

**“ESTUDIO Y DISEÑO DEFINITIVO
DE LA VÍA SAN ANTONIO – SAN
MIGUEL, EN LOS CANTONES
GUAYAQUIL Y PLAYAS, DE LA
PROVINCIA DEL GUAYAS”**

**ESTUDIO DE GEOFÍSICA – MASW-
DEL PUENTE SOBRE EL RIO SAN MIGUEL**



Marco Apunte Ordóñez
Ingeniero Civil - Consultor



Datos Generales del Proyecto:

- | | | | |
|----------------------|--|------------|------------|
| 1. Proyecto: | “Estudio y Diseño Definitivo de la Vía San Antonio – San Miguel, en los Cantones Guayaquil y Playas, de la Provincia del Guayas”, Estudio de Geofísica MASW del Puente Sobre el Rio San Miguel, Ecuador. | | |
| 2. Área de estudio | Sector San Miguel, Provincia del Guayas, Ecuador. | | |
| 3. Fecha: | 22 | Septiembre | 2022 |
| | <i>DD</i> | <i>MM</i> | <i>AÑO</i> |
| 5. Contratante: | Ing. Marco Apunte Ordóñez | | |
| 4. Objetivo General: | Realizar un estudio de exploración geofísica mediante la metodología sísmica en técnica de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW). | | |

A continuación, se presenta el reporte técnico correspondiente al proyecto.



Contenido

Capítulo I. Introducción	3
Descripción General	3
Objetivos Generales	3
Objetivos Específicos	4
Ubicación	4
Trabajos de exploración realizados	6
Ensayos de laboratorio	6
Trabajos de oficina	6
Capítulo II. Metodología de Exploración Geofísica	7
Adquisición y Procesamiento	8
Procesamiento	10
Equipo Utilizado	11
Resultados de la exploración sísmica	12
Resultados de la exploración directa mediante sondeos	17
Capítulo III, Conclusiones y Recomendaciones Puente Existente	18





Capítulo I. Introducción

Descripción General

El conocimiento de las propiedades geotécnicas de los suelos, tales como la rigidez de las capas superiores del suelo, el comportamiento dinámico, es esencial en diversos proyectos de ingeniería civil. Una de las propiedades que actualmente ha tomado una importante relevancia para el diseño sísmico de estructuras, es la velocidad de onda de corte (V_s) u onda secundaria. La normativa actual tanto nacional como internacional clasifica los tipos de suelos de cimentación para el diseño sísmico de estructuras en función de este parámetro, lo cual ha generado un desafío importante para la ingeniería geotécnica, en el desarrollo de equipos de campo como en la formación de profesionales calificados.

Actualmente existen en el mercado una gran variedad de técnicas exploratorias de tipo invasivas y no invasivas, para determinar las características y propiedades geomecánicas de los estratos que conforman el subsuelo somero. Para este proyecto se decidió utilizar una exploración de tipo no invasiva con el método sísmico en técnica de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales conocido como MASW, efectuando diferentes ensayos en cada margen del puente.

La exploración descrita en el presente informe tiene el interés de determinar las velocidades de onda sísmica de corte (V_s) u onda secundaria en el subsuelo para los primeros 30 metros de profundidad en el área de estudio donde se tiene proyectado la construcción de un puente vial de 7 metros de ancho y 40 metros de largo aproximadamente sobre el Río San Miguel.

El informe se ha estructurado en tres capítulos, más los anexos que se detallan a continuación:

- ✓ Capítulo I, está constituido por la introducción, los objetivos y la presentación del estudio.
- ✓ Capítulo II, se presenta un resumen de los conceptos y propiedades físicas, que sustentan al método geofísico de prospección sísmica superficial utilizada en el presente estudio. De igual forma se describe brevemente el levantamiento de campo, la instrumentación utilizada en la adquisición de datos y el procesamiento de los datos, así como los resultados obtenidos mediante la exploración geofísica.
- ✓ En el Capítulo III, presenta las conclusiones y recomendaciones.
- ✓ Anexos.

Objetivos Generales

Obtener un modelo de los materiales que conforman el subsuelo, evaluando y aplicando la técnica de medición de datos a través del método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) variando parámetros de medición y verificando su influencia para obtener datos más confiables, comprobando la calidad de la resolución de los perfiles de velocidad de onda de corte.

Es importante mencionar que toda la metodología está basada y ejecutada acorde a los códigos de la regulación the American Society for Testing and Materials (ASTM), así como la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC).

