S , ya sea dado para arenas o todos los tipos de suelos, son presentados a continuación según sus autores:

Hegazy & Mayne (1995):

$$V_S \approx 13.18q_c^{0.192}(\sigma'_{vo})^{0.179} \quad (\text{Ec. 4.19})$$

Piratheepan (2002):

$$V_S \approx 32.3q_c^{0.089}f_s^{0.121}z^{0.215} \quad (\text{Ec. 4.20})$$

Mayne (2006):

$$V_S \approx 118.8 \log(f_s) + 18.5 \quad (\text{Ec. 4.21})$$

Robertson (2009):

$$V_S \approx [(10^{0.55I_c+1.68}) \frac{q_t - \sigma_{vo}}{p_a}]^{0.5} \quad (\text{Ec. 4.22})$$

McGann et al. (2015)

$$V_S \approx 18.4q_c^{0.144}f_s^{0.0832}z^{0.278} \quad (\text{Ec. 4.23})$$

Y, además

$$I_c = [(3.47 - \log(Q_{tl}))^2 + (\log(F_r) + 1.22)] \quad (\text{Ec. 4.24})$$

$$Q_{tl} = (q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo} \quad (\text{Ec. 4.25})$$

$$Fr = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} (\%) \quad (\text{Ec. 4.26})$$

Donde

I_C = índice de comportamiento propuesto por Robertson (2009)

Q_t = resistencia de la punta normalizada

F_r = relación de fricción normalizada

Además, q_c , q_t , f_s , σ_{vo} y σ'_{vo} están dados en kPa, z en metros y p_a es igual a 100 kPa.



5. CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados y discusión – MASW

5.1.1. Importación de la data – inicio del algoritmo

En primer lugar, como se mencionó al inicio, la información fue extraída de la web: interpacific.geopsy.org. Esta fue importada, y el registro de ondas de superficie multicanal es denotado por $u(x_j, t)$, donde $x_j = x_1 + (j - 1)dx$ es la distancia sobre el punto de carga de impacto a el j^{th} receptor (geófono), t es el tiempo y dx es el espaciamiento entre cada receptor.

En la Tabla 5.1 se presenta los registros disponibles que fueron descargados de la web para el emplazamiento de Cadarache; así mismo, de estos registros se obtuvieron las imágenes de dispersión de todos ellos, mediante el *phase-shift method*, los cuales serán presentados más adelante; sin embargo, el registro que será de interés para los posteriores cálculos es el del folder 211, ya que se aprecia con mejor detalle el modo fundamental.

Tabla 5.1 Registros disponibles de ensayos MASW realizados para Cadarache

Nº de Folder	Nº de geófonos	Ubicación de disparo (m)	Dist. al 1º geófono (m)	Dist. al último geófono (m)	dx (m)	Tiempo de registro (s)	ratio de muestreo (ms)
200-201	48	0	10	57	1	2	0.25
210-211	48	7	10	57	1	2	0.25
220-221	48	7.5	10	57	1	2	0.25
240-241	48	60	10	57	1	2	0.25
250-251	48	60.5	10	57	1	2	0.25
260-261	48	67	10	57	1	2	0.25

Fuente: interpacific.geopsy.org

Además, la lectura del folder 211 se programó a través de Matlab y es presentada en la Figura 5-1 las amplitudes leídas de las ondas como una función de la distancia desde la fuente los geófonos vs el tiempo de registro.

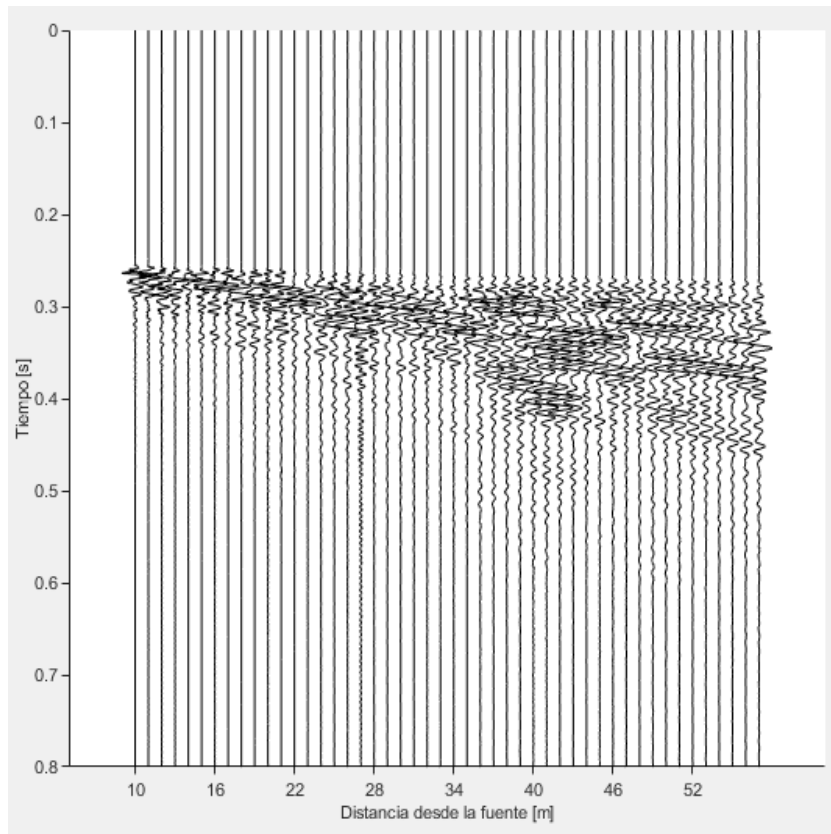


Figura 5-1 Registro multicanal del folder 211 para Cadarache

Del mismo modo, en la Tabla 5.2 se presenta los registros disponibles que fueron descargados de la web para el emplazamiento de Grenoble; así mismo, de estos registros se obtuvieron las imágenes de dispersión de todos ellos, mediante el *phase-shift method*, los cuales serán presentados más adelante; sin embargo, el registro que será de interés para los posteriores cálculos es el del Folder 117, ya que se aprecia con mejor detalle el modo fundamental.

Tabla 5.2 Registros disponibles de ensayos MASW realizados para Grenoble

Nº de Folder	Nº de geófonos	Ubicación de disparo (m)	Dist. al 1º geófono (m)	Dist. al último geófono (m)	dx (m)	Tiempo de registro (s)	ratio de muestreo (ms)
101-102	48	0	6	76.5	1.5	2	0.25
116-117	48	0.75	6	76.5	1.5	2	0.25
126-127	48	80.5	6	76.5	1.5	2	0.25
141-142	48	41.25	6	76.5	1.5	2	0.25

Fuente: interpacific.geopsy.org

Con ello, la lectura del folder 117 se programó a través de Matlab y es presentada en la Figura 5-2 las amplitudes leídas de las ondas como una función de la distancia desde la fuente los geófonos vs el tiempo de registro.

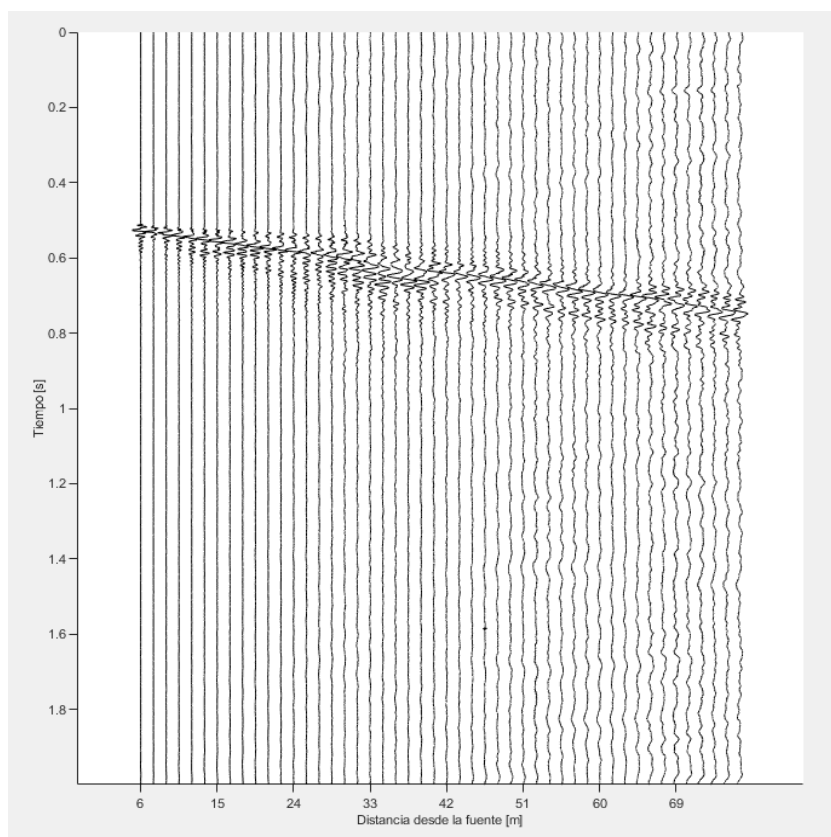


Figura 5-2 Registro multicanal del folder 117 para Grenoble

Así mismo, en la Tabla 5.3 se presenta los registros disponibles que fueron descargados de la web para el emplazamiento de Mirandola; así mismo, de estos registros se obtuvieron las imágenes de dispersión de todos ellos, mediante el *phase-shift method*, los cuales serán presentados más adelante; sin embargo, el registro que será de interés para los posteriores cálculos es el del folder 311, ya que se aprecia con mejor detalle el modo fundamental; además se identifican claramente los modos superiores (2^{do} y 3^{er} modo).

Tabla 5.3 Registros disponibles de ensayos MASW realizados para Mirandola

Nº de Folder	Nº de geófonos	Ubicación de disparo (m)	Dist. al 1º geófono (m)	Dist. al último geófono (m)	dx (m)	Tiempo de registro (s)	ratio de muestreo (ms)
300-301	48	10	10	57	1	2	0.25
310-311	48	22	10	57	1	2	0.25
320-321	48	22.5	10	57	1	2	0.25

330	48	36.5	10	57	1	2	0.25
340	48	48.5	10	57	1	2	0.25
350-351	48	60.5	10	57	1	2	0.25
360	48	74.5	10	57	1	2	0.25
372-373	48	75	10	57	1	2	0.25
383-384	48	87	10	57	1	2	0.25

Fuente: *interpacific.geopsy.org*

Finalmente, la lectura del folder 311 se programó a través de Matlab y es presentada en la Figura 5-3 las amplitudes leídas de las ondas como una función de la distancia desde la fuente los geófonos vs el tiempo de registro.

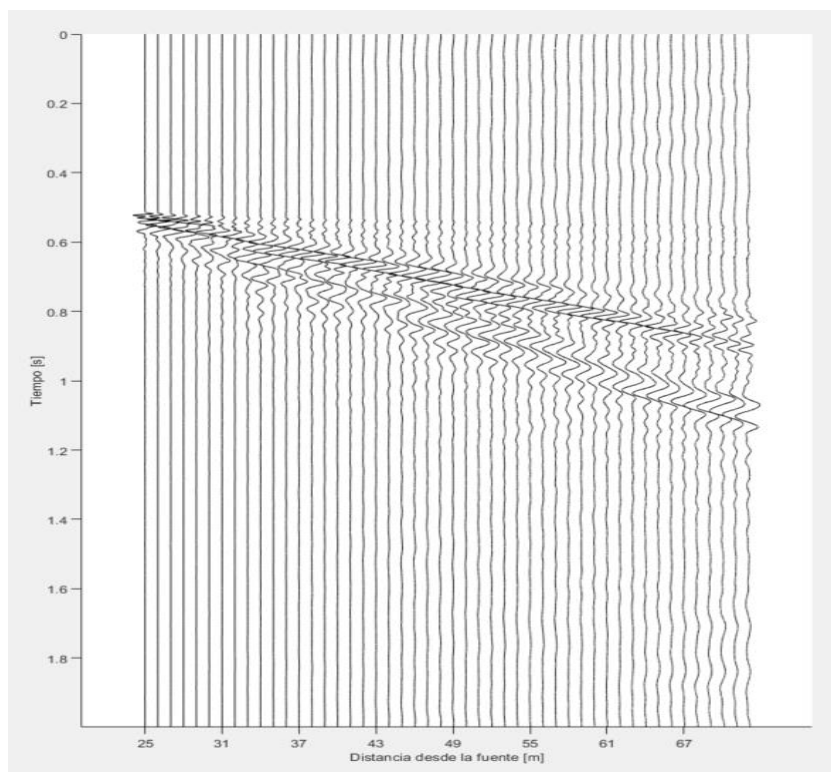


Figura 5-3 Registro multicanal del folder 311 para Mirandola

5.1.2. Imágenes de dispersión

Por medio del método de cambio de fase o *phase-shift method*, explicado en el sub capítulo 4.2.1, se presenta a continuación las imágenes de dispersión que fueron programadas en base a la metodología de cálculo como parte del método (Park et al., 1998). Se recalca también que, de los fólderes elegidos previamente (211, 117 y 311), las imágenes de dispersión presentadas en este subcapítulo pertenecen a los elegidos según el criterio de mostrar la imagen con mejor resolución, y en donde se aprecie un mejor desarrollo el modo fundamental, y si fuera el caso, se identifiquen también modos superiores.

Para el caso de Cadarache, en las Figuras 5-4 y 5-5 se presentan las imágenes de dispersión 2-D y 3-D, respectivamente. Se pueden apreciar las zonas donde la mayor energía (zonas de alta velocidad) se forman según el color rojo, y que la forma en la que se desarrolla el modo fundamental se da en una forma casi exponencial. Por otro lado, es también importante señalar que esta banda del espectro, tiene una banda que desarrolla velocidades de fase de la onda Rayleigh que van desde los 300 m/s hasta unos 450 m/s como máximo. Es importante notar que el desarrollo de la zona del modo fundamental tiene un desarrollo muy claro a partir de los 30 Hz.

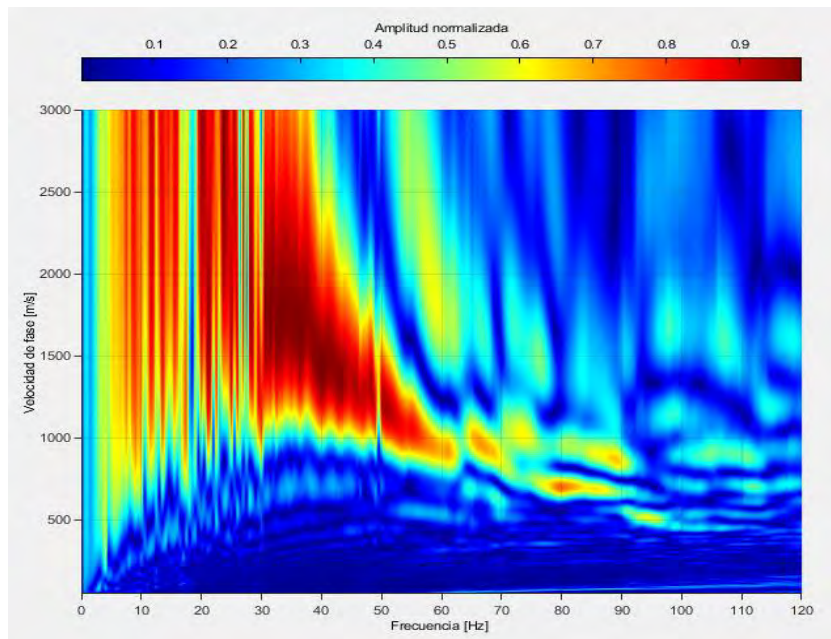
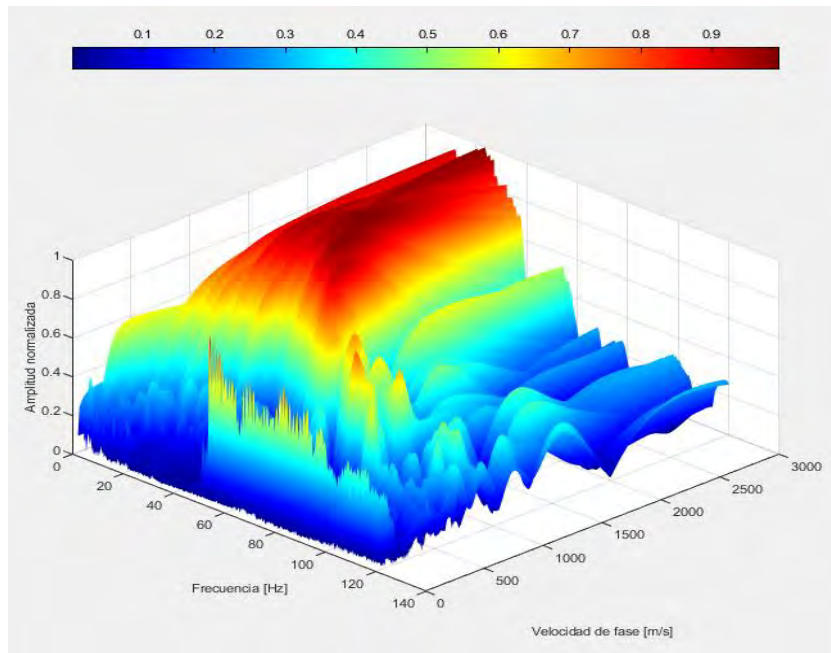


Figura 5-4 Imagen de dispersión 2-D para Cadarache
Fuente: Elaboración propia



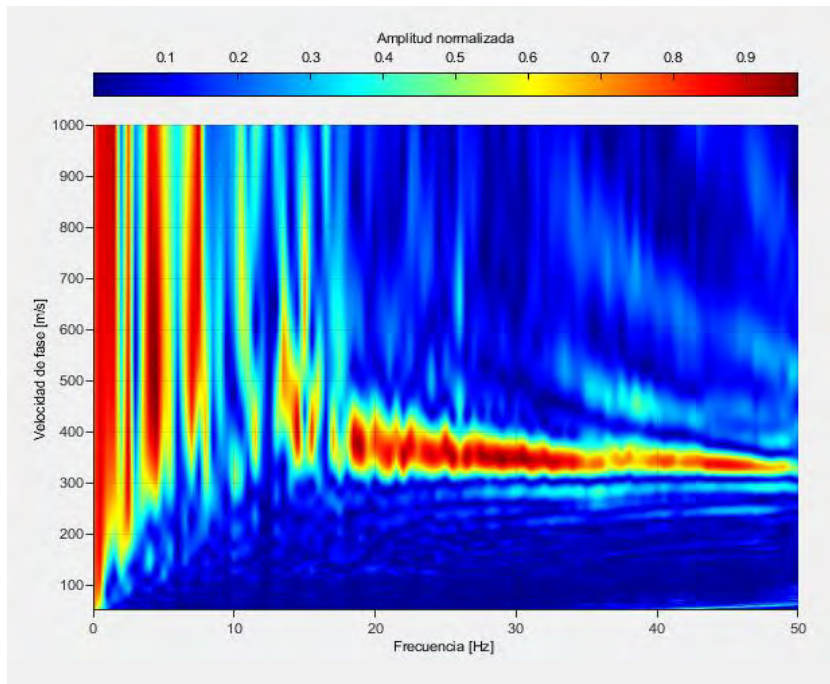
*Figura 5-5 Imagen de dispersión 3-D para Cadarache
Fuente: Elaboración propia*

Del mismo modo, se procede para el caso de Grenoble, según las Figuras 5-6 y 5-7 donde se presentan las imágenes de dispersión 2-D y 3-D, respectivamente.