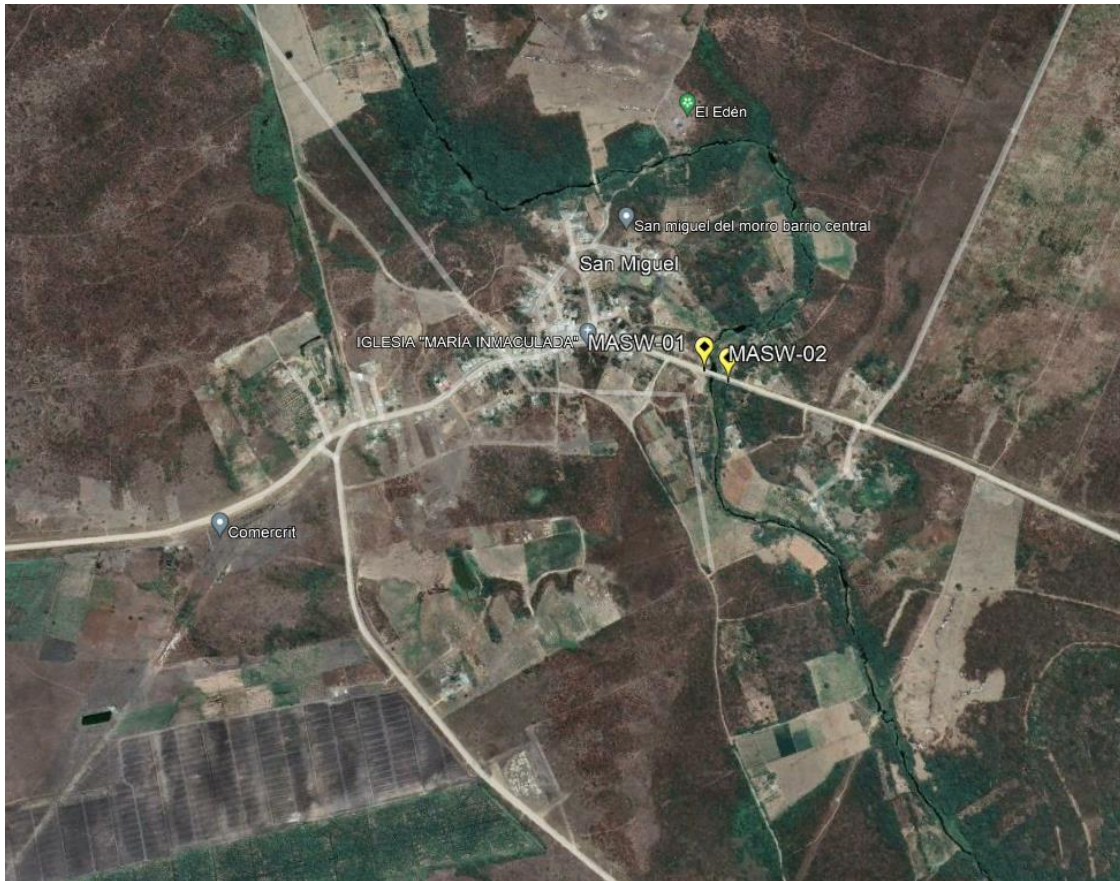


Figura 1.2 Área del proyecto para adquisición de datos geosísmicos

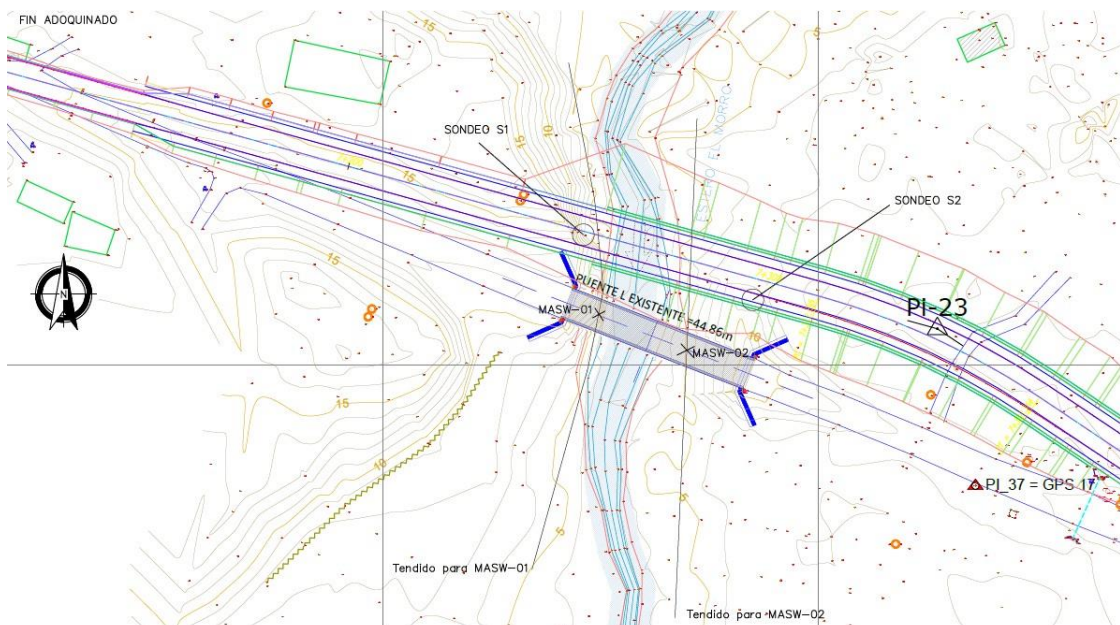


Figura 1.3 Mapa de ubicación de exploración geofísica y sondeos s1 y s2



Trabajos de exploración realizados

Los sondeos a rotación percusión emplearon equipos de perforación convencionales, que permitieron la recuperación continua de muestras. La perforación se realizó conforme a la Norma ASTM D5434-09 (USA) (Standard Guide for Field Logging of Subsurface Explorations of Soil).

La realización de ensayos geotécnicos, trajo consigo la aplicación de diámetros y tuberías idóneas para su ejecución tomando en cuenta las litologías atravesadas y su calidad.

Los diámetros usados en la perforación son los correspondientes a la versión AW. Las muestras recuperadas fueron colocadas en bolsas plásticas y transportadas como lo indica la Normas ASTM D5079 - 08 (USA); ASTM D4220 – 95.

Los log de perforación y la ubicación donde fueron ejecutados se muestran en el **Anexo N°3: Log de Perforación**. Un resumen de los sondeos realizados con sus respectivas coordenadas se muestra a continuación:

Resumen de ubicación de sondeos

Sondeo	Ubicación	Coordenadas	Abscisa Km	Cota (msnm)
S1	Margen Derecha	E: 574546 N:9718230	7+255	6.50
S2	Margen Izquierdo	E:574585 N:9718215	7+288	8.50
MASW-01	Margen Derecha	E:574549 N:9718211	7+263	6.00
MASW-02	Margen Izquierda	E:574570 N:9718204	7+285	5.00

Ensayos de laboratorio

En varias de las muestras alteradas obtenidas se realizaron los respectivos ensayos de clasificación SUCS. Los resultados de los ensayos de laboratorio se muestran en el **Anexo N°5: Ensayos de Laboratorio**.

Trabajos de oficina

Se redacta este informe construyendo los perfiles geosísmicos y perfiles estratigráficos obtenidos mediante la exploración y se procedieron a incorporarlos en los planos de las secciones entregadas.

Con los resultados obtenidos se procede a caracterizar el sustrato de cimentación aplicando la metodología y el marco teórico que se expone más adelante.

Capítulo II. Metodología de Exploración Geofísica

La prospección geofísica ha ganado un importante lugar para resolver diversos problemas asociados a definir las condiciones físicas y mecánicas de las estructuras geológicas del subsuelo. Los métodos geofísicos basan su aplicación en el contraste de las propiedades físicas de los materiales geológicos, entre las que se encuentran, densidad, potenciales naturales, permeabilidad magnética, potenciales REDOX, conductividad térmica, etc., y dependiendo de las condiciones físicas y morfológicas del sitio de estudio, se podrán aplicar diversas técnicas geofísicas para resolver un problema.

A continuación, se explicarán los principios básicos de la metodología utilizada en el proyecto, las actividades campo, gabinete, así como el equipo utilizado para la adquisición de datos.

METODOLOGÍA

La exploración sísmica consiste en estimar propiedades elásticas de la estructura del subsuelo a partir del registro, observación y análisis de ondas sísmicas, las cuales pueden ser producidas por una fuente activa o pasiva. Para esta técnica se hace la lectura de las ondas superficiales.