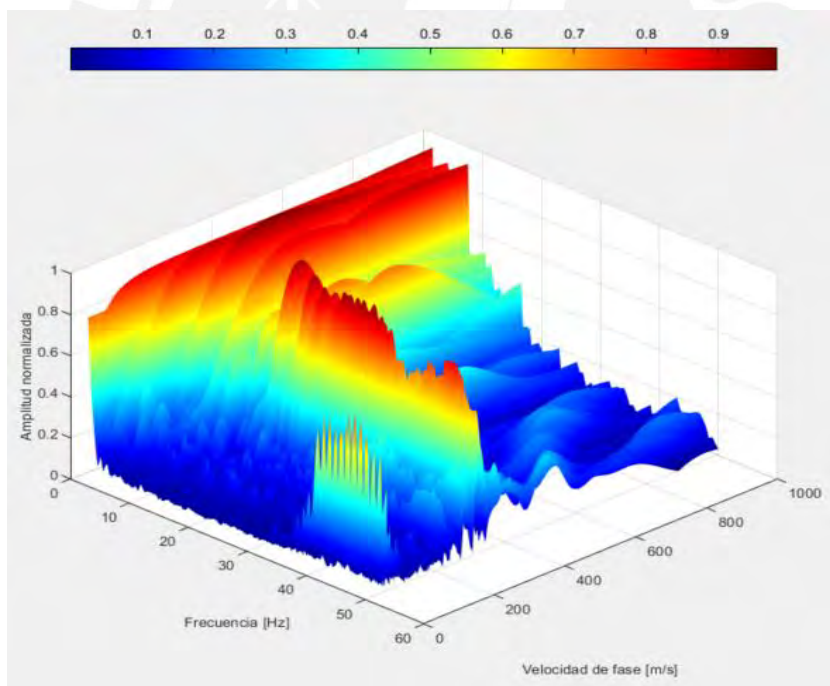
Aquí es importante notar que el modo fundamental no es tan visible para bajas frecuencias ($f < 10$ Hz), pero si se nota un claro desarrollo después de, aproximadamente, 18 Hz, en donde la zona del modo fundamental llega hasta una frecuencia de 50 Hz.

Por otro lado, es también importante señalar que esta banda del espectro, tiene una banda que desarrolla velocidades de fase de la onda Rayleigh que van desde los 300 m/s hasta unos 450 m/s como máximo.

Esta es la información de entrada con la que se procederá más adelante a extraer la curva de dispersión para el modo fundamental.



*Figura 5-6 Imagen de dispersión 2-D para Grenoble
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 5-7 Imagen de dispersión 3-D para Grenoble
Fuente: Elaboración propia*

Por consiguiente, para la zona de Mirandola, se presentan las Figuras 5-8 y 5-9 donde se presentan las imágenes de dispersión 2-D y 3-D, respectivamente.

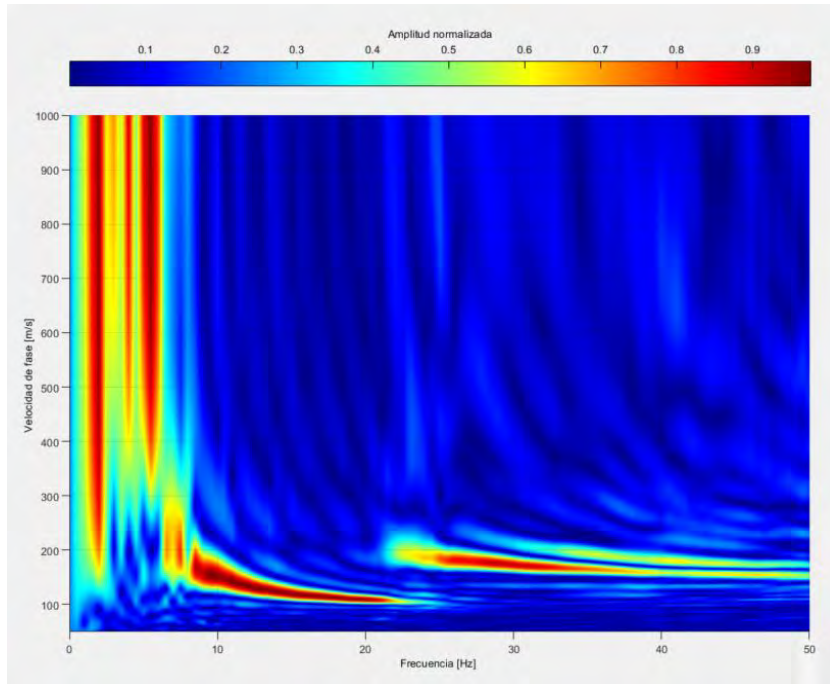


Figura 5-8 Imagen de dispersión 2-D para Mirandola
Fuente: Elaboración propia

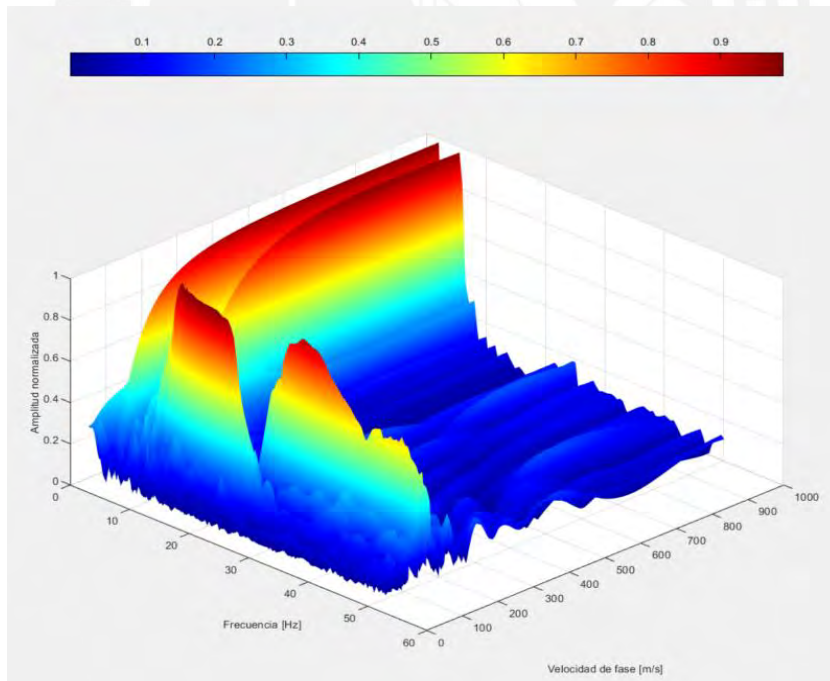


Figura 5-9 Imagen de dispersión 3-D para Mirandola
Fuente: Elaboración propia

Es esencial notar que en Mirandola, para la imagen de dispersión generada, se aprecian el modo fundamental o primer modo, y el segundo modo, esto se ejemplifica en la Figura 5-8, que para frecuencias de 8 a 22 Hz se genera una banda espectral con velocidades de entre

100 a 200 m/s que representan al modo fundamental; además, para frecuencias de entre 22 a 40 Hz se genera la banda espectral de velocidades que van desde velocidades de 180 a 200 m/s, representando esta banda al segundo modo.

Finalmente, el objetivo del análisis de dispersión, para los tres sitios de estudio, es obtener las imágenes de dispersión, las cuales han sido presentadas previamente y servirán para pasos posteriores como parte de la metodología propuesta por Park. Con ello, las bandas de gran amplitud permiten visualizar todo tipo de ondas contenidas en la data registrada y son usadas para construir las curvas de dispersión del modo fundamental (y modos superiores) para el sitio (Park et al.1998; Park, 2011).

5.1.3. Curvas de dispersión experimental

Estas curvas son producto de la extracción de una curva que relaciona a la frecuencia vs la velocidad de fase de la onda Rayleigh; dicha curva puede ser extraída adoptando criterios de inspecciones visuales que provee una idea de la tendencia esperada que tendrá el perfil de velocidad de ondas de corte. Las curvas de dispersión con un suave y continuo decrecimiento de la velocidad de fase por aumento de la frecuencia están típicamente asociadas con el incremento de velocidades de onda de corte con el incremento de la profundidad (Park et al., 2010).

Una imprecisa o errónea curva de dispersión experimental puede causar substanciales errores en la inversión de la curva de velocidad (Gao et al., 2016; Park et al., 1999; Zhang & Chan., 2003). Un ejemplo típico de la formación ideal de modos de dispersión se presenta en la Figura 5-10.

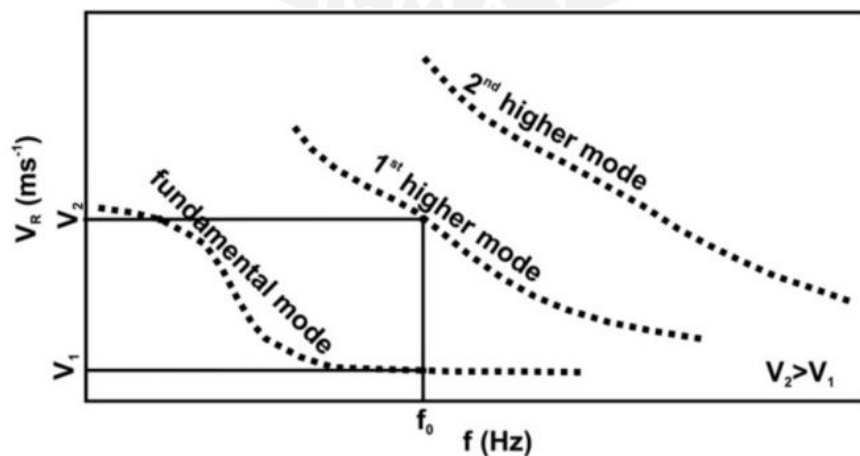
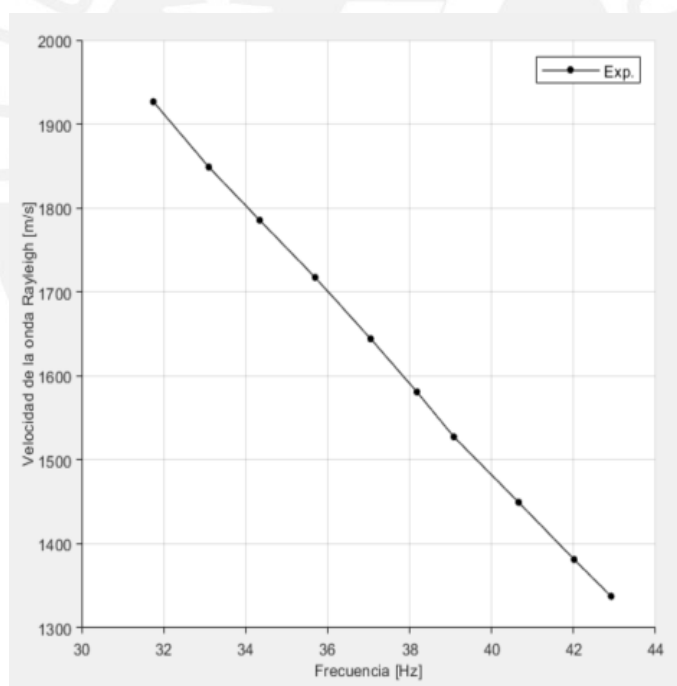


Figura 5-10 Ilustración del modo fundamental y superiores de las ondas Rayleigh
Fuente: Offset and linear spread geometry in the MASW method, 2010, p.214

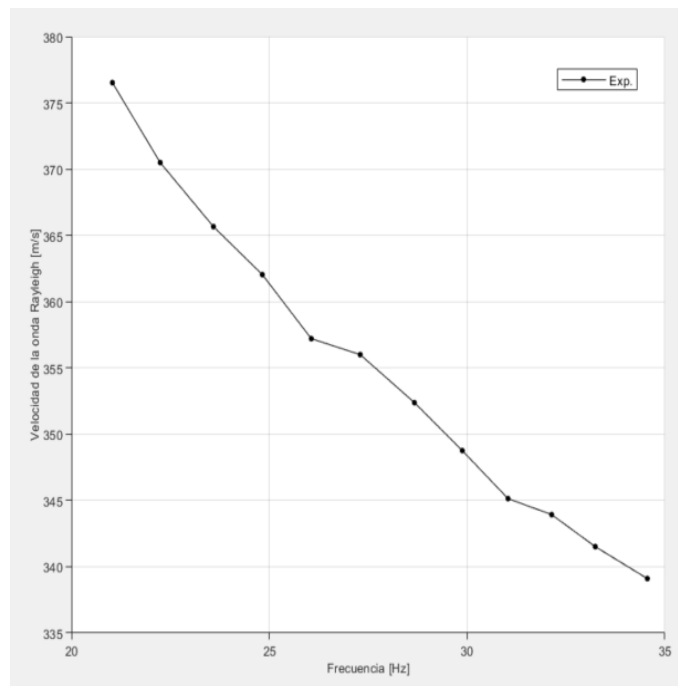
Por otro lado, los parámetros de campo tales como la longitud de extensión de los geófonos y la distancia a la fuente son factores importantes que afectan directamente la profundidad investigada, debido a efectos cercanos o lejanos de campo, y con ello se afecta la resolución de la imagen de dispersión y por lo tanto los resultados del método *MASW* (Park et al., 1999). Este criterio fue evaluado, y en base a ello se escogieron registros que den la mejor resolución en imágenes de dispersión, de donde se extraen las curvas de dispersión más idóneas.

En la Figura 5-11 se presenta la curva de dispersión de frecuencia vs velocidad de onda de fase Rayleigh para Cadarache. En esta curva se puede notar que es casi una recta, ya que la banda espectral tiene esa tendencia. Además, de esta curva serán de interés dos puntos extremos, en donde serán de interés, ya que al dividir la velocidad de fase por la frecuencia se obtendrán la longitud de onda máxima (λ_{\max}) y mínima (λ_{\min}).



*Figura 5-11 Curva de dispersión extraída de la imagen espectral para Cadarache
Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 5-12 se presenta la curva de dispersión de frecuencia vs velocidad de onda de fase Rayleigh para Grenoble. En esta curva se puede notar que tiene una tendencia exponencial, de acuerdo a la imagen de dispersión correspondiente descrita previamente. Del mismo modo, de esta curva serán de interés dos puntos extremos, ya que se obtendrán la longitud de onda máxima (λ_{\max}) y mínima (λ_{\min}).



*Figura 5-12 Curva de dispersión extraída de la imagen espectral para Grenoble
Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 5-13 se presenta la curva de dispersión de frecuencia vs velocidad de onda de fase Rayleigh para Mirandola. En esta curva se puede notar que tiene una tendencia exponencial, de acuerdo a la imagen de dispersión correspondiente descrita previamente. Del mismo modo, de esta curva serán de interés dos puntos extremos, ya que se obtendrán la longitud de onda máxima (λ_{\max}) y mínima (λ_{\min}).

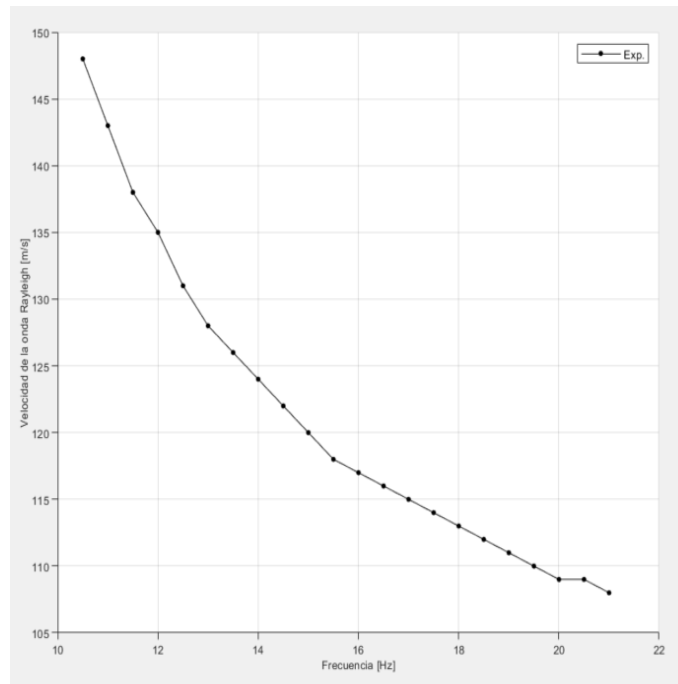


Figura 5-13 Curva de dispersión extraída de la imagen espectral para Mirandola
Fuente: Elaboración propia

5.1.4. Curvas de dispersión teórica – experimental

Así mismo, las curvas de dispersión teóricas del modo fundamental son calculadas por el método de la matriz de rigidez de Kausel y Roësset (1981) de una manera iterativa como se explicó previamente.

Como se mencionó en el sub capítulo 4.4, la curva de dispersión teórica es la que se origina por proponer un modelo de tierra en capas (cantidad de capas) y parámetros del modelo (espesor de la capa (h), la velocidad de onda de corte (β), el módulo de Poisson (ν) o la velocidad de onda de compresión (V_P) y la densidad de la masa (ρ)). El mejor modelo luego del análisis fue el de 6 capas; sin embargo, más adelante se explicará el beneficio que tiene considerar un mayor número de capas, ya que también se analizaron casos para 4 capas. En la Tabla 5.4 se presentan los parámetros del modelo de tierra plana empleado para 6 capas como parte del análisis *MASW* en Cadarache.

Tabla 5.4 Parámetros del modelo de tierra plana para Cadarache

Nº capa	$C_{T,min}$ (m/s)	$C_{T,max}$ (m/s)	ΔC_T (m/s)	V_P (m/s)	H (m)	β (m/s)	P (kg/m^3)
1	1000	2000	1	2100	5	735	1900
2	1000	2000	1	3750	5	1235	1900
3	1000	2000	1	4950	5	1640	1900
4	1000	2000	1	5400	5	1860	1900

5	1000	2000	1	6000	5	2045	1900
6	1000	2000	1	6300	5	2250	1900

Fuente: elaboración propia

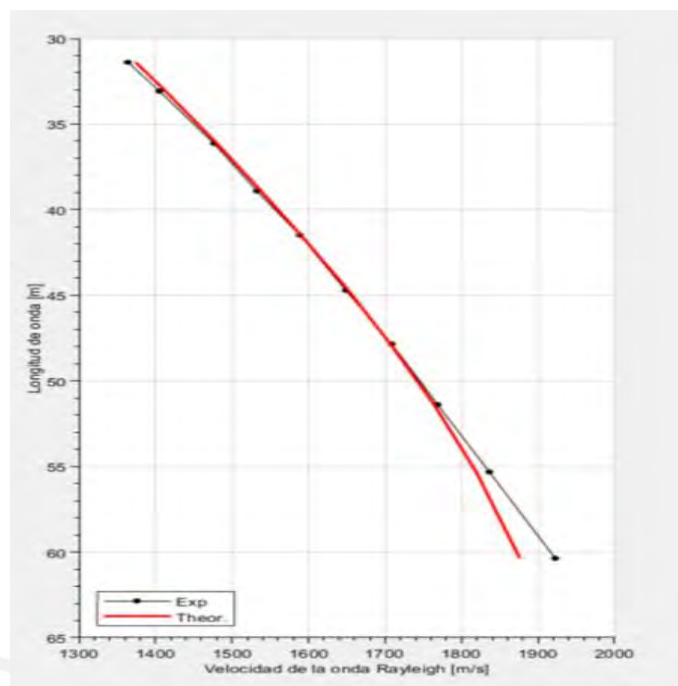


Figura 5-14 Curva de dispersión teórica y experimental para Cadarache

Fuente: Elaboración propia

El producto final de emplear el modelo descrito en la Tabla 5.4 es que se genera la curva roja presente en la Figura 5-14; esta curva contiene a las curvas experimental junto con la curva roja, la cual es la curva teórica.

Del mismo modo, en la Tabla 5.5 se presentan los parámetros del modelo de tierra plana para 6 capas empleado como parte del análisis *MASW* en Grenoble.

Tabla 5.5 Parámetros del modelo de tierra plana para Grenoble

N° capa	$C_{T,min}$ (m/s)	$C_{T,max}$ (m/s)	ΔC_T (m/s)	V_P (m/s)	H (m)	β (m/s)	P (kg/m^3)
1	330	800	1	990	1.2	319	1750
2	330	800	1	1020	1	340	1750
3	330	800	1	1080	2.4	359	1760
4	330	800	1	1100	2.5	370	1765
5	330	800	1	1200	3.3	425	1900
6	330	800	1	1240	3.3	430	1900

Fuente: elaboración propia

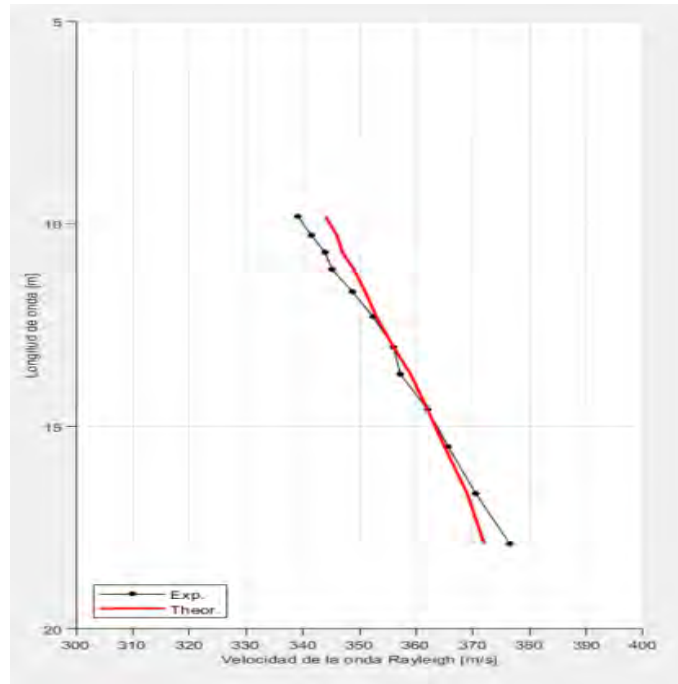


Figura 5-15 Curva de dispersión teórica y experimental para Grenoble
Fuente: Elaboración propia

El producto final de emplear el modelo descrito en la Tabla 5.5 es que se genera la curva roja presente en la Figura 5-15; esta curva contiene a las curvas experimental junto con la curva roja, la cual es la curva teórica.

Así mismo, en la Tabla 5.6 se presentan los parámetros del modelo de tierra plana para 6 capas empleado como parte del análisis *MASW* en Mirandola.

Tabla 5.6 Parámetros del modelo de tierra plana para Mirandola

Nº capa	$C_{T,min}$ (m/s)	$C_{T,max}$ (m/s)	ΔC_T (m/s)	V_P (m/s)	H (m)	β (m/s)	P (kg/m ³)
1	50	500	1	300	1.4	105	1550
2	50	500	1	340	1.1	115	1550
3	50	500	1	360	1.2	120	1550
4	50	500	1	385	1.7	145	1550
5	50	500	1	480	1.5	165	1630
6	50	500	1	510	2	170	1650

Fuente: elaboración propia

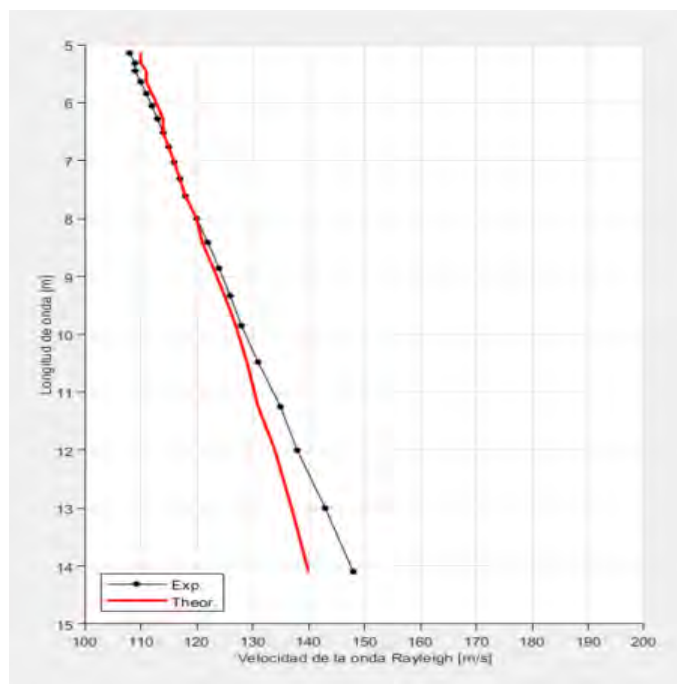


Figura 5-16 Curva de dispersión teórica y experimental para Mirandola
Fuente: Elaboración propia

El producto final de emplear el modelo descrito en la Tabla 5.6 es que se genera la curva roja presente en la Figura 5-16; esta curva contiene a las curvas experimental junto con la curva roja, la cual es la curva teórica.

5.1.5. Perfil de velocidad de onda de corte

Siguiendo con el proceso de inversión de la curva de dispersión, en el sub capítulo previo se presentó la curva teórica que mejor se ajusta a la curva de dispersión experimental, el desajuste se explicará en el siguiente sub capítulo; pero lo que se debe tener claro es que la curva roja fue obtenida por iteraciones y el resultado final presentado es la que se acerca más a la experimental, y por tanto nos dará un perfil de velocidad de onda de corte más realista de nuestros estratos de suelo en función de la profundidad.

Se debe recordar que el objetivo del análisis de inversión es obtener un perfil de velocidad como función de la profundidad, y el tiempo promedio de la velocidad de onda de corte, $V_{s,d}$, calculada para diferentes profundidades (CEN, 2004). Ello se representa con la Ecuación 5.1.

$$V_{s,d} = \frac{d}{\sum_{j=1}^M \frac{h_j}{\beta_j}} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde β_j y h_j son la velocidad de onda de corte y el espesor de la j^{th} capa, respectivamente, para un total de M capas de suelo. Si el perfil de velocidad de onda de corte estimada va hacia una profundidad menor que d , el perfil es extrapolada usando la velocidad del medio espacio hasta la profundidad d .

Se presenta el perfil de velocidad de onda de corte para Cadarache en la Figura 5-17. Se puede observar que la velocidad va desde los 735 m/s para los 5 primeros metros y para la profundidad que va desde 25 m a 30 m se desarrolla una velocidad de 2250 m/s. Se notan también los escalones de velocidad que se dan para diferentes profundidades hasta los 30 m de profundidad.

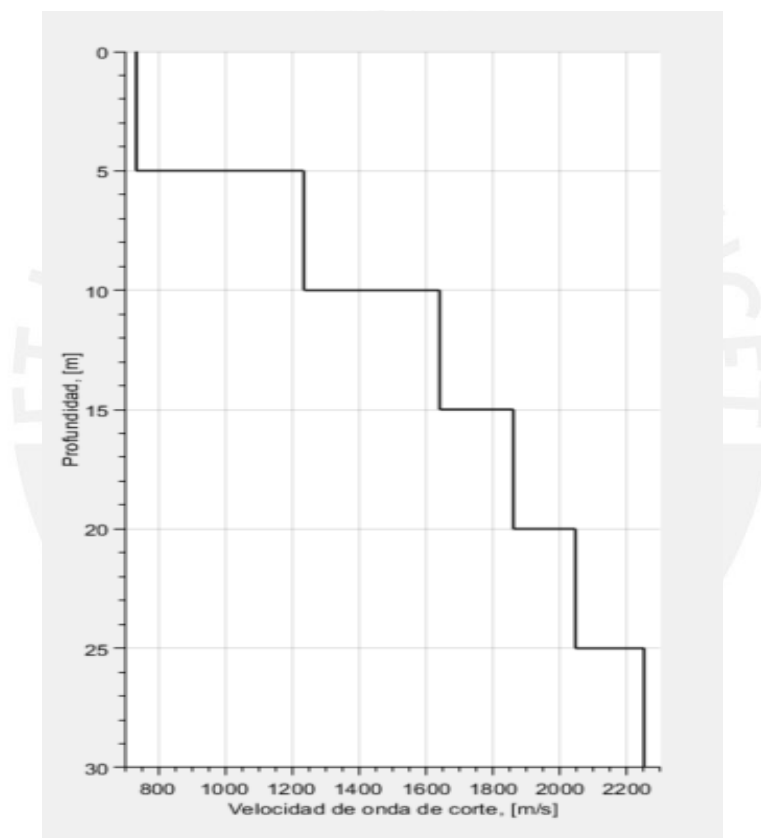


Figura 5-17 Perfil de velocidad de onda de corte para Cadarache
Fuente: Elaboración propia

Se presenta el perfil de velocidad de onda de corte para Cadarache en la Figura 5-18. Se puede observar que la velocidad va desde los 320 m/s desde la primera capa a profundidad de 0 m dando saltos de velocidad casi constantes para los siguientes 15 m llegando a los 430 m/s.

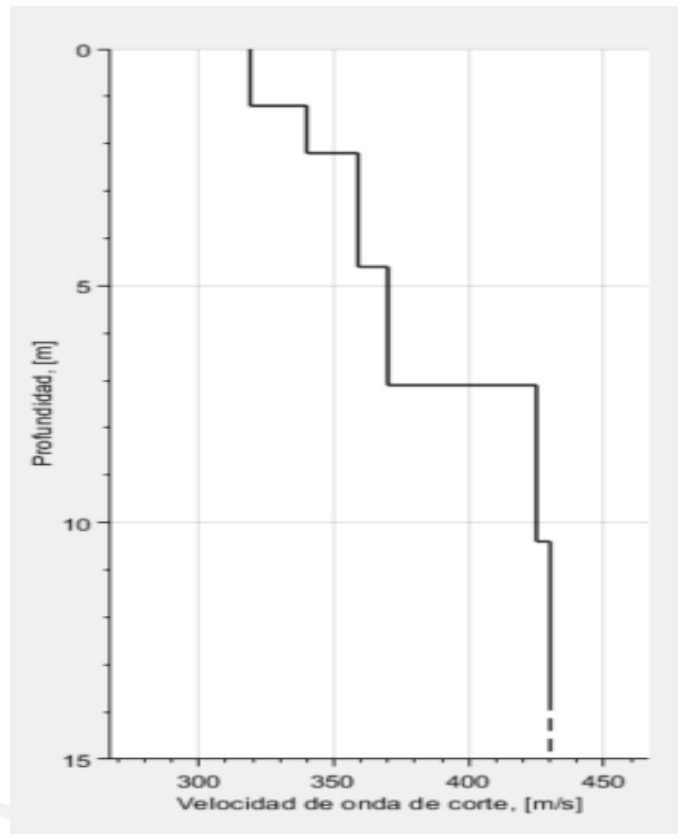


Figura 5-18 Perfil de velocidad de onda de corte para Grenoble
Fuente: Elaboración propia

Se presenta el perfil de velocidad de onda de corte para Cadarache en la Figura 5-19. Se puede observar que la velocidad va desde los 110 m/s desde la primera capa a profundidad de 0 m dando saltos de velocidad casi constantes para los siguientes 10 m llegando a los 170 m/s.

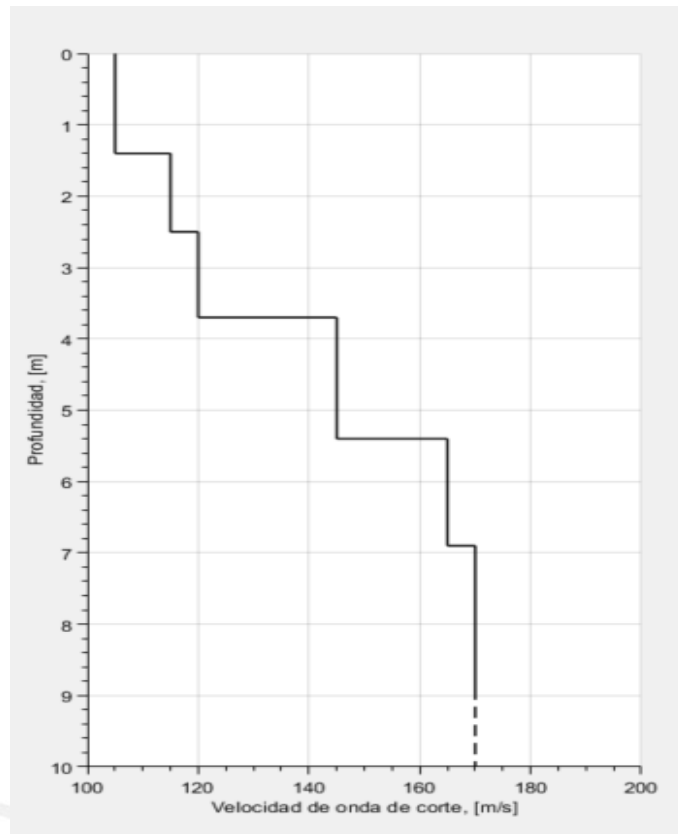


Figura 5-19 Perfil de velocidad de onda de corte para Mirandola
Fuente: Elaboración propia

Las profundidades y velocidades que se desarrollan en cada uno de los sitios de estudio, para los registros elegidos, siguen la ecuación descrita en la Ec.5.1, y se estima que continúa constante hasta los 30 m, si es no se define el perfil de velocidad hasta dicha profundidad, como es el caso en las Figuras 5-18 y 5-19.

Un uso común de la obtención de la V_S es la estimación de la $V_{S,30}$, la cual se define como el tiempo de viaje promedio por la velocidad de onda de corte en los 30 primeros metros de la capa de superficie; ello debido a que esta $V_{S,30}$ es usada para tomar en cuenta los efectos de movimiento local por la acción sísmica cuando los espectros de diseño específicos del sitio son definidos de acuerdo al Eurocode 8 (CEN, 2004).

5.1.6. Discusión del desajuste entre las curvas de dispersión experimental y teórica

En el sub-capítulo 5.4 se presentaron las curvas de dispersión teóricas, las cuales se ajustan mejor a la curva de dispersión experimental. Sin embargo, en el modelo de tierra plana dividida en capas de suelo, antes de proponer un modelo de 6 capas, se planteó un modelo de 4 capas. Para decidir el modelo ideal a usar, se empleó la ecuación 4.17, bajo la metodología explicada en el sub-capítulo 4.16.

Como se explicó en sub capítulos previos, la curva teórica es obtenida mediante un proceso iterativo, por ende, se aborda el problema por prueba y error, y es por ello de interés cuantificar este error, según la Ecuación 4.17 en la que se evalúa el desajuste (misfit) entre la curva teórica y experimental.

Se presenta en la Tabla 5.7 los parámetros del modelo de tierra plana considerado de 6 capas para Cadarache, y a través de la Ecuación 4.17 es que se programa ello en Matlab y se calcula un error de 1.2% para el sitio de estudio.

Tabla 5.7 Parámetros del modelo de tierra plana de 6 capas para Cadarache

Nº capa	$C_{T,min}$ (m/s)	$C_{T,max}$ (m/s)	ΔC_T (m/s)	V_P (m/s)	H (m)	β (m/s)	P (kg/m ³)
1	1000	2000	1	2100	5	735	1900
2	1000	2000	1	3750	5	1235	1900
3	1000	2000	1	4950	5	1640	1900
4	1000	2000	1	5400	5	1860	1900
5	1000	2000	1	6000	5	2045	2100
6	1000	2000	1	6300	5	2250	2900

Fuente: elaboración propia

En la Figura 5-20 se presenta el desajuste entre las curvas de interés, y al mismo tiempo el perfil de velocidad en función de la profundidad del sitio de estudio para las condiciones del problema asumido en un modelo de 6 capas.

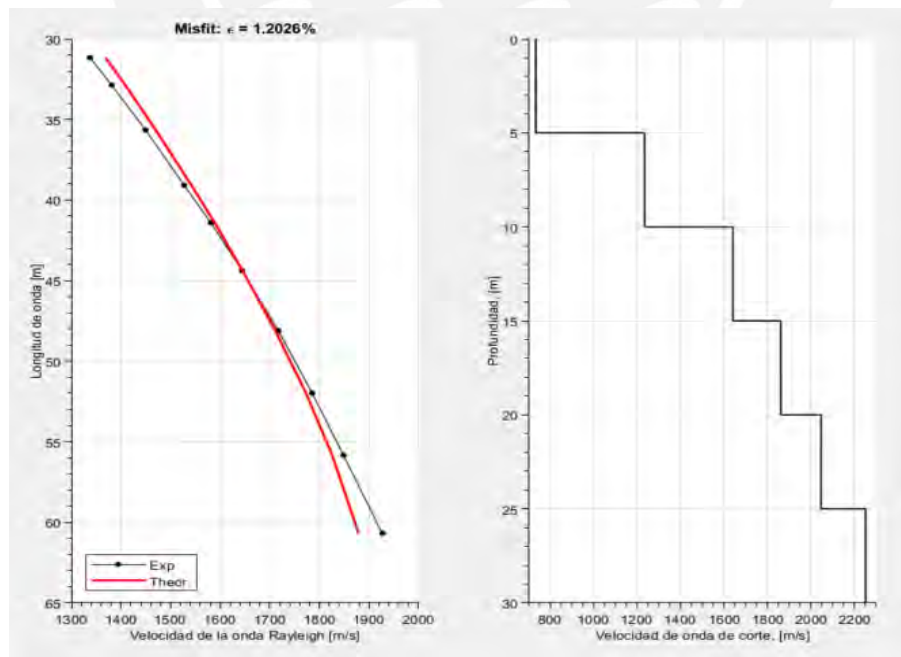


Figura 5-20 Desajuste (misfit) entre las curvas teórica y experimental en un modelo de 6 capas para Cadarache

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se presenta en la Tabla 5.8 los parámetros del modelo de tierra plana considerado de 4 capas para Cadarache, y a través de la Ecuación 4.17 es que se programa ello en Matlab y se calcula un error de 4,9 % para el sitio de estudio.

Tabla 5.8 Parámetros del modelo de tierra plana de 4 capas para Cadarache

Nº capa	$C_{T,min}$ (m/s)	$C_{T,max}$ (m/s)	ΔC_T (m/s)	V_P (m/s)	H (m)	β (m/s)	P (kg/m^3)
1	1000	2000	1	3000	7.5	1000	1800
2	1000	2000	1	4500	7.5	1550	1900
3	1000	2000	1	4800	7.5	1650	1900
4	1000	2000	1	6000	7.5	2200	2900

Fuente: elaboración propia

En la Figura 5-21 se presenta el desajuste entre las curvas de interés, y al mismo tiempo el perfil de velocidad en función de la profundidad del sitio de estudio para las condiciones del problema asumido en un modelo de 4 capas.