Las ondas superficiales son ondas que se propagan en la superficie de la Tierra, las cuales tienen una velocidad de propagación menor que las ondas de cuerpo (V_p y V_s). El movimiento producido por las ondas superficiales está restringido a la parte superior de la corteza, a una profundidad de unos 30 km (Sauter, 1989) Existen dos tipos fundamentales de ondas superficiales:

- Ondas Love u ondas L. El movimiento de este tipo de ondas es horizontal y transversal a la dirección de propagación de la onda. Es movimiento de este tipo de ondas es similar al movimiento de las ondas S.

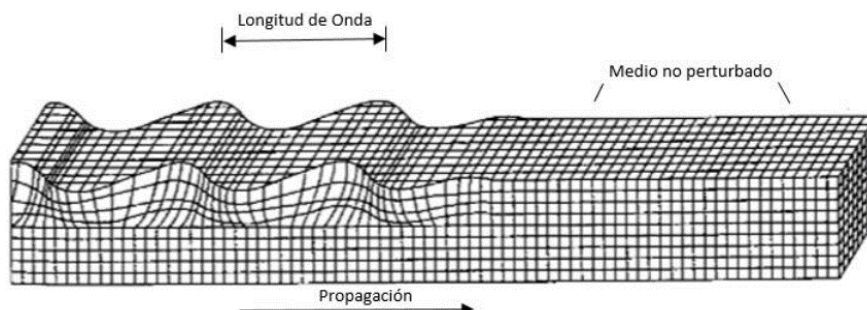


Figura 2.1, Deformación producida por la onda love

- Ondas Rayleigh u ondas R. Las ondas Rayleigh son ondas superficiales que viajan a lo largo de una superficie “libre”, tal como las interfaces Tierra-aire o tierra-agua, su movimiento es similar al de las ondas en la superficie del agua, haciendo vibrar una partícula sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimientos elípticos horizontal y vertical simultáneamente. Estas ondas se caracterizan por tener relativamente, baja velocidad, baja frecuencia y gran amplitud. Las ondas Rayleigh son resultado de la interferencia de ondas P y el movimiento vertical de las ondas de corte (SV). En un medio homogéneo, el movimiento de las partículas del modo fundamental de las ondas Rayleigh que se desplazan de izquierda a derecha, es elíptico a lo largo de la superficie libre, en dirección de las agujas del reloj (retrogrado). El movimiento está limitado a un



plano vertical, consistente con la dirección de propagación de la onda. El ground roll es un tipo particular de las ondas Rayleigh y viaja a lo largo o cerca de la superficie del suelo. Aunque el ground roll se considera ruido en estudios de ondas de cuerpo (es decir, perfiles de reflexión y refracción), sus propiedades dispersivas son utilizadas para inferir propiedades elásticas cercanas a la superficie.

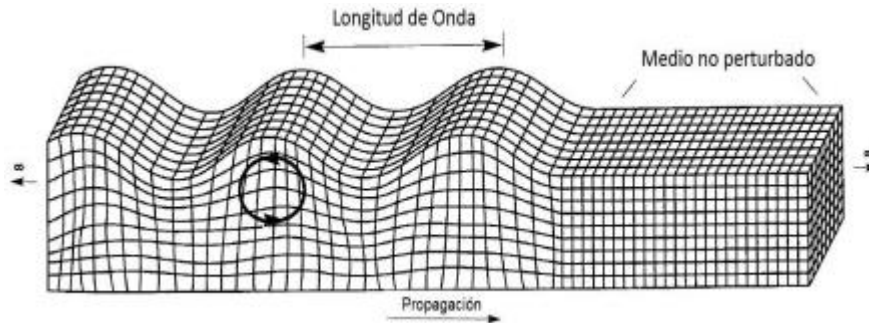


Figura 2.2, Deformación producida por la onda Rayleigh

La utilización de las ondas superficiales en la caracterización del suelo se debe a la naturaleza de este tipo de ondas y algunas de sus propiedades. Debido a que estas ondas viajan cercanas a la superficie libre, es relativamente fácil medir el movimiento asociado a ellas, obteniendo información importante sobre las propiedades mecánicas del suelo. La naturaleza dispersiva de las ondas superficiales Tipo Rayleigh en medios estratificado proporciona información clave respecto a las propiedades de los materiales cercanos a la superficie del suelo. La base de la mayoría de los métodos de análisis de ondas superficiales es una determinación exacta de la velocidad de fase dependiente de la frecuencia del modo fundamental de las ondas. Aparte de ser una función de la frecuencia, la velocidad de fase de las ondas se relaciona con otras propiedades del terreno. La propiedad más importante es la velocidad de onda de corte de cada capa de suelo. Así, mediante la inversión de la velocidad de fase de las ondas registradas, se logra obtener el perfil de ondas de corte en la profundidad en el sitio de prueba.

Dentro de este estudio se optó por el uso de la técnica de MASW, con fuente activa.

Adquisición y Procesamiento

Para la adquisición de datos, se instalaron geófonos de baja frecuencia de 4.5 Hz en dos líneas localizadas en cada eje del proyecto respectivamente, con una separación de 5 metros entre geófonos (figura 2.3). Los geófonos registran el movimiento del subsuelo generado por las ondas y transmiten mediante el cable sísmico la información mecánica al equipo de manera digital, la cual es visualizada mediante sismogramas. La fuente sísmica utilizada fue un martillo o combo de 12 lbs en algunas ocasiones se puede usar una placa o un disparador automático.

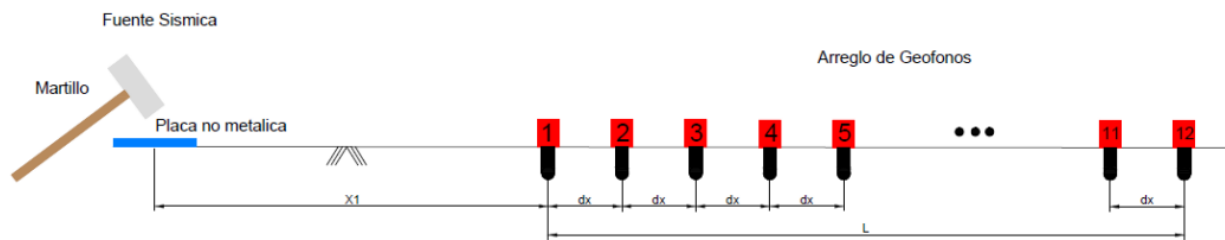


Figura 2.3, ejemplificación de arreglo sísmico

Generado el tren de ondas sísmicas mediante el combo (fuente activa) se inicia la recopilación de datos o sismogramas (figura 2.4) para luego ocupar éstos en la determinación de los perfiles de velocidad de onda de corte. Es importante mencionar que para cada sitio se generaron diferentes archivos en distintos puntos de tiro con el fin de corroborar los resultados del procesamiento.

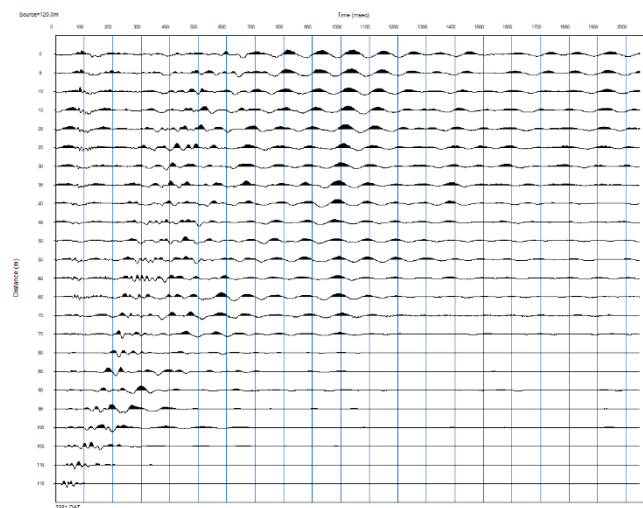


Figura 2.4, Sismograma para evento MASW-01

El análisis del sismograma permite obtener la curva de dispersión de sitio. Después de obtener dicha curva se procede a una inversión, la cual permite generar un perfil de velocidad de ondas de corte con un margen de incertidumbre o error. La ventaja de la obtención del valor de onda de velocidad VS, con esta técnica es que es posible detectar valores de baja velocidad subyacentes a capas de mayor potencia, lo cual no puede ser determinado mediante la sísmica de refracción convencional.