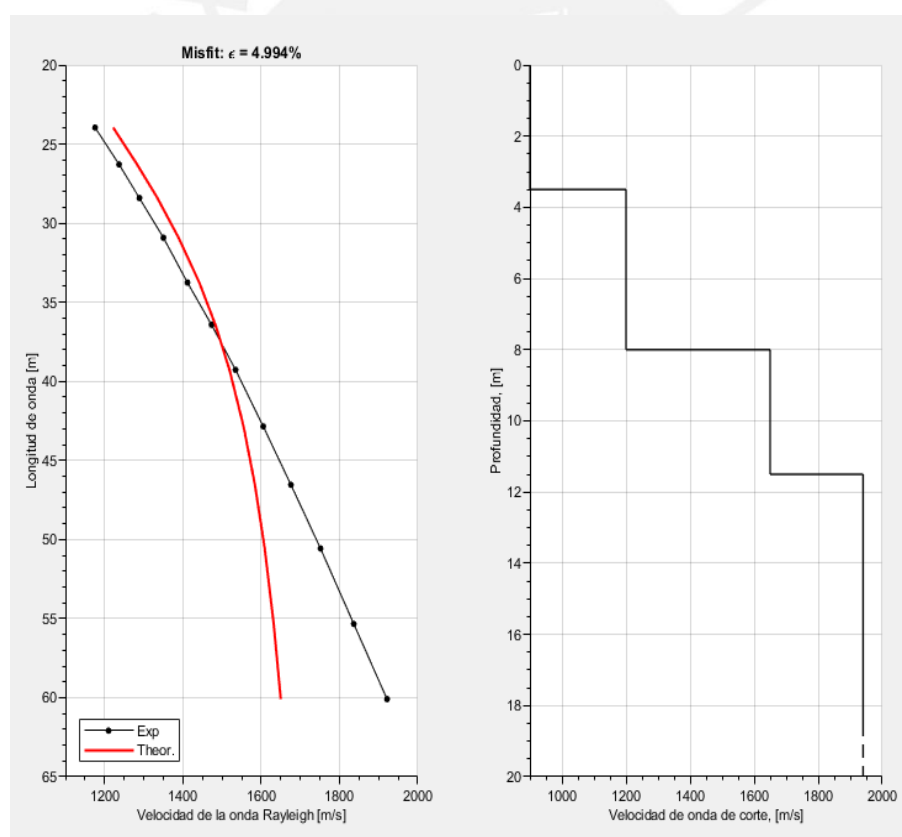


Figura 5-21 Desajuste (misfit) entre las curvas teórica y experimental en un modelo de 4 capas para Cadarache

Fuente: Elaboración propia

Luego del análisis, basados en el criterio del número de capas, se opta por el modelo de 6 capas; con ello, se obtiene una mejor representación de las velocidades de onda de corte en

el terreno como producto del método *MASW*. En la Figura 5-22 se muestra las curvas teórica y experimental ploteadas en la imagen de dispersión 2D, a modo de mostrar el desajuste de una forma visual, observando que el modelo planteado para 6 capas se ajusta mejor a la realidad del terreno de estudio para Cadarache.

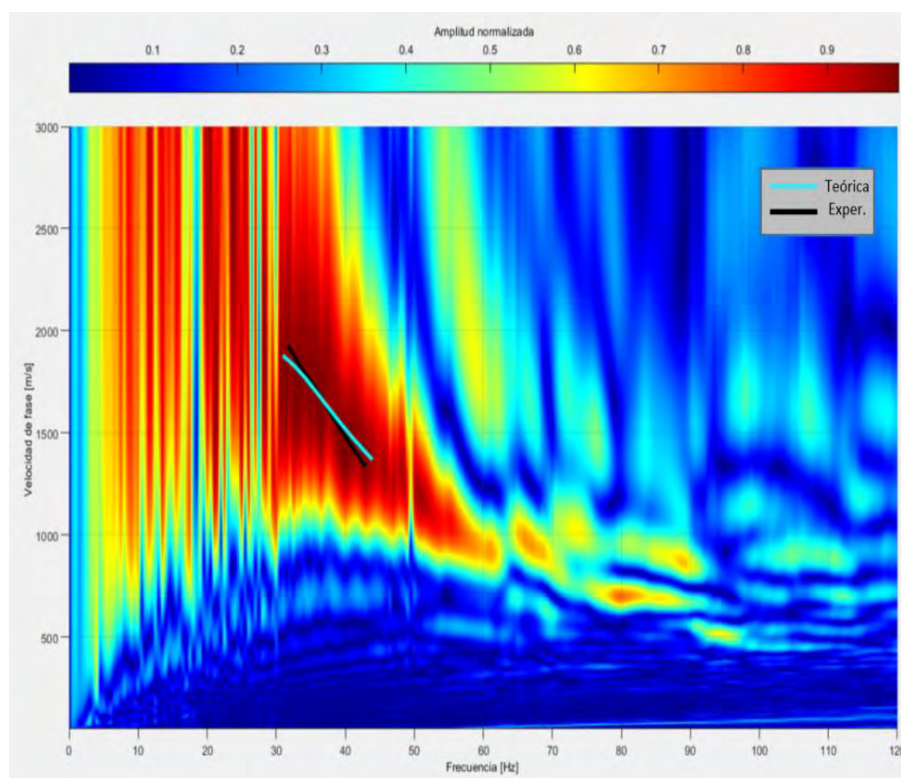


Figura 5-22 Imagen de dispersión 2-D y curvas de dispersión teórica y experimental para Cadarache
Fuente: Elaboración propia

Para el caso de Grenoble, se presenta en la Tabla 5.9 los parámetros del modelo de tierra plana considerado para 6, y a través de la Ecuación 4.17 es que se programa ello en Matlab y se calcula un error de 0.6 % para el sitio de estudio.

Tabla 5.9 Parámetros del modelo de tierra plana de 6 capas para Grenoble

N° capa	$C_{T,min}$ (m/s)	$C_{T,max}$ (m/s)	ΔC_T (m/s)	V_P (m/s)	H (m)	β (m/s)	P (kg/m^3)
1	330	800	1	990	1.2	319	1750
2	330	800	1	1020	1	340	1750
3	330	800	1	1080	2.4	359	1760
4	330	800	1	1100	2.5	370	1765
5	330	800	1	1200	3.3	425	1900
6	330	800	1	1240	3.3	430	1900

Fuente: elaboración propia

En la Figura 5-23 se presenta el desajuste entre las curvas de interés, y al mismo tiempo el perfil de velocidad en función de la profundidad del sitio de estudio para las condiciones del problema asumido en un modelo de 6 capas.

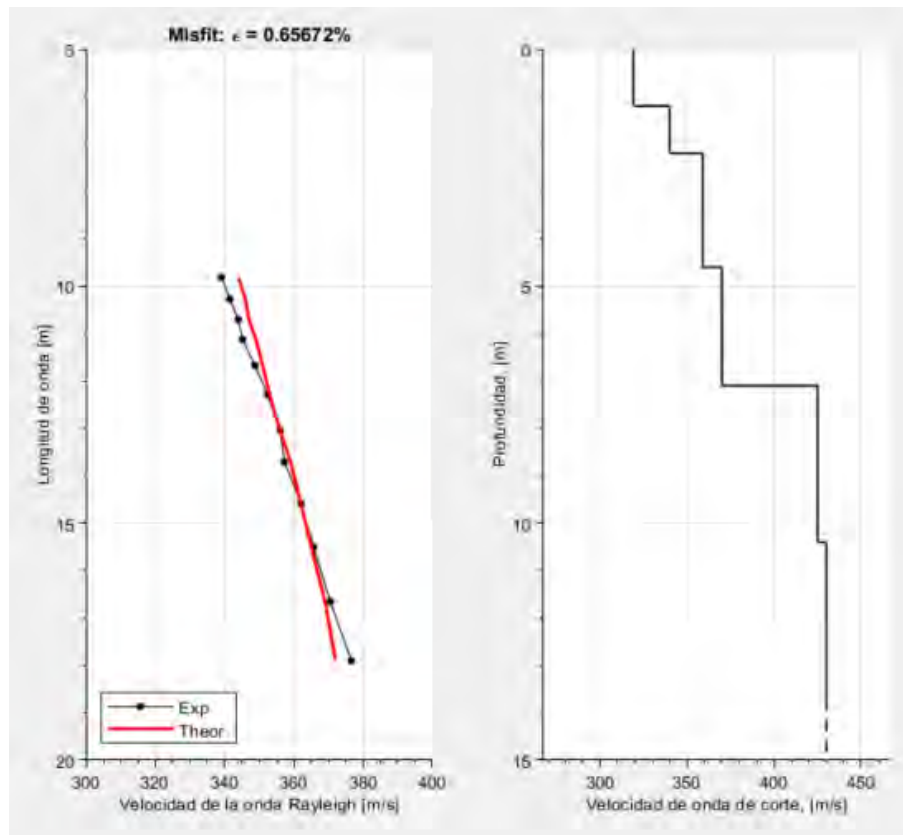


Figura 5-23 Desajuste (misfit) entre las curvas teórica y experimental en un modelo de 6 capas para Grenoble

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se presenta en la Tabla 5.10 los parámetros del modelo de tierra plana considerado de 4 capas para Grenoble, y a través de la Ecuación 4.17 es que se programa ello en Matlab y se calcula un error de 0,9 % para el sitio de estudio.

Tabla 5.10 Parámetros del modelo de tierra plana de 4 capas para Grenoble

N° capa	$C_{T,min}$ (m/s)	$C_{T,max}$ (m/s)	ΔC_T (m/s)	V_P (m/s)	H (m)	β (m/s)	P (kg/m^3)
1	330	800	1	1050	2.5	320	1765
2	330	800	1	1080	3.2	360	1900
3	330	800	1	1245	2.4	410	1900
4	330	800	1	1260	2.4	410	1900

Fuente: elaboración propia

En la Figura 5-21 se presenta el desajuste entre las curvas de interés, y al mismo tiempo el perfil de velocidad en función de la profundidad del sitio de estudio para las condiciones del problema asumido en un modelo de 4 capas.

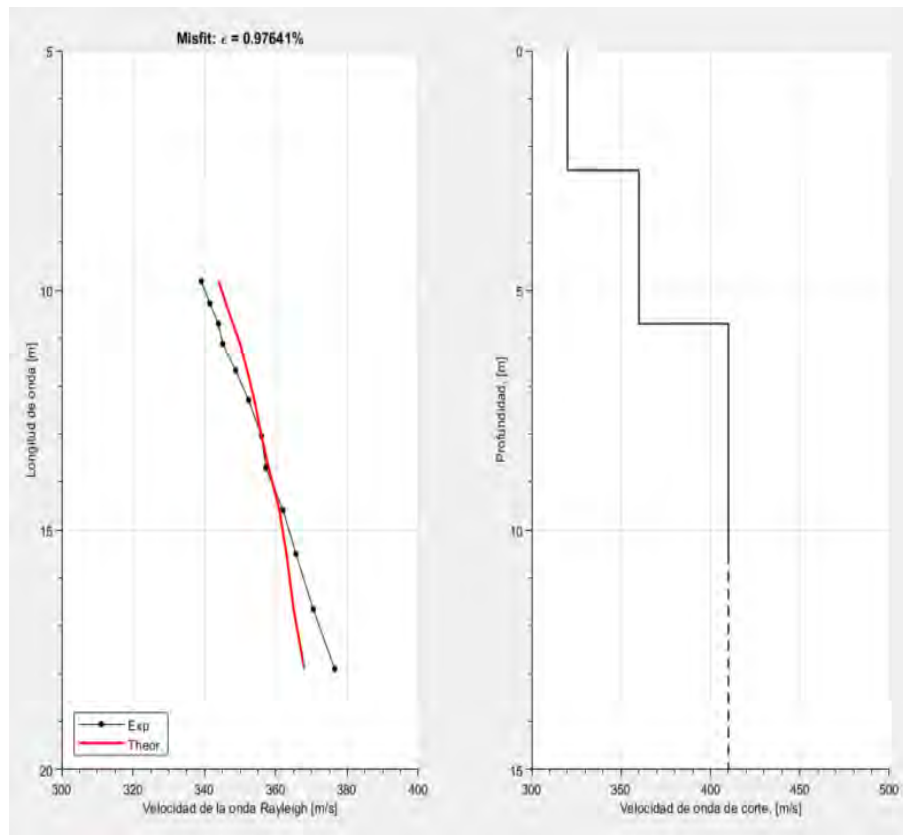


Figura 5-24 Desajuste (misfit) entre las curvas teórica y experimental en un modelo de 4 capas para Grenoble
Fuente: Elaboración propia

Luego del análisis, basados en el criterio del número de capas, se opta por refinar el resultado del error aumentando las capas del modelo, ya que, a un mayor número de capas se obtiene un menor error; además como en este caso se representa para los primeros 15 m un perfil de velocidad obtenido, será mejor aumentar las capas; con ello, se obtiene una mejor representación de las velocidades de onda de corte en el terreno como producto del método *MASW*. En la Figura 5-22 se muestra las curvas teórica y experimental ploteadas en la imagen de dispersión 2D, a modo de mostrar el desajuste de una forma visual, observando que el modelo planteado se ajusta mejor a la realidad del terreno de estudio para Grenoble.

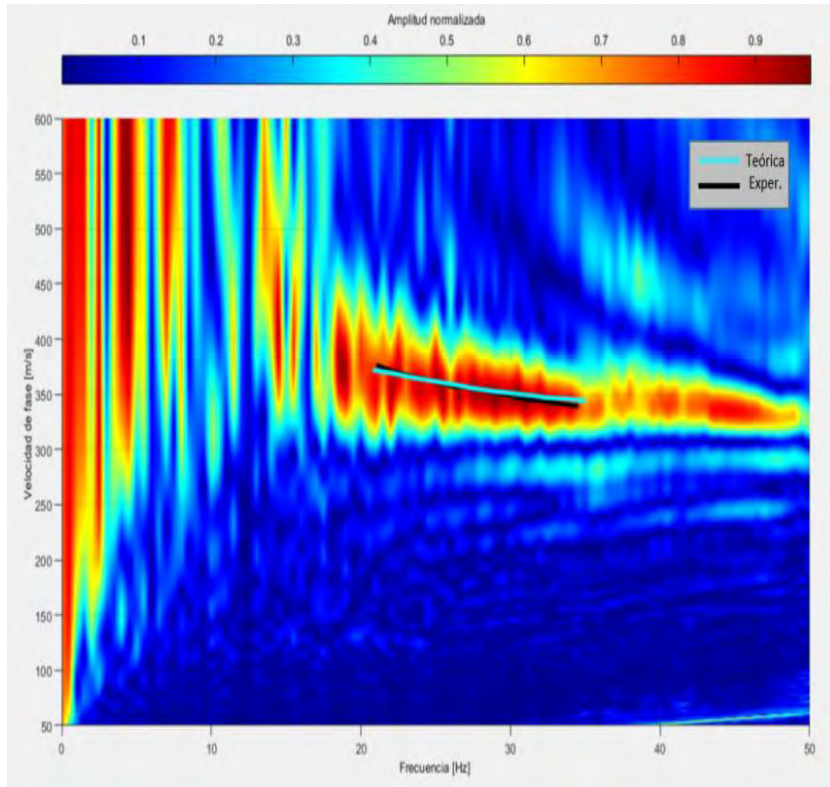


Figura 5-25 Imagen de dispersión 2-D y curvas de dispersión teórica y experimental para Grenoble
Fuente: Elaboración propia

Para el caso de Mirandola, se presenta en la Tabla 5.11 los parámetros del modelo de tierra plana considerado de 6, y a través de la Ecuación 4.17 es que se programa ello en Matlab y se calcula un error de 1.2% para el sitio de estudio.

Tabla 5.11 Parámetros del modelo de tierra plana de 6 capas para Mirandola

Nº capa	$C_{T,min}$ (m/s)	$C_{T,max}$ (m/s)	ΔC_T (m/s)	V_P (m/s)	H (m)	β (m/s)	P (kg/m ³)
1	50	500	1	300	1.4	105	1550
2	50	500	1	340	1.1	115	1550
3	50	500	1	360	1.2	120	1550
4	50	500	1	385	1.7	145	1550
5	50	500	1	480	1.5	165	1630
6	50	500	1	510	2	170	1650

Fuente: elaboración propia

En la Figura 5-26 se presenta el desajuste entre las curvas de interés, y al mismo tiempo el perfil de velocidad en función de la profundidad del sitio de estudio para las condiciones del problema asumido en un modelo de 6 capas.

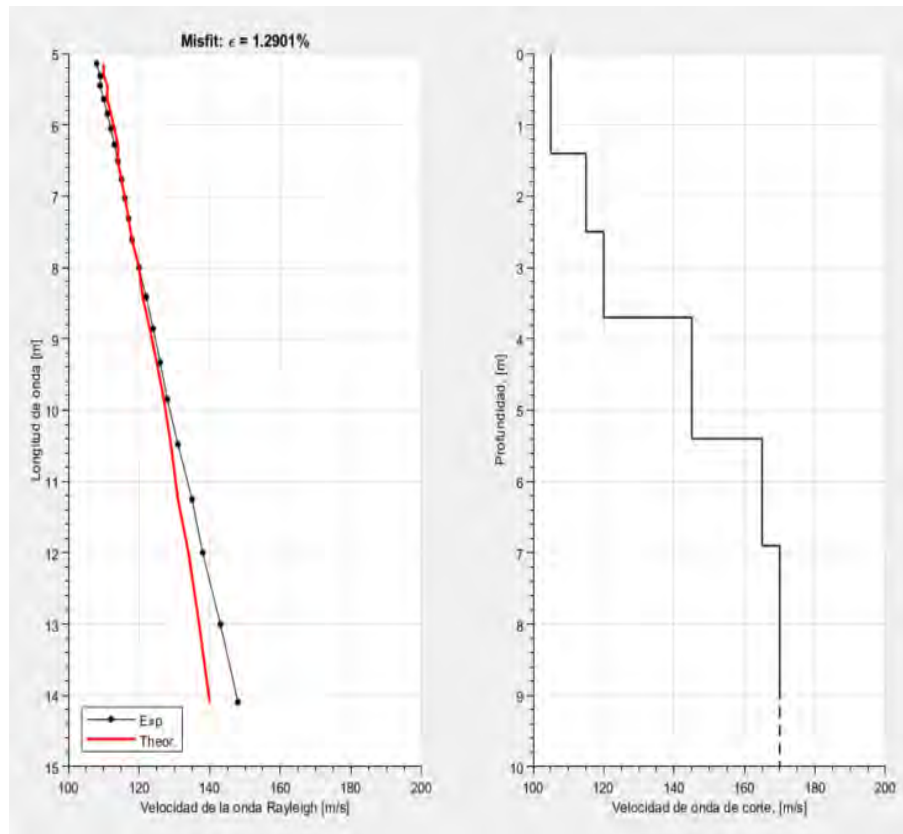


Figura 5-26 Desajuste (misfit) entre las curvas teórica y experimental en un modelo de 6 capas para Mirandola
Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se presenta en la Tabla 5.12 los parámetros del modelo de tierra plana considerado de 4 capas para Mirandola, y a través de la Ecuación 4.17 es que se programa ello en Matlab y se calcula un error de 1,8 % para el sitio de estudio.

Tabla 5.12 Parámetros del modelo de tierra plana de 4 capas para Mirandola

Nº capa	$C_{T,min}$ (m/s)	$C_{T,max}$ (m/s)	ΔC_T (m/s)	V_P (m/s)	H (m)	β (m/s)	P (kg/m^3)
1	50	500	1	300	1.9	105	1550
2	50	500	1	360	2.3	125	1550
3	50	500	1	450	2.7	150	1550
4	50	500	1	510	2	170	1650

Fuente: elaboración propia

En la Figura 5-21 se presenta el desajuste entre las curvas de interés, y al mismo tiempo el perfil de velocidad en función de la profundidad del sitio de estudio para las condiciones del problema asumido en un modelo de 4 capas.

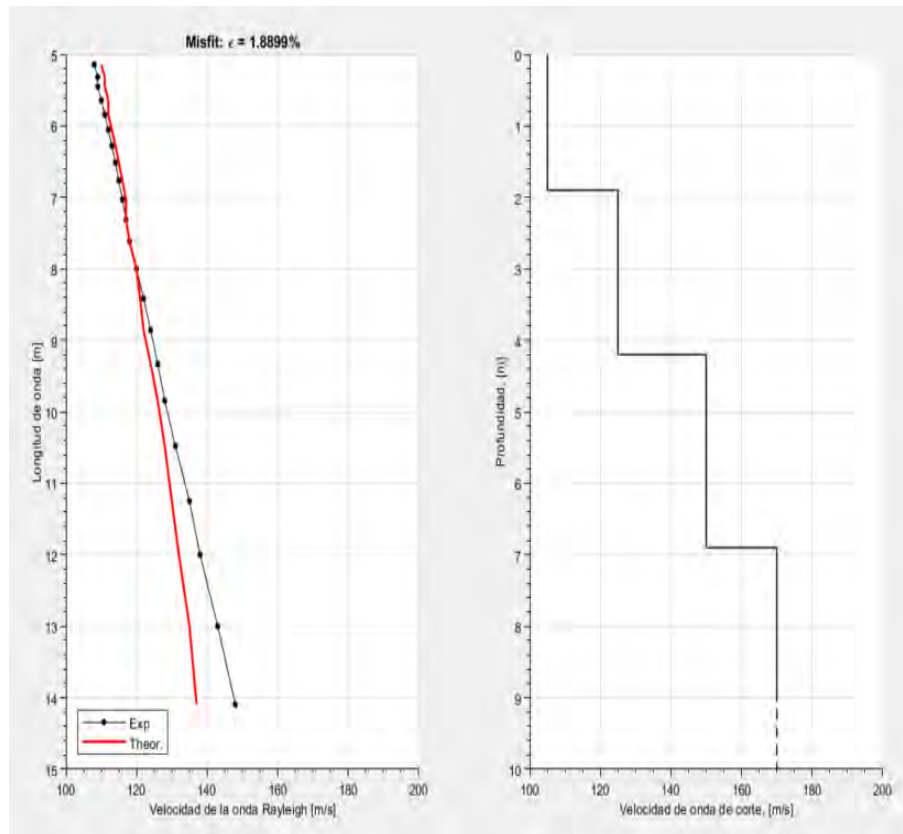


Figura 5-27 Desajuste (misfit) entre las curvas teórica y experimental en un modelo de 4 capas para Mirandola
Fuente: Elaboración propia

Luego del análisis, basados en el criterio del número de capas, se opta por refinar el resultado del error aumentando las capas del modelo, ya que, a un mayor número de capas se obtiene un menor error; además como en este caso se representa para los primeros 10 m un perfil de velocidad obtenido, será mejor aumentar las capas; con ello, se obtiene una mejor representación de las velocidades de onda de corte en el terreno como producto del método *MASW*. En la Figura 5-28 se muestra las curvas teórica y experimental ploteadas en la imagen de dispersión 2D, a modo de mostrar el desajuste de una forma visual, observando que el modelo planteado se ajusta mejor a la realidad del terreno de estudio para Mirandola.

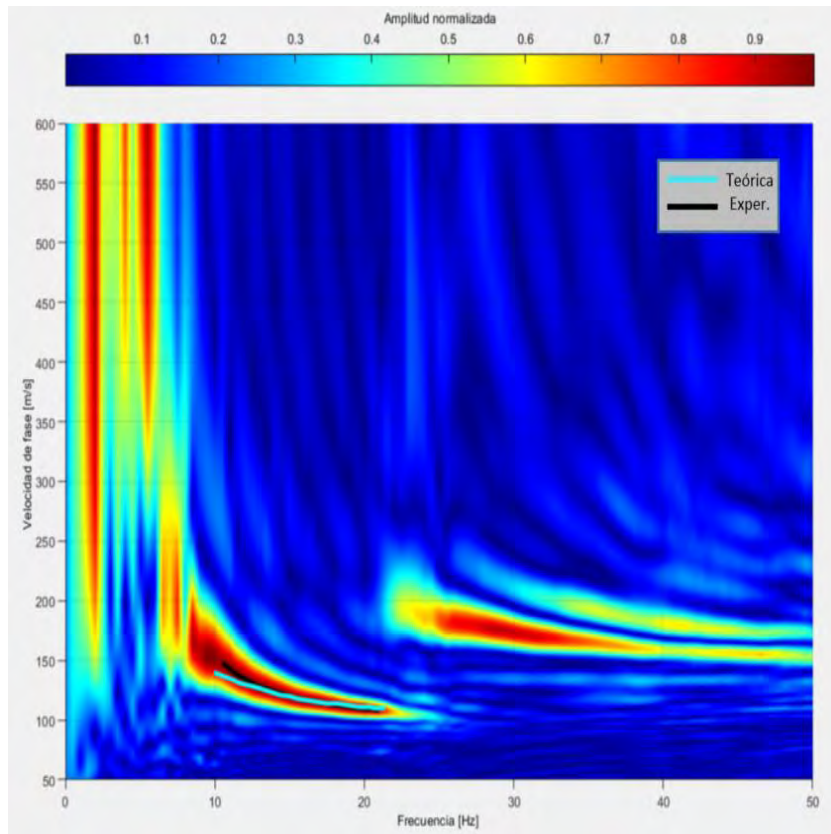


Figura 5-28 Imagen de dispersión 2-D y curvas de dispersión teórica y experimental para Mirandola
Fuente: Elaboración propia

Se resalta que las velocidades de ondas de compresión (V_P) y de ondas de corte para las capas intermedias (β) adoptados en los modelos para cada sitio han sido asumidas de acuerdo a las velocidades establecidas por el NEHRP (2003) para la velocidad de onda de corte para los 30 primeros metros de profundidad ($V_{S,30}$) y las velocidades de ondas de compresión establecidas por la ASTM D 5777 – 00. En las Tablas 5.13 y 5.14 se presentan el rango de velocidades según su clasificación para suelo y roca.

Tabla 5.13 Clasificación sísmica de suelos

Tipo de suelo	Descripción	$V_{S,30}$ (m/s)
A	Roca dura	>1500
B	Roca	$760 < V_S < 1500$
C	Suelo muy denso y roca blanda	$360 < V_S < 760$
D	Suelo rígido	$180 < V_S < 360$
E	Suelo blando	<180
F	Suelos especiales (licuables, colapsables, arcillas de muy alta plasticidad, suelos orgánicos de más de 3 m de espesor)	-

Fuente: NEHRP (2003)

Tabla 5.14 Rango de velocidades de ondas de compresión para suelos y rocas

Descripción	V _P (m/s)
Suelo intemperizado	240-260
Grava o arena seca	460-915
Arena saturada	1220-1830
Arcilla saturada	910-2750
Agua	1430-1665
Agua de mar	1460-1525
Arenisca	1830-3960
Esquisto, arcilla esquistosa	2750-4270
Tiza	1830-3960
Caliza	2134-6100
Granito	4575-5800
Roca metamórfica	3050-7000

Fuente: ASTM D 5777 – 95 (2000)

Finalmente, luego del análisis para los modelos presentados, se obtiene un menor error (desajuste entre las curvas teórica y experimental), para el modelo de 6 capas; no obstante, esto podría mejorar, pero el error obtenido para los modelos de 4 o 6 capas están por debajo del error aceptado por diversos autores de 5% (Garofalo et al., 2018). Se presenta la Tabla 5.15 como resumen del error obtenido para los modelos de los sitios estudiados, en base al número de capas empleados en el modelo de tierra plana con el que se determinó la curva de dispersión teórica, encontrando el mejor ajuste a la curva de dispersión experimental. El modelo final elegido es el de 6 capas para los tres lugares de estudio.

Tabla 5.15 Error obtenido (misfit) según el número de capas para Cadarache, Grenoble y Mirandola

Nº capas en el modelo	Cadarache	Grenoble	Mirandola
6	1.2 %	0.6 %	1.2 %
4	4.9 %	0.9 %	1.8 %

Fuente: elaboración propia

5.1.7. Comparación entre la tesis y el proyecto de la InterPACIFIC

La presente tesis pretende estudiar el método *MASW*, lo cual se ha realizado con éxito, desarrollando los objetivos planteados como parte del trabajo. Por lo tanto, en este sub capítulo se comparan los resultados obtenidos para los tres sitios de estudio con los obtenidos como parte del proyecto del InterPACIFIC: “*Interpacific Project: comparison of invasive and non invasive methods for seismic site characterization, Part I: Intra-comparison of Surface wave methods*”.

En primer lugar, como parte del proyecto de la *InterPACIFIC*, cabe mencionar que el objetivo planteado en su estudio fue evaluar la fiabilidad de usar métodos in situ (*in-hole*) y de usar métodos de ondas superficiales; ambos usados para determinar la velocidad de onda de corte (V_S). Para realizar tal objetivo, se eligieron los mismos sitios empleados en el desarrollo de la tesis: Cadarache, Grenoble y Mirandola. El resultado del proyecto fue realizado gracias al trabajo de 14 equipos de usuarios expertos en la materia, los cuales analizaron los mismos datos que fueron analizados en el presente trabajo de tesis (data activa); así como también, analizaron data del tipo pasiva con técnicas como *Microtremors Array Measurements (MAMs)*, técnica utilizada para medir las vibraciones del ruido ambiental), e incluso combinando data del tipo activa y pasiva. Así, cada equipo aplicó diferentes enfoques para obtener la $V_{S,30}$, con lo que se obtuvo variabilidad entre cada equipo; sin embargo, la variabilidad en resultados resultó pequeña; esta fue medida en el estudio mediante el *Coefficient of Variation (CoV)* de la velocidad de fase como función de la profundidad; en el estudio fue calculado como el ratio entre la desviación estándar sobre el valor promedio de los resultados obtenidos.

En segundo lugar, como parte de la tesis, se obtuvieron los perfiles de velocidad para los tres sitios de estudios, los cuales fueron los mismos estudiados como parte del proyecto del *InterPACIFIC*. Así mismo, se estudió la influencia del número de capas usados en el modelo plano de tierra en capas; con ello, se pretende entonces comparar los resultados finales, los cuales fueron obtenidos para los modelos de 6 capas para la tesis con los modelos finales obtenidos por parte del proyecto del *InterPACIFIC* presentados a continuación.

Se señala también que el tipo de data analizada como parte de la tesis fue solamente data activa presentada previamente en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3. La data activa se refiere a la obtenida como parte del mismo experimento *MASW*, por medio del golpeo del martillo y generación de ondas superficiales (fuentes activas); por otro lado, la data pasiva es referida a las ondas generadas como parte de las vibraciones del ruido ambiental. No obstante, el alcance del trabajo fue explicar el método *MASW*, mediante el estudio de la data activa.

5.1.7.1. Comparación en curvas de dispersión y perfil de velocidad: Cadarache

En la Figura 5-29 se presenta a la izquierda la curva de dispersión experimental obtenida por los más de 14 de grupos formados de especialistas en el *Interpacific project*; no

obstante, los puntos ploteados en el gráfico pertenecen a los resultados de la data analiza por estos grupos.

Además, también se observa que los datos de frecuencias altas o de cortas longitudes de ondas fueron de baja calidad para frecuencias mayores a 50 Hz, según la dispersión de la banda mostrada, y según la variación obtenida entre los diversos grupos. Este aplanamiento de la tendencia de dispersión a bajas frecuencias rara vez se observa, pero permite al analista una mejor estimación de la velocidad de la roca de medio espacio/basamento rocoso (aprox. 2500 m/s) (Ver sección resaltada en azul en la Figura 5-29).

Así mismo, se resalta que la elección más popular fue la de analizar la data activa y pasiva entre todos los equipos; con ello, algunos equipo usaron la data pasiva, y solo el equipo 14 analizó la data activa, la cual tiene mejor resolución después de los 25 Hz (S.Foti & F. Garofalo, Italia). Además, en la tesis, como se menciona antes, solo se ha analizado la data activa, y la curva extraída de la imagen con mejor resolución obtenida de los registros da como resultado la presentada en la Figura 5-29 a la derecha. Por consiguiente, se puede notar que respecto a la curva obtenida para la banda de frecuencias de entre 25 Hz a 40 Hz (parte izquierda de la Figura 5-29), la tendencia es lineal como se indica en la sección roja resaltada, lo cual nos indica que la curva de dispersión experimental extraída, para tal banda de frecuencias, es aceptable.

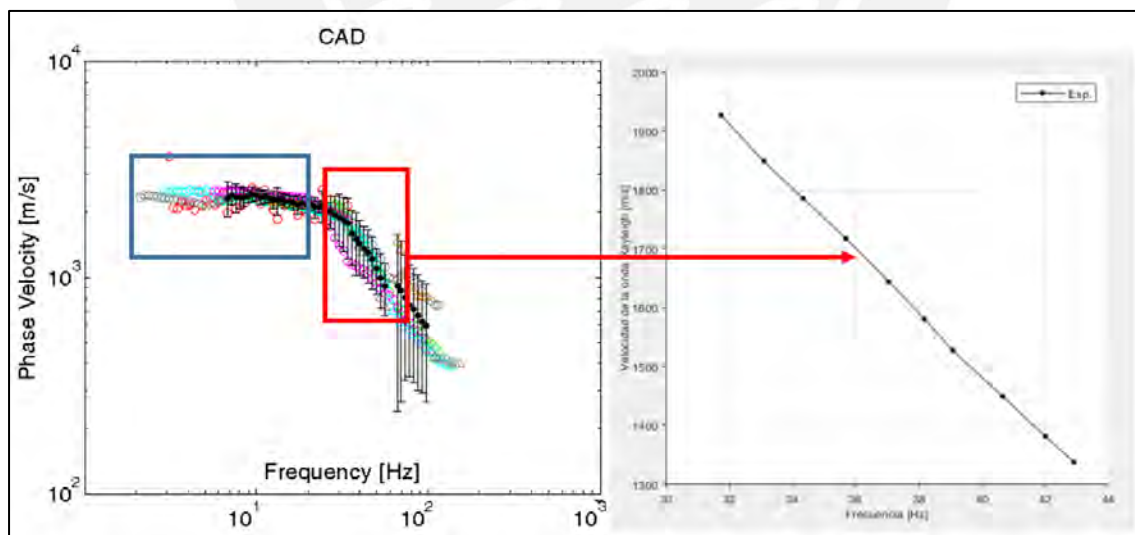


Figura 5-29 Comparación entre curvas de dispersión experimental del InterPACIFIC project y la tesis para Cadarache
Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en la parte derecha de la Figura 5-29 se puede notar que la curva de dispersión generada por parte de la tesis guarda gran relación con la presentada por la del grupo 14

del *InterPACIFIC project*; sin embargo, se debe tener en cuenta que este último estudio tiene un enfoque diferente, ya que para la parte encerrada en azul para frecuencias de 0 Hz a 30 Hz se usaron métodos pasivos como el de los *Microtremors*, también conocidos como MAMs, los cuales sirven para mediciones de bajas frecuencias y donde la fuente es producida por el ruido ambiental (fuentes pasivas); este enfoque por tanto no es tomado en cuenta y la curva de dispersión generada es solamente empleando el método *MASW*, el cual considera solo fuentes generadoras activas (Park et al., 1999).

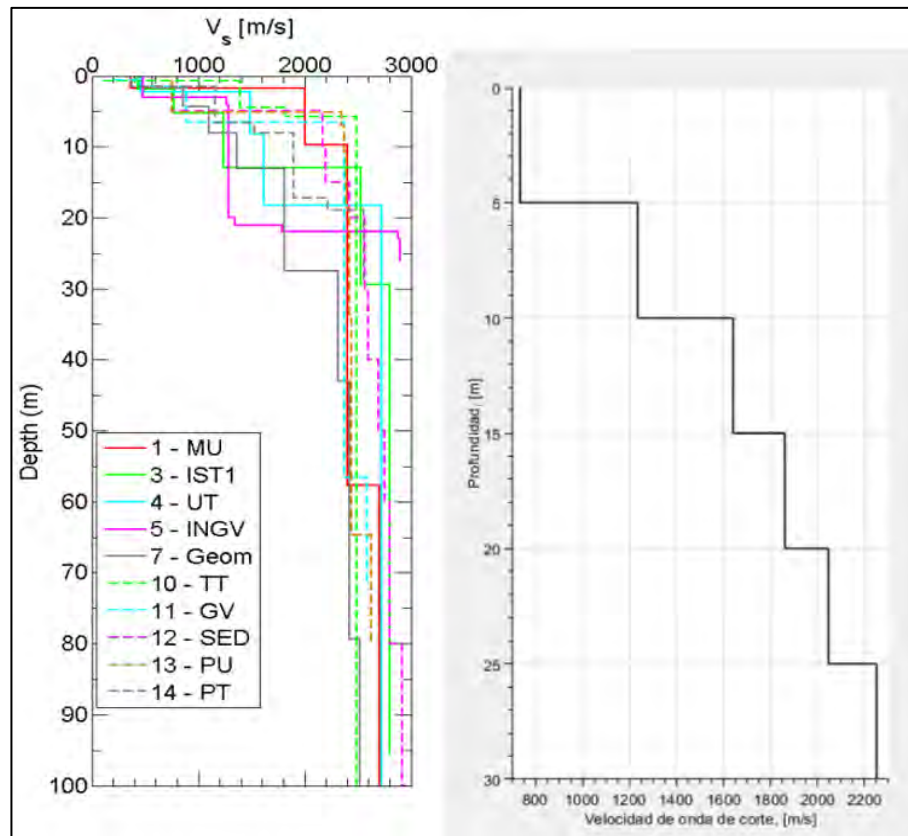


Figura 5-30 Comparación entre perfiles de velocidad de ondas de corte (V_s) del *InterPACIFIC* y la tesis para Cadarache
Fuente: Elaboración propia

Además, en la Figura 5-30 se presenta a la izquierda los perfiles de velocidad generados por los 14 grupos y a la derecha el perfil de velocidad generado como parte de la tesis. Se discute que esta variabilidad entre los perfiles generados, los cuales en el estudio se pueden cuantificar mediante un indicador llamado *Coefficient of Variation (CoV)*, se indica en el estudio de la *InterPACIFIC* que para los primeros 20 m existe un CoV cercano a 0.5 para profundidades mayores. Una razón de ello, es que para las bandas de altas frecuencias esta observación es probablemente asociada a la variabilidad lateral en partes muy superficiales

del depósito o a la fractura local y los patrones de meteorización en la masa rocosa cercana a la superficie.

Finalmente, en la Figura 5-31 se presenta diversas imágenes de dispersión generadas con los registros empleados para el cálculo de la curva de dispersión utilizada en el sitio de Cadarache para la tesis, se menciona que para obtener la mejor curva de dispersión de ondas Rayleigh se evaluó cada registro presentado, para con ello determinar una curva, de las tantas generadas, bajo el criterio de trabajar con la que aporte la imagen con una mejor resolución; sin embargo, se utilizaron todas para la elección de la curva a extraer.