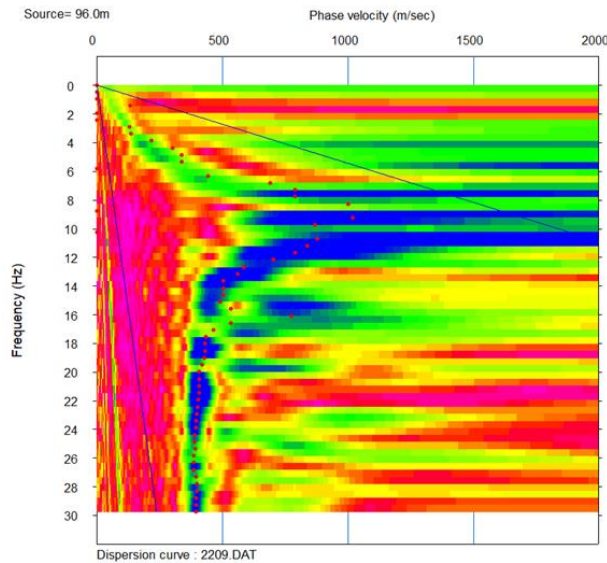


Figura 2.5, Ejemplo de curva de dispersión

Los perfiles de velocidad de la onda cortante V_s , se calculan utilizando un proceso de inversión iterativo que requiere de los datos de dispersión y de estimaciones a-priori de la distribución de la densidad. Posterior a dicha determinación se recurre a metodologías de inversión de los registros obtenidos por medio de un proceso de optimización denominado algoritmos genéticos (GAs) por medio del cual, se obtiene un resultado más fiable y presenta una estimación de resultados ajustados.

Procesamiento

Consistió en determinar el perfil unidimensional para cada MASW, determinando el periodo y amplitud de la onda para obtener de manera inicial la curva de dispersión. Con esta se hace el picado de frecuencias para la determinación de la velocidad de fase y la construcción del modelo de velocidad de onda de corte en profundidad.

Es importante mencionar que la onda de velocidad de corte puede ser determinada mediante sísmica de refracción, pero se recomienda determinarla directamente mediante el modelado MASW, ya que la técnica MASW permite detectar capas de baja velocidad sísmica en profundidad a comparación de la técnica de refracción, lo cual es importante para la prevención de riesgos de asentamientos diferenciales durante y después de la etapa de construcción.

Se realizó la clasificación de suelos con el apoyo de la “Tabla de clasificación de suelos” de las normas de seguridad estructural para Ecuador NEC, la cual establece que es necesario determinar la velocidad promedio de onda S en los primeros 30 metros mediante exploración geofísica o el uso de alguna metodología de exploración directa.



Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ kPa
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180$ m/s
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50$ kPa
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180$ m/s
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50$ kPa
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1 —Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2 —Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).	
	F3 —Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con índice de Plasticidad IP > 75)	
	F4 —Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 30m)	
	F5 —Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.	
	F6 —Rellenos colocados sin control ingenieril.	

Tabla 2.1, Valores típicos de velocidades de ondas de corte promedio. Clasificación de Perfiles de Suelos (Fuente: NEC-SE-DS, 2015)

Equipo Utilizado

Para la metodología sísmica se utilizó un sismógrafo digital marca Geometrics de 24 canales modelo StrataVisor NZ, grabación en disco duro y selectores de filtros, amplitudes y grado de sensibilidad (ganancias) para cada traza. Los sismogramas se grabaron digitalmente, para su posterior análisis a través de una computadora portátil y el empleo del programa de cómputo TomTime, el cual interactúa entre la computadora del sismógrafo y el intérprete.



Figura 2.6, Equipo de medición eléctrica con accesorios

Los geófonos sismodetectores fueron Mark Products de componente vertical de 4.5 Hz, los cuales captaron las vibraciones provenientes del subsuelo como consecuencia de los golpes realizados en la superficie de este con un martillo de 12 lbs, conectado a un interruptor de impacto el cual activa el sismógrafo en el momento en que se origina la perturbación.

Resultados de la exploración sísmica

A continuación, se presentan los resultados para la exploración geofísica.