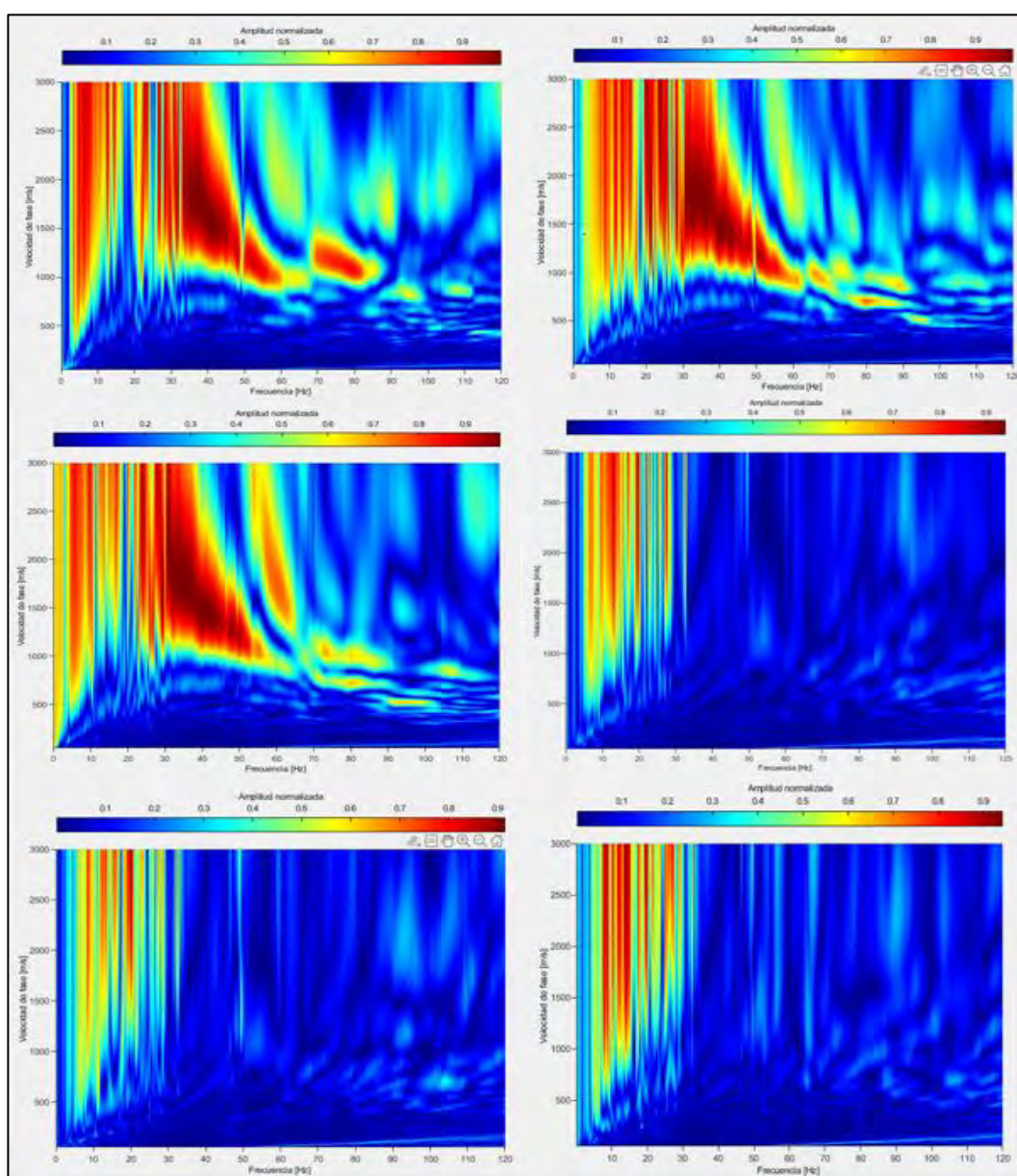


Figura 5-31 Imágenes de dispersión de la onda Rayleigh de algunos registros analizados para Cadarache
Fuente: Elaboración propia

5.1.7.2. Comparación en curvas de dispersión y perfil de velocidad: Grenoble

En la Figura 5-32 se presenta a la izquierda la curva de dispersión experimental obtenida por los más de 14 de grupos formados de especialistas en el *Interpacific project*; no obstante, los puntos ploteados en el gráfico pertenecen a los resultados de la data analiza por estos grupos.

Para este sitio, el análisis de datos activos y pasivos permite una banda de frecuencias más amplios que si se analizara por separado de aquellos analistas que solo cogieron los datos pasivos, enfocándose más en las bajas frecuencias y descuidando las altas. Se sabe que, de los 14 grupos, 5 de ellos analizaron solo data pasiva, y el resto analizaron data pasiva y activa; siendo este último, una mejor alternativa de análisis para una mayor banda de frecuencias.

La capacidad de recuperar altas frecuencias/datos de dispersión de longitud de onda corta es importante para resolver problemas estratigráficos cercanos a la superficie que pueden ser relevantes para la ingeniería geotécnica.

Además, en la tesis, como se menciona antes, solo se ha analizado la data activa, y la curva extraída de la imagen con mejor resolución obtenida de los registros da como resultado la presentada en la Figura 5-32 a la derecha. Por consiguiente, se puede notar que respecto a la curva obtenida para la banda de frecuencias de entre 25 Hz a 35 Hz (parte izquierda de la Figura 5-32), la tendencia es similar, tal como se indica en la sección roja resaltada, lo cual nos indica que la curva de dispersión experimental extraída, para tal banda de frecuencias, es aceptable.

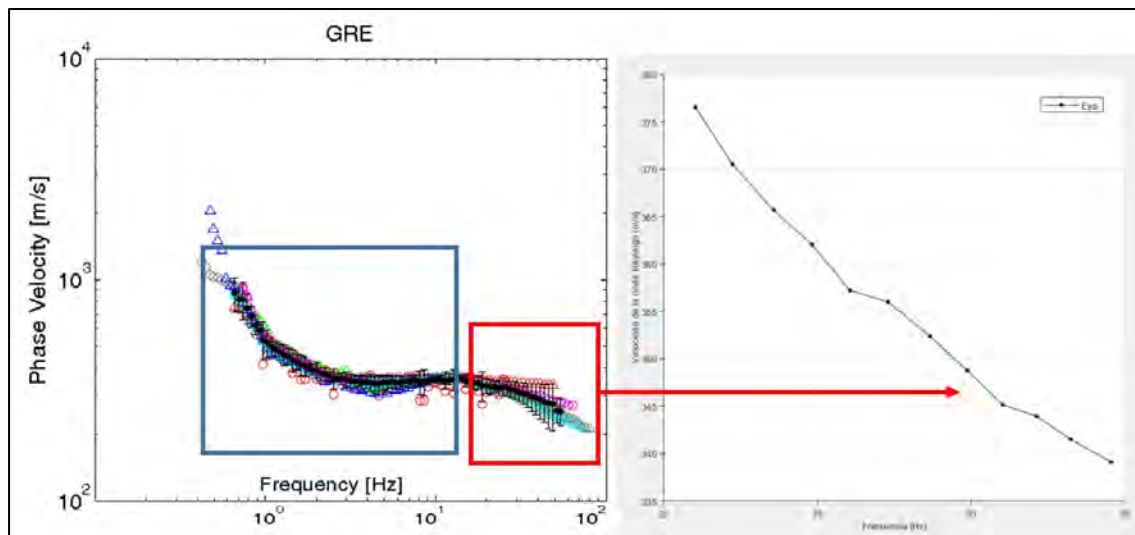


Figura 5-32 Comparación entre curvas de dispersión experimental del InterPACIFIC project y la tesis para Grenoble
Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en la parte derecha de la Figura 5-32 se puede notar que la curva de dispersión generada por parte de la tesis guarda gran relación con la presentada por la de los grupos 3, 4, 5, 7, 8, 11 y 14 del *InterPACIFIC Project*; sin embargo, se debe tener en cuenta que este último estudio tiene un enfoque diferente, ya que para la parte encerrada en azul para frecuencias de 0.5 Hz a 15 Hz se usaron métodos pasivos como el de los *Microtremors*, también conocidos como MAMs, los cuales sirven para mediciones de bajas frecuencias y donde la fuente es producida por el ruido ambiental (fuentes pasivas); este enfoque por tanto no es tomado en cuenta y la curva de dispersión generada es solamente empleando el método *MASW*, el cual considera solo fuentes generadoras activas (Park et al., 1999).

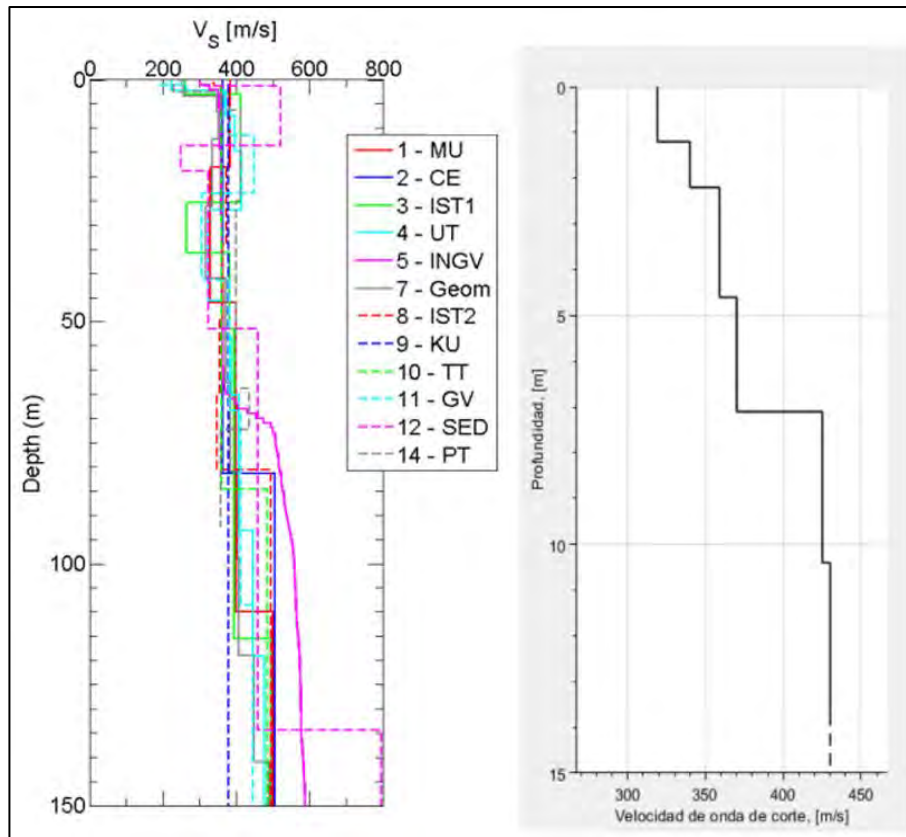


Figura 5-33 Comparación entre perfiles de velocidad de ondas de corte (V_s) del InterPACIFIC y la tesis para Grenoble
Fuente: Elaboración propia

Además, en la Figura 5-33 se presenta a la izquierda los perfiles de velocidad generados por los 14 grupos y a la derecha el perfil de velocidad generado como parte de la tesis. El perfil generado guarda gran relación con la presentada por la de los grupos 3, 4, 5, 7, 8, 11 y 14 del *InterPACIFIC Project*.

Se discute que esta variabilidad entre los perfiles generados, los cuales fueron cuantificados en el estudio mediante el CoV; se indica en el estudio del *InterPACIFIC project* que el CoV obtenido es de menos del 5%. Se señala en el estudio también que los valores de CoV empiezan a incrementarse rápidamente para altas frecuencias, probablemente debido a la variabilidad lateral. Además, en el estudio también se señala existe también variabilidad lateral para zonas cercanas a la superficie, lo cual es consistente debido a la naturaleza de la geología característica de la zona, con depósitos aluviales encima.

Finalmente, en la Figura 5-34 se presenta diversas imágenes de dispersión generadas con los registros empleados para el cálculo de la curva de dispersión utilizada en el sitio de Grenoble para la tesis, se menciona que para obtener la mejor curva de dispersión de ondas Rayleigh se evaluó cada registro presentado, para con ello determinar una curva, de las

tantas generadas, bajo el criterio de trabajar con la que aporte la imagen con una mejor resolución; sin embargo, se utilizaron todas para la elección de la curva a extraer.

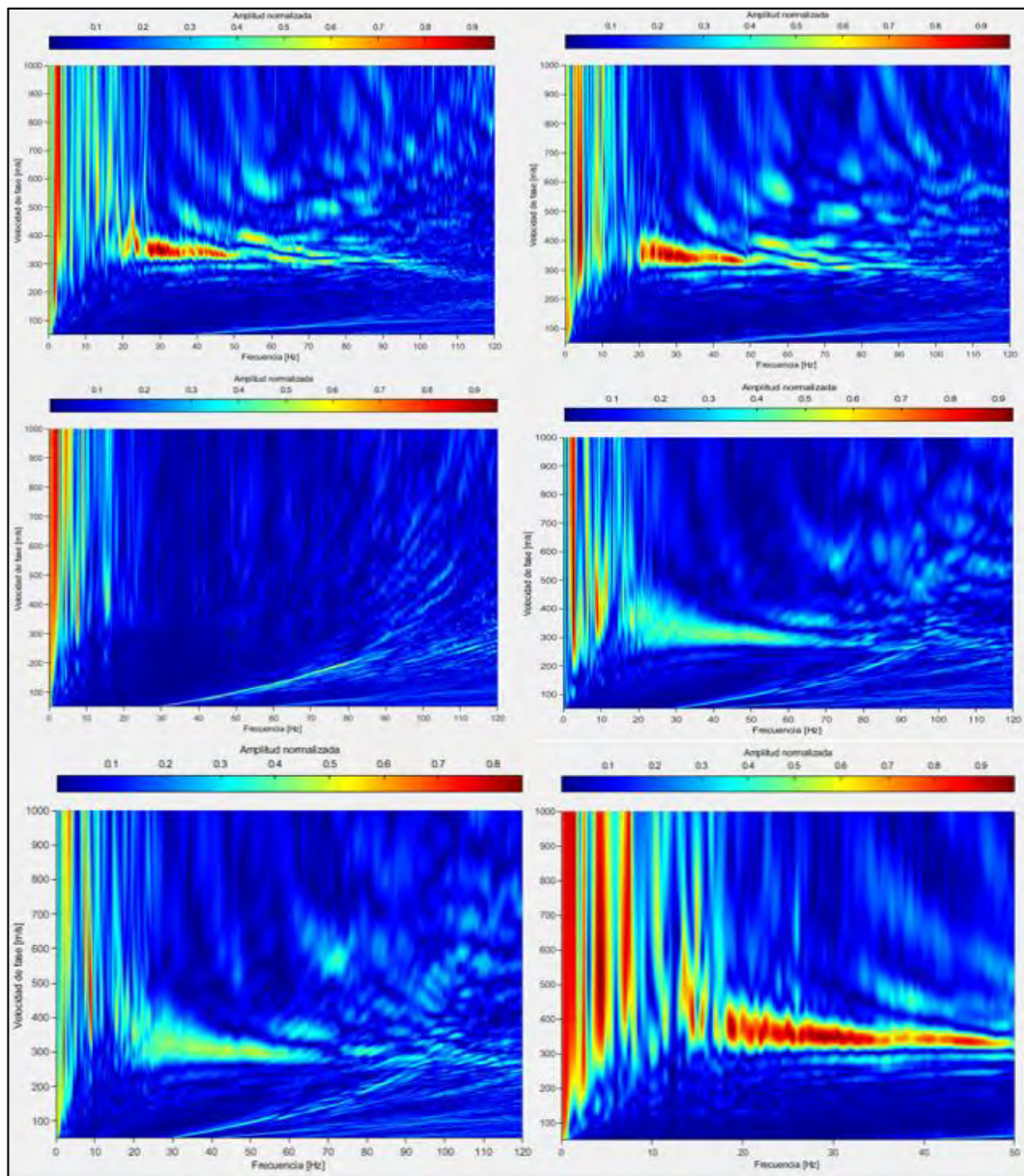


Figura 5-34 Imágenes de dispersión de la onda Rayleigh de algunos registros analizados para Grenoble
Fuente: Elaboración propia

5.1.7.3. Comparación en curvas de dispersión y perfil de velocidad: Mirandola

En la Figura 5-35 se presenta a la izquierda la curva de dispersión experimental obtenida por los más de 14 de grupos formados de especialistas en el *Interpacific project*; no obstante, los puntos ploteados en el gráfico pertenecen a los resultados de la data analiza por estos grupos.

Como parte del *InterPACIFIC project* se sabe que todos los equipos analizaron el modo fundamental de las ondas Rayleigh, algunos equipos también analizaron los modos altos o efectivos, mientras otros incluyeron el análisis de ondas Love. Otra alternativa usada fue la combinación de la base de datos sísmica (activas y pasivas).

La banda de frecuencias es más amplia para aquellos que combinaron los datos pasivos y activos, mientras que es ligeramente limitada para aquellos que se basaron exclusivamente en activos o pasivos. La banda de frecuencias obtenida con datos pasivos es centrada en valores bajos.

Además, en la tesis, como se menciona antes, solo se ha analizado la data activa, y la curva extraída de la imagen con mejor resolución obtenida de los registros da como resultado la presentada en la Figura 5-35 a la derecha. Por consiguiente, se puede notar que respecto a la curva obtenida para la banda de frecuencias de entre 10 Hz a 22 Hz (parte izquierda de la Figura 5-35), la tendencia es casi exponencial como se indica en la sección roja resaltada, lo cual nos indica que la curva de dispersión experimental extraída, para tal banda de frecuencias, es aceptable.

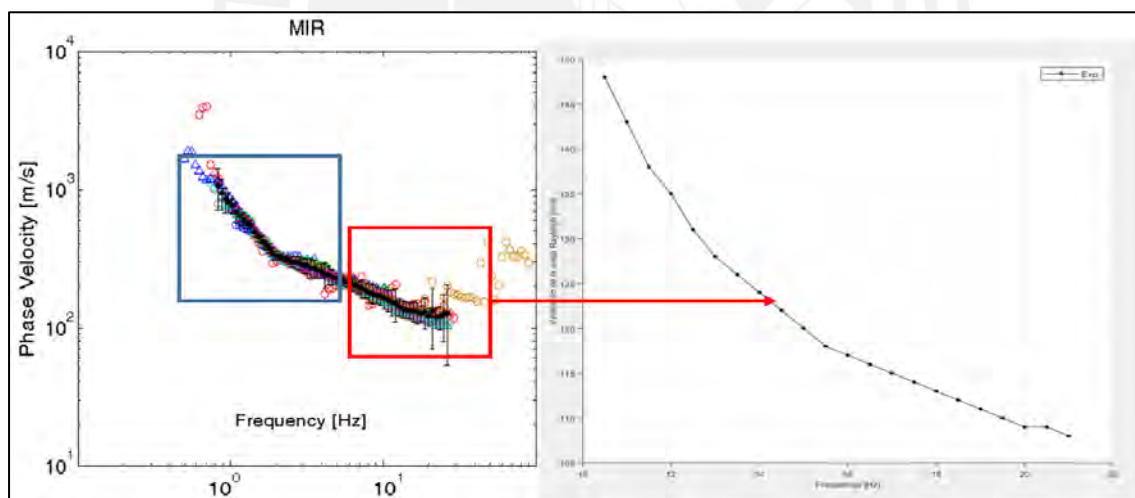


Figura 5-35 Comparación entre curvas de dispersión experimental del *InterPACIFIC project* y la tesis para Mirandola
Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en la parte derecha de la Figura 5-35 se puede notar que la curva de dispersión generada por parte de la tesis guarda gran relación con la presentada por la de los grupos 4, 5, 6, 7, 11 y 14 del *InterPACIFIC Project* grupos que utilizaron fuentes activas como parte de sus análisis; sin embargo, se debe tener en cuenta que este último estudio tiene un enfoque diferente, ya que para la parte encerrada en azul para frecuencias menores a 5 Hz

se usaron métodos pasivos como el de los *Microtremors*, también conocidos como MAMs, los cuales sirven para mediciones de bajas frecuencias y donde la fuente es producida por el ruido ambiental (fuentes pasivas); por tanto, este enfoque no es tomado en cuenta y la curva de dispersión generada es solamente empleando el método *MASW*, el cual considera solo fuentes generadoras activas (Park et al., 1999).

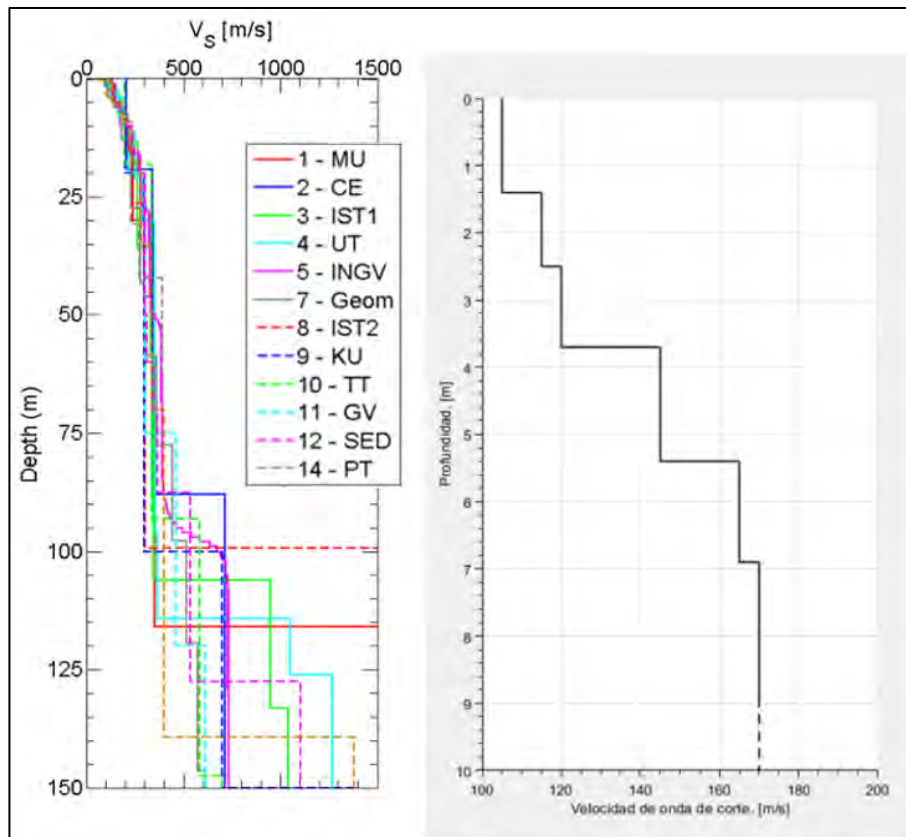


Figura 5-36 Comparación entre perfiles de velocidad de ondas de corte (V_s) del InterPACIFIC y la tesis para Mirandola
Fuente: Elaboración propia

Además, en la Figura 5-36 se presenta a la izquierda los perfiles de velocidad generados por los 14 grupos y a la derecha el perfil de velocidad generado como parte de la tesis. El perfil generado guarda gran relación con la presentada por la de los grupos 4, 5, 6, 7, 11 y 14 del *InterPACIFIC Project*.

Por parte del *InterPACIFIC project*, la mayoría de análisis obtuvieron dispersiones de ondas Rayleigh que están dentro de una banda de frecuencias de entre 1-20 Hz. La dispersión estimada dentro de este ancho de banda es caracterizada generalmente por presentar un CoV de entre 5% a 10%, el cual empezó a aumentar rápidamente para altas y

bajas frecuencias. Para las bandas de altas frecuencias esta observación es probablemente asociada a la variabilidad lateral en partes muy superficiales del depósito, ya sea en la banda de bajas frecuencias los estimados están enfocando el límite de frecuencia resoluble teniendo en cuenta el arreglo geométrico y la calidad de los datos.

En adición, en la Figura 5-37 se presenta diversas imágenes de dispersión generadas con los registros empleados para el cálculo de la curva de dispersión utilizada en el sitio de Mirandola para la tesis. Se menciona que para obtener la mejor curva de dispersión de ondas Rayleigh se evaluó cada registro presentado, para con ello determinar una curva, de las tantas generadas, bajo el criterio de trabajar con la que aporte la imagen con una mejor resolución; sin embargo, se utilizaron todas para la elección de la curva a extraer.

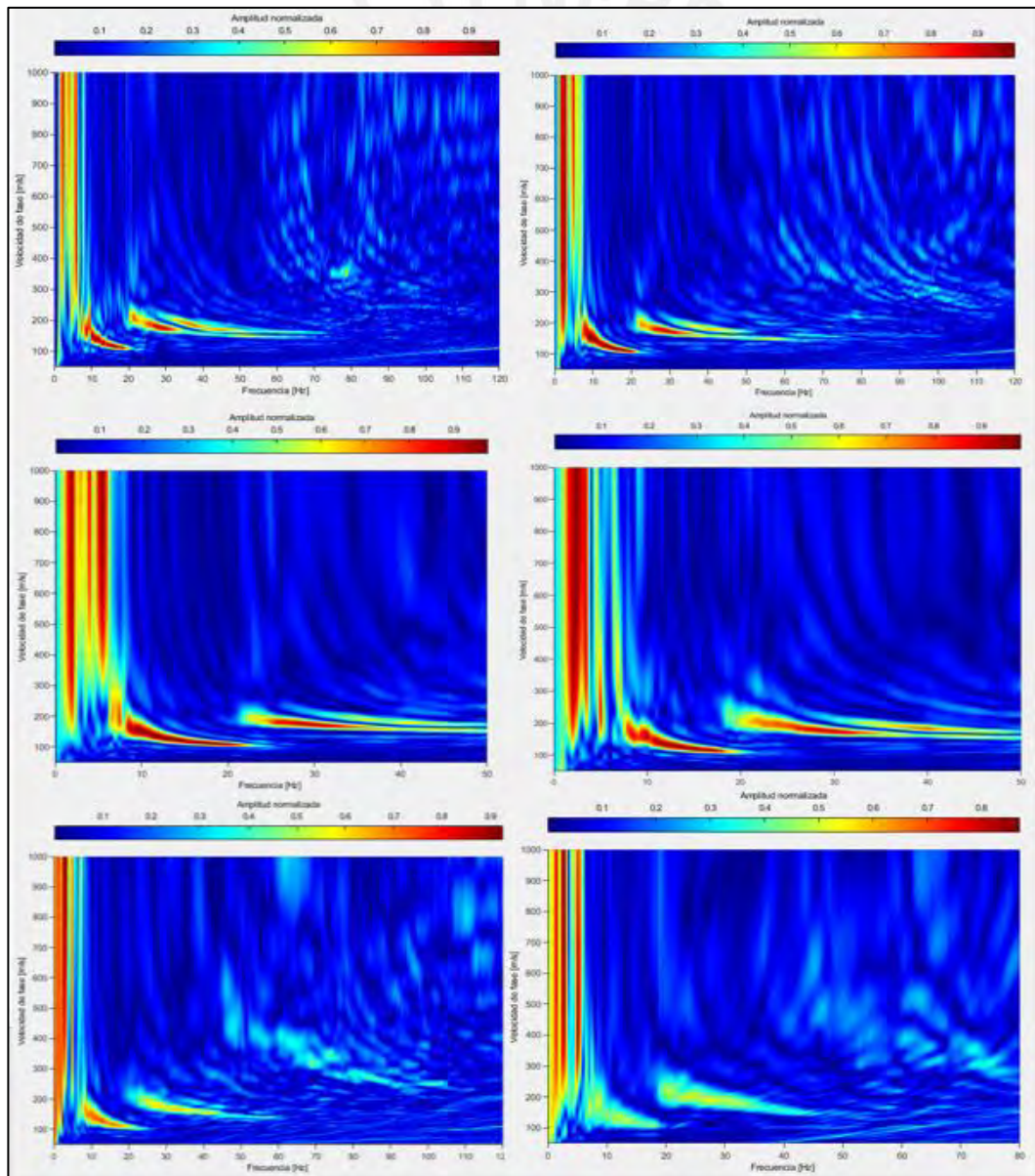


Figura 5-37 Imágenes de dispersión de la onda Rayleigh de algunos registros analizados para Mirandola
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan las Figuras 5-38, 5-39 y 5-40, las cuales muestran las bandas de frecuencias asociadas al tipo de data analizada para los 14 equipos que formaron parte del *InterPACIFIC project*.

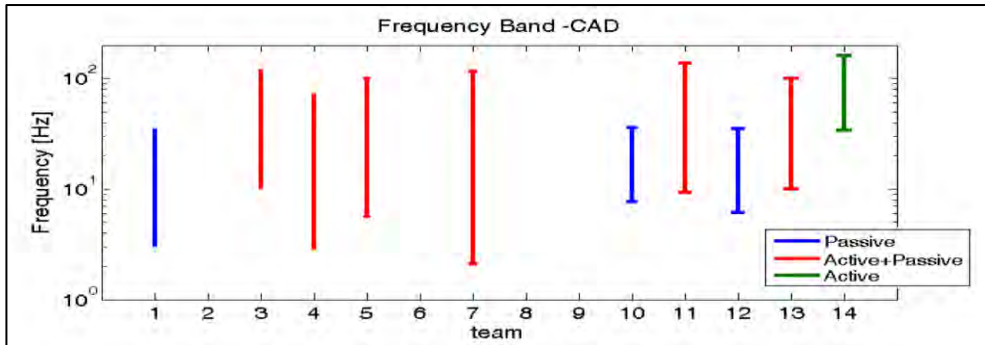


Figura 5-38 Banda de frecuencias asociadas al tipo de data empleada por los grupos de trabajo del *InterPACIFIC project* para Cadarache
Fuente: *Interpacific*, 2016, p.235

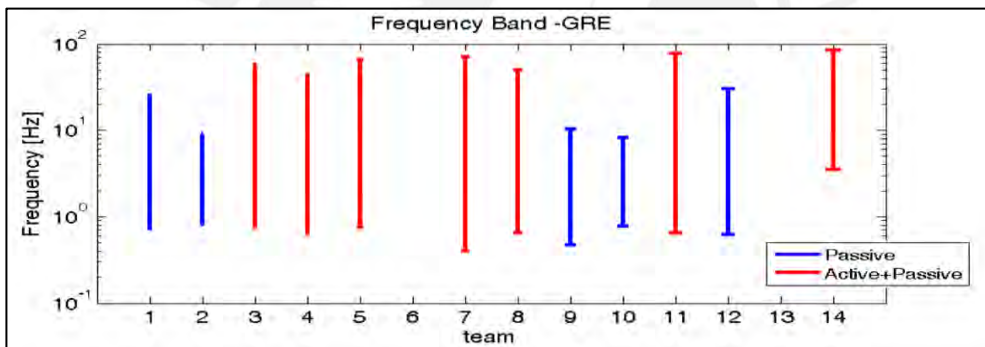


Figura 5-39 Banda de frecuencias asociadas al tipo de data empleada por los grupos de trabajo del *InterPACIFIC project* para Grenoble
Fuente: *Interpacific*, 2016, p.232

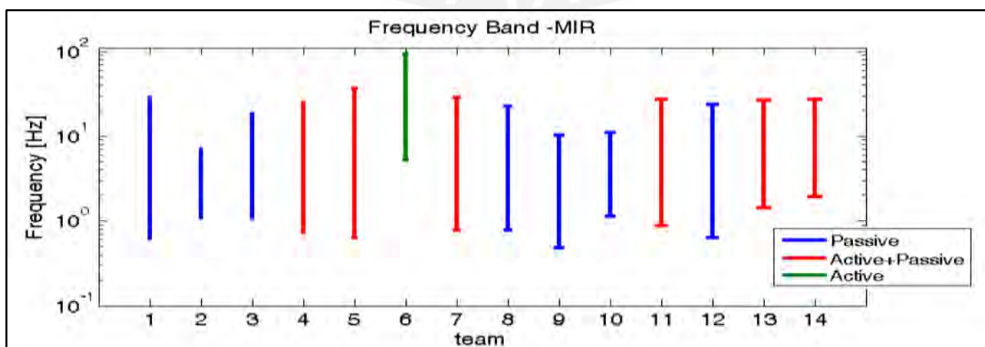


Figura 5-40 Banda de frecuencias asociadas al tipo de data empleada por los grupos de trabajo del *InterPACIFIC project* para Mirandola
Fuente: *Interpacific*, 2016, p.228

Como se explicó antes, la intención de ampliar el ancho de banda de las frecuencias es de gran utilidad, pero ello solo se consigue si se analizan datos del tipo activa y pasiva; puede notarse en las tres figuras anteriores que el ancho de banda para cuando se combinan las datos (activas y pasivas) es más grande que si se analizaran activas o pasivas por separado.

Otro aspecto importante que se observa en las gráficas es que la data pasiva da mayor información para bajas frecuencias, y que la data activa da mayor información para altas frecuencias. Del mismo modo, con la combinación de ambas (activa y pasiva) se mejora esto. Así mismo, para tratar ambos tipos de información se utilizaron enfoques diferentes, los cuales se resumen en la Tabla 5.16.

Finalmente, en la Tabla 5.16 se presenta los métodos adoptados por los 14 equipos que formaron parte del *InterPACIFIC project*; será importante resaltar que los tres primeros métodos de esta lista son los utilizados para la data de origen de fuente activa, y estos son comparables con el método utilizado para el análisis del método *MASW*, siguiendo la metodología de esquema lineal del *MASW* (Park et al., 1999). Así mismo, se recalca que el método usado para la presente tesis fue el del *phase-shift method*.

Tabla 5.16 Métodos adoptados para el procesamiento de la data de ondas superficiales

Método	Tipo de data
Transformada de frecuencia – número de onda	Activa
Método de transformación de baja frecuencia	Activa
Transformada del cambio de fase	Activa
Formador en el dominio de la frecuencia	Pasiva
Transformada de frecuencia – número de onda de alta resolución	Pasiva
Método del coeficiente de autocorrelación espacial (SPAC)	Pasiva
Método SPAC modificado	Pasiva
Tres componentes: análisis de f-k de alta resolución y descomposición del campo de ondas	Pasiva
Espectro del SPAC calculado desde el suavizado del espectro de coherencia – frecuencia	Pasiva
Coefficientes de expansión de Fourier – Bessel	Pasiva
Elipticidad de ondas Rayleigh desde registros de ruido	Pasiva

Fuente: *Interpacific*, 2016, p.225

Es de interés notar que estos tres primeros métodos son basados en transformaciones en donde las series de tiempo son transformadas desde el dominio de espacio temporal a diferentes dominios, como se explicó previamente en el sub capítulo 4.2.

5.2. Resultados y discusión – relación *MASW/CPT*

Como se mencionó en la introducción de la tesis, para los sitios de estudio presentados en esta tesis, no se cuenta con la data disponible de ensayos *CPT*; sin embargo, en el presente sub capítulo, se pretende dejar una comparación interesante en un trabajo presentado por E. Olafsdottir, S. Erlingsson y B. Bessason en la 16th conferencia europea de ingeniería sísmica en el 2018. Ello con la intención de mostrar la importancia de complementar ensayos no invasivos con ensayos invasivos, si es que el proyecto merece el tiempo y la inversión.

En dicha conferencia se presentó el trabajo de estos autores, relacionando al ensayo *MASW* y su comparación con otros métodos de investigación geotécnica como el método *SASW* y el ensayo *CPT* para el puerto de Landey; por tanto, solo serán presentados datos relevantes como las características del sitio, las condiciones del ensayo *MASW* y los resultados de las correlaciones de los ensayos *CPT*. A continuación, se presenta la Tabla 5.17 se presenta el resumen de las características del sitio de estudio en el puerto de Landey; así como, las condiciones del ensayo *MASW* que se ejecutó.

Tabla 5.17 Resumen de las características del sitio y del ensayo MASW en el puerto de Landey

Características del sitio	Puerto de Landey
Tipo de suelo	Arena litoral moderna
Clasificación SUCS	SW
Tabla de agua	A 4 m de profundidad
Modulo de Poisson	0.35
Densidad (kg/m ³)	2000
Densidad saturada (kg/m ³)	1850
Mediciones de campo para ensayo <i>MASW</i>	
Espacio entre los geófonos (m)	0.5 (3.0/5.0/10.0)
Distancia de golpeo a la fuente	2.0 (5.0/10.0/15.0/20.0)
N° de medidas	6
Frecuencia de muestre (Hz)	1000
Tiempo de registro (s)	1.2

Fuente: 16th European conference on E. Engineering, 2018.

Además, se presenta también en la Figura 5-41 los resultados de los ensayos *CPTs* que se realizaron en el área del puerto de Landey.

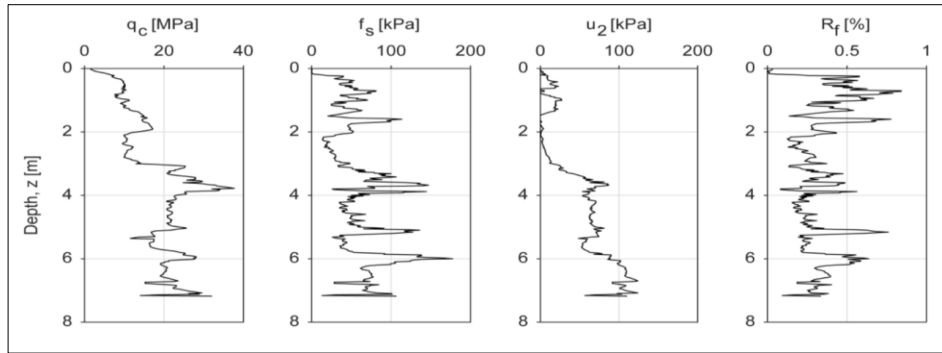


Figura 5-41 Resultados de las medidas de ensayos CPT en el área del puerto de Landey
Fuente: 16th European conference on E. Engineering, 2018.

Como se presentó previamente en el sub capítulo 4.2, han sido desarrolladas correlaciones basadas en los parámetros de resultados del ensayo CPT por diversos autores; con ellos es posible obtener velocidades de onda de corte a diferente profundidad, y es en donde se enfoca uno de los objetivos de la tesis: la comparación con el resultado del perfil de velocidad de onda de corte obtenido por el método MASW.

Se muestra en la Figura 5-42 un ejemplo de los perfiles de velocidad obtenido por la metodología del MASW (línea negra) y los perfiles de velocidad obtenidos por correlaciones del ensayo CPT (líneas de colores) para el área de Landey, en base a los resultados de los ensayos CPT mostrados en la Figura 5-41.

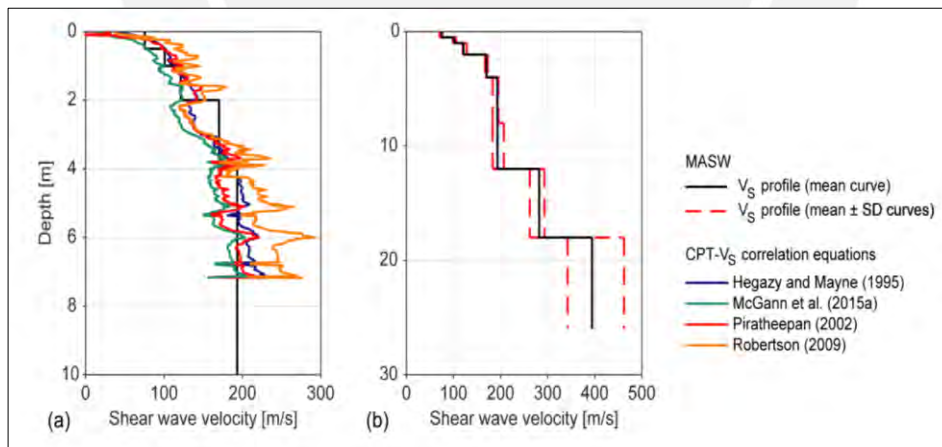


Figura 5-42 Perfiles de V_S obtenidos para el área de Landey basados en correlaciones CPT en contraste con la obtenida por el método MASW

Fuente: 16th European conference on E. Engineering, 2018.