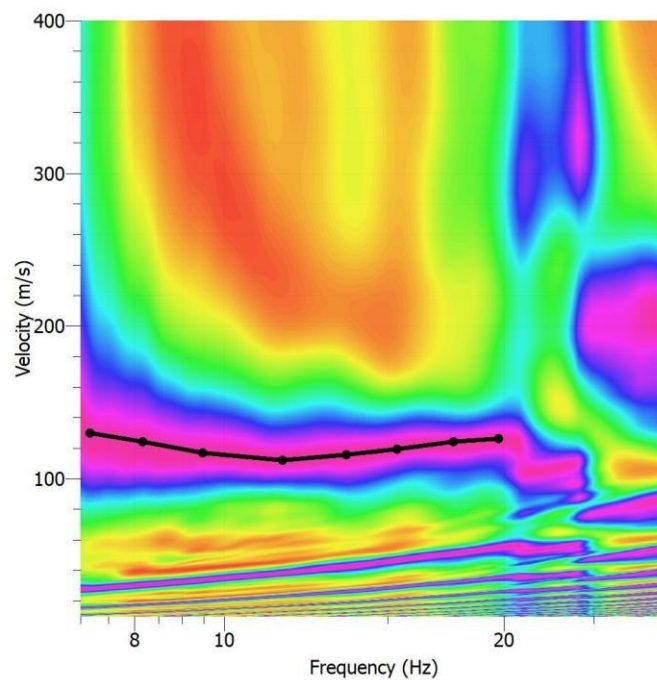


Figura 2.7.-Curva de dispersión empírica, obtenida del ensayo Activo MASW 1

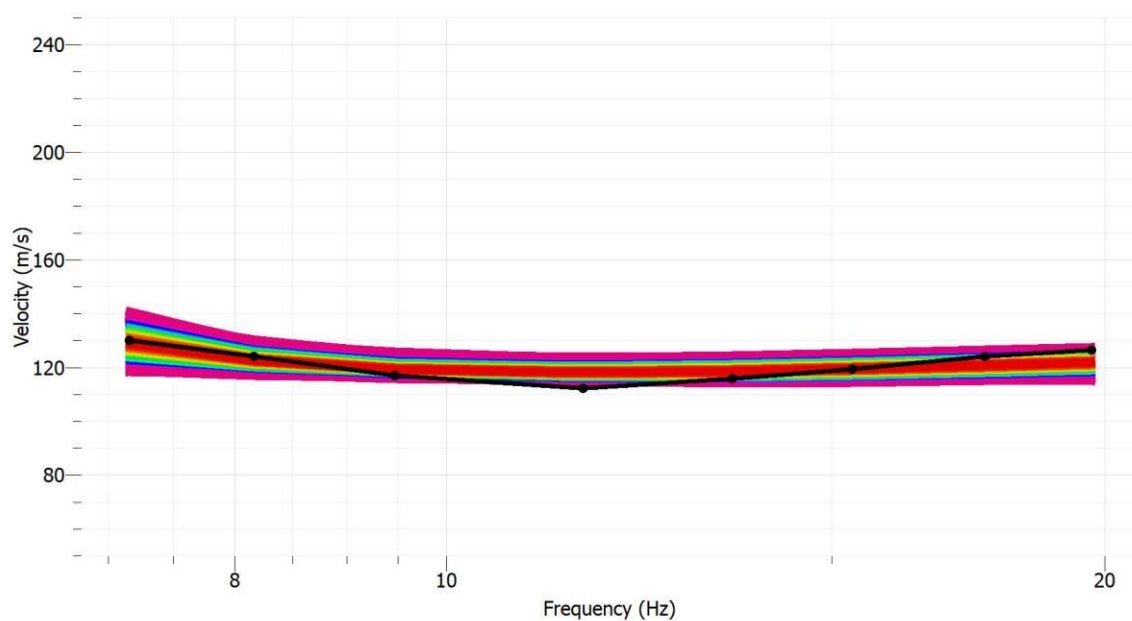


Figura 2.8.-Curva de dispersión teórica, obtenida de la inversión de la curva de dispersión MASW1