Además, se presenta el concepto de $V_{S,bias}$, o *velocity bias* usado para indicar la diferencia que existe entre los valores estimados y medidos de la V_S , obtenido mediante correlaciones de ensayos CPT y mediciones de ensayos MASW, respectivamente. Definido entonces, como el cociente entre la V_S obtenida por correlaciones de CPT entre la V_S obtenida por

medio del método *MASW* (McGann et al., 2015), tal como se representa en la Ecuación 5.2.

$$V_{S,bias} = \frac{V_S(CPT)}{V_S(MASW)} \quad (Ec. 5.2)$$

De la Figura 5-43 se puede observar los perfiles de $V_{S,bias}$ obtenidos en el trabajo presentado para el sitio de Landey.

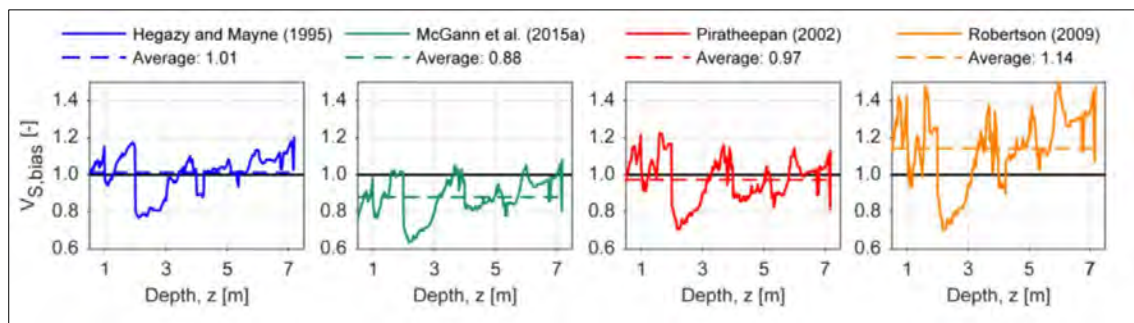


Figura 5-43 Perfiles de $V_{S,bias}$ obtenidos para diferentes correlaciones del ensayo *CPT*
Fuente: 16th European conference on E. Engineering, 2018.

Por un lado, es de interés notar que para la metodología de Hegazy & Mayne (1995) y Piratheepan (2002) el valor de $V_{S,bias}$ es muy cercano a 1, lo que indica que los resultados obtenidos por estas correlaciones de *CPT* están muy cercanos a los obtenidos para los ensayos *MASW*. Por otro lado, se nota que para la metodología propuesta por Robertson (2009) tiende a incrementar los valores de V_S obtenidos por correlaciones *CPT* sobre los valores obtenidos por *MASW*; no obstante, para la metodología propuesta por las correlaciones de McGann et al. (2015) se puede observar que el valor de $V_{S,bias}$ es inferior a 1 y ello indica que los valores estimados por *CPT* son menores a los obtenidos por *MASW*.

6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es de interés el estudio del *Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)* como métodos de exploración sísmica para estimar las velocidades de ondas de corte, especialmente cuando no se cuenta con información a priori del terreno de estudio, más que la geología, o alguna visita del terreno para un reconocimiento geológico. No obstante, previo al *MASW*, el cual fue introducido a finales de 1990, existió primero el método del *Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)*. En la actualidad el ensayo *MASW* es más aceptado debido a sus ventajas sobre su predecesor (*SASW*) (Park et al., 1999). Ello debido a que la adquisición de datos del *MASW* es más eficiente, rápida e involucra menos procedimientos de procesamiento de datos; además de que se pueden observar características dispersivas de múltiples modos de los registros de ondas superficiales; por tanto, se vuelve más fácil y confiable generar imágenes de dispersión en 2 o 3 dimensiones.

En el capítulo 5 se discuten los resultados para los 3 sitios de estudio: Cadarache, Grenoble y Mirandola; dicha discusión de resultados es desarrollada con el método del *MASW*. Este método toma en cuenta para el análisis de dispersión el enfoque del *phase-shift method* y para el proceso de inversión, el cual involucra calcular primero la curva de dispersión teórica, se adopta el enfoque del *stiffness matrix method*.

En primer lugar, para el proceso de dispersión, se desarrolla un análisis de las ventajas y desventajas de los métodos disponibles, y más aceptados a la fecha. Se optó por el *phase-shift method*, sobre otros métodos como el del enfoque de barrido de frecuencia (*swept-frequency approach*), el cual también es un método para extraer la curva de dispersión experimental, porque este último método involucra tener de entrada registros de baja frecuencia y registros de alta frecuencia, entonces el trabajo de separar las frecuencias involucra encontrar máximos locales de trazas (regiones), los cuales corresponden a frecuencias altas y bajas que son excluidas debido a la atenuación/anormalidades que pueden ocurrir por efectos de campo lejano o próximo; así mismo, esta exclusión de valores se debe configurar de forma manual. Por esta razón, es que se prefiere usar el enfoque del *phase-shift method*, el cual ya ha sido explicado y desarrollado con los ejemplos estudiados como parte de este documento; por otro lado, también se usa, porque se trabaja bajo la asunción de que el modo fundamental es el dominante del registro, lo cual es comprobado al generar las imágenes de dispersión.

En segundo lugar, para la determinación de la curva de dispersión teórica, el cual es un paso necesario para un adecuado proceso de inversión, se empleó el *stiffness matrix method*, ya que está ampliamente aceptado por investigadores y profesionales en el campo del análisis geofísico; se adopta este enfoque, ya que es un enfoque mejorado que desde las primeras formulaciones realizadas por Thompson (1950) y Haskell (1953) ha mejorado y ha sido renovado por Kausel & Roësset (1981) con el *stiffness matrix method*, prefiriendo este enfoque sobre los otros, por su amplia aceptación y porque en su proceso de cálculo involucra técnicas análogas a las usadas en los métodos de elementos finitos, los cuales están en constante estudio y mejora continua por las empresas especializadas creadoras de softwares.

Para los sitios estudiados, lo que se pretende con el método *MASW* es obtener perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) en función de la profundidad, para ello se estudiaron los sitios de Cadarache, Grenoble y Mirandola; y se concluye a continuación:

En el caso de Cadarache, la única información a priori que se conoce es la de la geología superficial, y se sabe de la existencia de afloramientos rocosos de roca caliza (Interpacific project, 2016). Para el caso de Grenoble, la única información a priori que se conoce es la de la geología superficial, en la que se trata de un suelo rígido de amplia profundidad y que en los primeros 10 m se encuentran depósitos aluviales (Interpacific project, 2016). Del mismo modo, para el caso de Mirandola, la única información a priori que se conoce es la de la geología superficial, y se sabe que son depósitos aluviales, y que tenemos un suelo denso sobre roca blanda, con unos 100 m de suelo (Interpacific project, 2016).

El error (*misfit*) presentado en la Tabla 6.1 es aceptable (debajo del 5 %), este es obtenido por iteraciones de la cantidad de capas (4 y 6 capas). Se concluye que para refinar el error y mejorar el modelo, el usar un número de capas mayor disminuye el error; ello debido a que los saltos de velocidad del modelo para la curva teórica no se dan con un mejor empalme, ya que la transición de una capa a otra es más corta; se escoge el modelo de 6 capas para los tres sitios.

Tabla 6.1 Error obtenido (*misfit*) según el número de capas para Cadarache, Grenoble y Mirandola

Nº capas en el modelo	Cadarache	Grenoble	Mirandola
6	1.2 %	0.6 %	1.2 %
4	4.9 %	0.9 %	1.8 %

Fuente: elaboración propia

Además, en base al error obtenido, se concluye que los modelos adoptados para las velocidades de ondas de compresión (V_P) y de ondas de corte para las capas intermedias (β) han sido correctamente asumidas para el modelo de tierra plana de cada sitio de estudio (Ver Tablas 5.4, 5.5 y 5.6). Ello de acuerdo a las velocidades establecidas por el NEHRP (2003) para la velocidad de onda de corte para los 30 primeros metros de profundidad ($V_{S,30}$) y las velocidades de ondas de compresión establecidas por la ASTM D 5777 – 00.

En adición, se recomienda que será preferible conocer las condiciones del nivel del agua en el terreno, para tener una idea de la saturación; ello debido a que la velocidad de las ondas de compresión se propaga a través del agua subterránea con velocidades cercanas a 1500 m/s, dependiendo ligeramente de la temperatura y salinidad (Kramer, 1996). La rigidez de suelos blandos puede ser sobreestimada significativamente si la presencia del nivel freático es ignorada (Kramer, 1996).

Por otro lado, para los sitios estudiados en los que se empleó un modelo de tierra en capas planas, para las imágenes de dispersión (2D y 3D) obtenidas se verifica que la influencia de en la variación de la velocidad de corte de cada capa del modelo (β) recién es clara para frecuencias mayores a 5 Hz (Xia et al., 1999); especialmente porque para frecuencias mayores a esa se identifican los modos fundamentales; para el caso de Cadarache el modo fundamental aparece después de los 30 Hz, para el caso de Grenoble luego de 18 Hz y para Mirandola después de 8 Hz.

Como se explicó antes la interpretación de los ensayos *MASW* realizados por parte del *InterPacific project*, con ayuda de las Tablas 6.2 y 6.3; así como, las experiencias anteriores con suelos y rocas similares a los de los casos de estudio (Cadarache, Grenoble y Mirandola), sirvieron para el objetivo principal del trabajo de tesis, el cual es obtener un adecuado perfil de velocidades en función de la profundidad por la aplicación del *MASW* a los registros disponibles.

Se recomienda además que, junto a las conclusiones presentadas en la tesis, se debe prestar atención a los efectos de la longitud de extensión de los geófonos y a la distancia de golpeo del martillo (fuente sísmica); éstas han sido, indirectamente tomadas en cuenta, ya que por eso se analizaron todos los registros, dado que no todos los golpes fueron dados a la misma distancia del primer geófono; se simplificó en obtener la mejor imagen de dispersión para cada sitio estudiado, iterando la cantidad de capas en el modelo de tierra plano, el espesor

de las mismas (h); así como, la velocidad de ondas de corte para las capas intermedias (β), velocidad de ondas de compresión (V_P), densidad (ρ).

Además, en el sub capítulo 5.7, como parte de la discusión entre los resultados obtenidos de parte del *InterPACIFIC project* y los obtenidos por parte de la presente tesis, se concluye que se debe tener un entendimiento en el tipo de información que se analizará, separándola de activa y pasiva; la primera será la que es generada por una fuente generadora activa, ya sea el golpeo con un martillo o dejar caer un peso sobre el terreno; y la segunda es generada por vibraciones naturales, o llamado también ruido ambiental.

La banda de frecuencias es más amplia para aquellos que combinaron los datos pasivos y activos, mientras que es ligeramente limitada para aquellos que se basaron exclusivamente en activos o pasivos. La banda de frecuencias obtenida con datos pasivos es centrada en valores bajos, y los datos activos se centran en valores altos.

Esta banda de frecuencias es por tanto esencial para obtener una mejor curva de dispersión; sin embargo, el presente trabajo se centró en el análisis de la data activa, ya que esta es la que nos sirve para empezar en el campo de la geofísica, especialmente si los usuarios son no expertos en la materia. Con ello, se pretende dar un aporte a un mejor entendimiento de los métodos geofísicos mediante el desarrollo de ensayos *MASW* aplicados a los tres sitios de estudio, los cuales, para el presente estudio, consideran solo data activa en su campo de análisis.

Se entiende entonces que las técnicas *Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)* y *Microtremors Arrays Measurements (MAMs)* se han venido utilizando con mayor frecuencia en los últimos años al ser métodos de investigación no invasivos del terreno, los cuales son muy útiles en la exploración geotécnica para diversos proyectos civiles: cimentación de puentes, presas de tierra, presas de relaves, pads de lixiviación y estructuras con cimentación profunda; así mismo, la combinación de estos métodos permite obtener perfiles de ondas de corte (V_S) con profundidades de hasta 100 m.

Se explicó antes que los *MASW* dan lecturas confiables para los primeros 30 m de investigación; ello también se evidencia, ya que, para la tesis, solo se obtuvieron profundidades investigadas presentadas para los 30 primeros metros estudiados, y en el proyecto de la *InterPACIFIC* se obtuvieron profundidades mucho mayores; ello porque se usaron datas activas y pasivas, de una manera combinada. Además, para un mejor entendimiento del trabajo realizado en la tesis, en el Anexo B se presenta un resumen

general de forma gráfica que muestra la secuencia del método *MASW*: (i) mediciones de campo, (ii) análisis de dispersión, y (iii) análisis de inversión. Todo ello para los sitios de Cadarache, Grenoble y Mirandola.

Finalmente, se concluye además, que en el caso de contar con ensayos *CPT*, estos pueden ayudar a estimar el $V_{S,bias}$, lo cual permite ajustar ligeramente el perfil de velocidad obtenido por el método *MASW* desarrollado como uno de los objetivos en la presente tesis; se valora la ejecución de ensayos in situ para poder caracterizar mejor el terreno. Sin embargo, de ser posible es recomendable ejecutar mejor un ensayo *SCPT* (*Seismic Cone Penetration Testing*) o ensayo de cono sísmico, que adiciona un geófono al cono para la medición de ondas V_S y V_p .

Además, se debe prestar atención a las metodologías empíricas desarrolladas que forman parte de la base teórica desarrollada para el ensayo *CPT* del presente trabajo, prestando especial atención a que la mayoría de métodos desarrollados están desarrollados para arenas, arenas con finos y suelos arcillosos; por tanto, se toma importancia así a complementar los ensayos no invasivos (como el *MASW*) con ensayos invasivos (como el *CPT*), ya que uno de los objetivos principales del ensayo *CPT* es poder caracterizar el perfil estratigráfico de los suelos; se valora la importancia en los avances del Prof. Robertson desde 1986 en donde se inician los primeros trabajos hasta la actualidad en la que se siguen innovando y actualizando mejores modelos para representación del *CPT* y *CPTu*. Del mismo modo, se concluye que el ensayo *CPT* presenta una serie de ventajas debido a su aplicabilidad en arenas, arenas con finos y suelos arcillosos, lo cual revaloriza su aplicación en proyectos de construcción y en realidad en cualquier proyecto ingenieril, ya que a nivel mundial se sigue estudiando y se capacitan a los profesionales y empresas que ofrecen este servicio, obteniendo así un costo/beneficio que debe ser tomado en cuenta; así como, la complementación con método no invasivos como los geofísicos como parte de un estudio geotécnico.

7. CAPÍTULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D 5777 – 00 (2000). Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. California: *ASTM International*, 5.
- Benito, M (2021). Ondas Sísmicas [Diapositiva de PowerPoint]. *Repositorio del curso de Acción Sísmica*.
- BSSC (2003) NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New buildings and other Structures, Part 1: Provisions, *FEMA 368, Federal Emergency Management Agency*, Washington, D.C.
- Buchen, P.W., & Ben-Hador, R. (1996). Free-mode surface wave computations. *Geophysical Journal International*, 875-877.
- CEN (2004). EN 1998-1:2004. Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings, *European Committee for Standardization*.
- Cox, B. R., & Teague, D.P. (2016). Layering ratios: a systematic approach to the inversion of surface wave data in the absence of a priori information. *Geophysical Journal International*. 422-437.
- De Matos, M. (2006). Mecânica dos Solos. *Vol. 1: Conceitos e Princípios Fundamentais-2a Edição*. FEUP Edições.
- Dikmen, Ü., Arisoy, M., & Akkaya I. (2009). Offset and linear spread geometry in the MASW method. *Geophysical Journal International*. 211-222.
- Eurocode 7 (1997). Geotechnical design. Part 2: Ground investigation and testing.
- Foti, S., Hollender, F., Garofalo, F., Albarello, D., Asten, M...Socco., V. (2016). Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product for the InterPACIFIC project. *Springer: Bull Earthquake Eng.*
- Frayle, A (2021). Aplicaciones. Prospección geofísica. Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) [Diapositiva de PowerPoint]. *Repositorio del curso de Auscultación Dinámica In-Situ*.
- Gao, L., Xia, J., Pan, Y., and Xu, Y. (2016). Reasons and Condition for Mode Kissing in MASW Method. *Pure and Applied Geophysics*.

- Garofalo, F., Foti, S., Hollender, F., Bard, P., Cornou, C., Cox, B. ... Yamanaka, H. (2016). InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. *Part I: Intra-comparison of surface wave methods. InterPACIFIC*. <http://interpacific.geopsy.org/>
- Haskell, N.A (1953). The dispersion of surface waves in multilayered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Hegazy Y., Mayne P (1995). Statistical correlation between Vs and cone penetration data for different soil types. *Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing*, 4-5, Sweden, Vol. 2, 173-178.
- Ivanov, J., Miller, R., & Tsoflias, G. (2008). Some practical aspects of MASW analysis and processing. *ResearchGate*. 1186-1196.
- Kausel, E., and Roësset (1981). Stiffness matrices for layered soils. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: *Prentice-Hall Int.* 143-170.
- Mayne, Paul W., (2006). Interpretation of the electric cone penetration test (CPT) and its derivatives. Site characterization by seismic piezocone. Atlanta: *ASCE Geotronics*.
- McGann, C., Bradley, B., Taylor, M., Wotherspoon, L., Cubrinovski, M. (2015). Applicability of existing empirical shear wave velocity correlations to seismic cone penetration test data in Christchurch New Zealand. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 75, 76-86.
- Ólafsdóttir, E.A. (2014). Multichannel Analysis of Surface Waves: Methods for dispersion analysis of surface wave data. University of Iceland, 36-42.
- Ólafsdóttir, E.A., Erlingsson, S., & Bessason, B. (2017). Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils. *NRC Research Press*, 217-230.
- Ólafsdóttir, E.A., Erlingsson, S., & Bessason, B. (2018). Combination of dispersion curves from MASW measurements. *Elsevier: Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 473-487.

- Park, C.B., & Carnevale, M. (2010). Optimum MASW Survey – Revisit after a Decade of Use. *GeoFlorida: Advances in Analysis, Modeling & Design*, 1303-1311.
- Park, C.B., Miller, R.D., & Xia, J. (1997). Multichannel analysis of surface waves (MASW). *ResearchGate: Geophysics*, 1-5.
- Park, C.B., Miller, R.D., & Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. Kansas Geological Survey.
- Park, C.B., Miller, R.D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, Vol 64, N°3. 800-808.
- Piratheepan, P. (2002). Estimating Shear-Whave Velocity from SPT and *CPT* data, MSc. Thesis. Clemson University, Clemson SC.
- Robertson, P. (2016). Cone Penetration Test (CPT) Based Soil Behavior Type Classification System-An Update. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Robertson, P. (2009). Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 46 (11): 1337-1355.
- Ryden, N., Park, C.B., Ulriksen, P and Miller, R.D. (2004). Multimodal approach to seismic pavement testing. *Geotechnical Geoenviron. Eng.*
- Soupios, P., Papazachos, C., Vargemezis, G., & Fikos, I. (2005). Application of seismic methods for geotechnical site characterization. International Workshop in “Geoenvironment and Geotechnics”, 1-6.