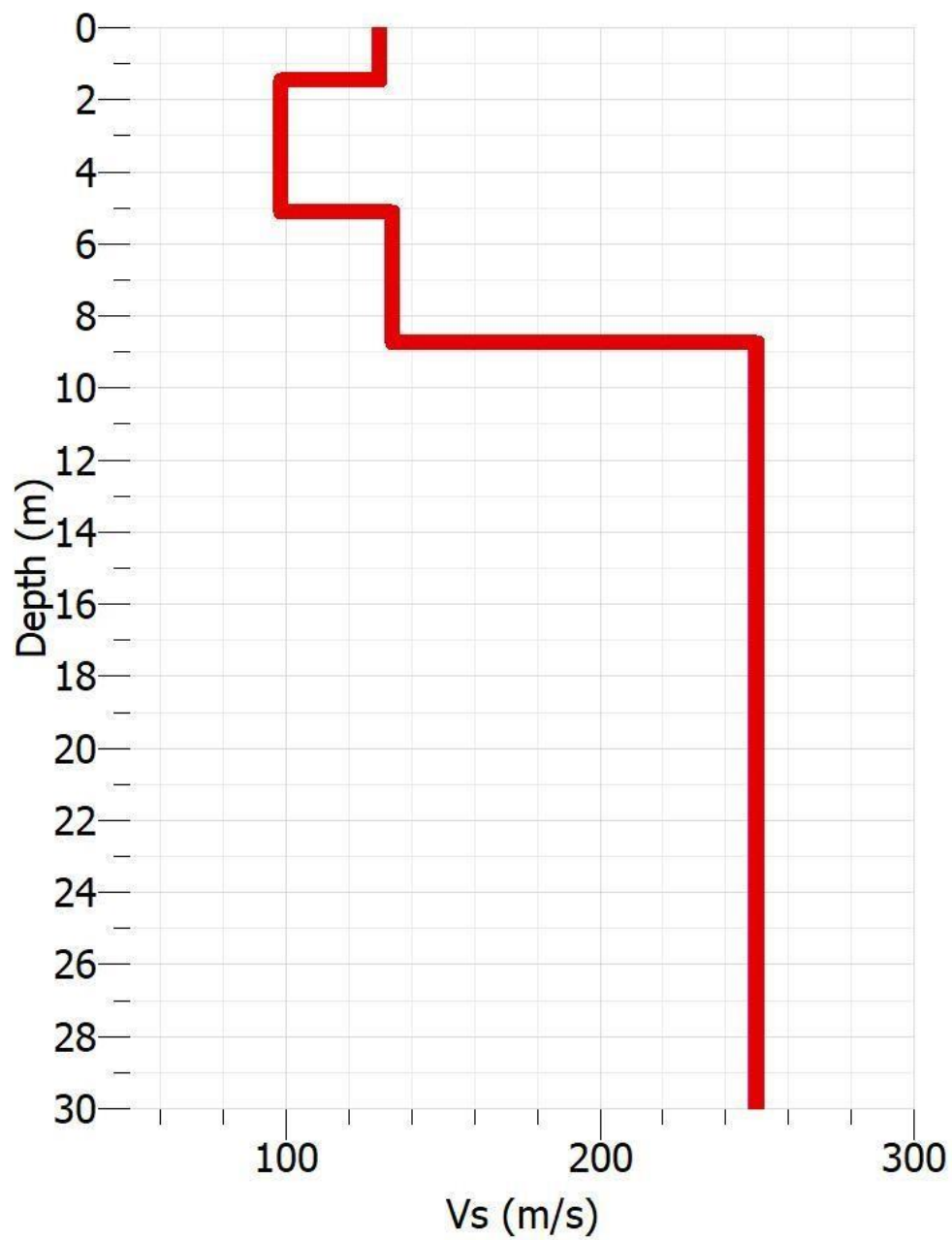


Figura 2.9.-Perfil de velocidades de ondas de corte MASW 1

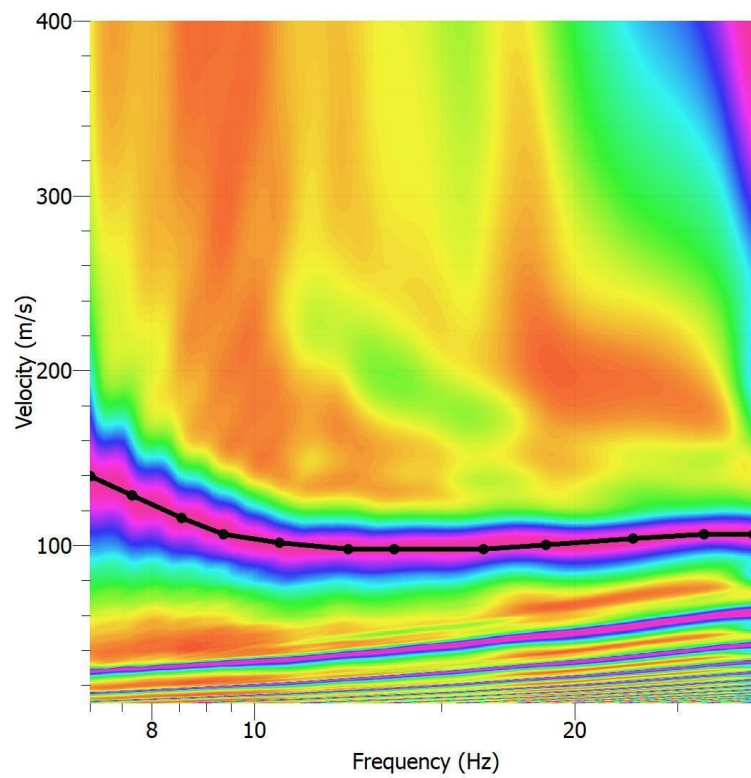


Figura 2.10.-Curva de dispersión empírica, obtenida del ensayo Activo MASW 2

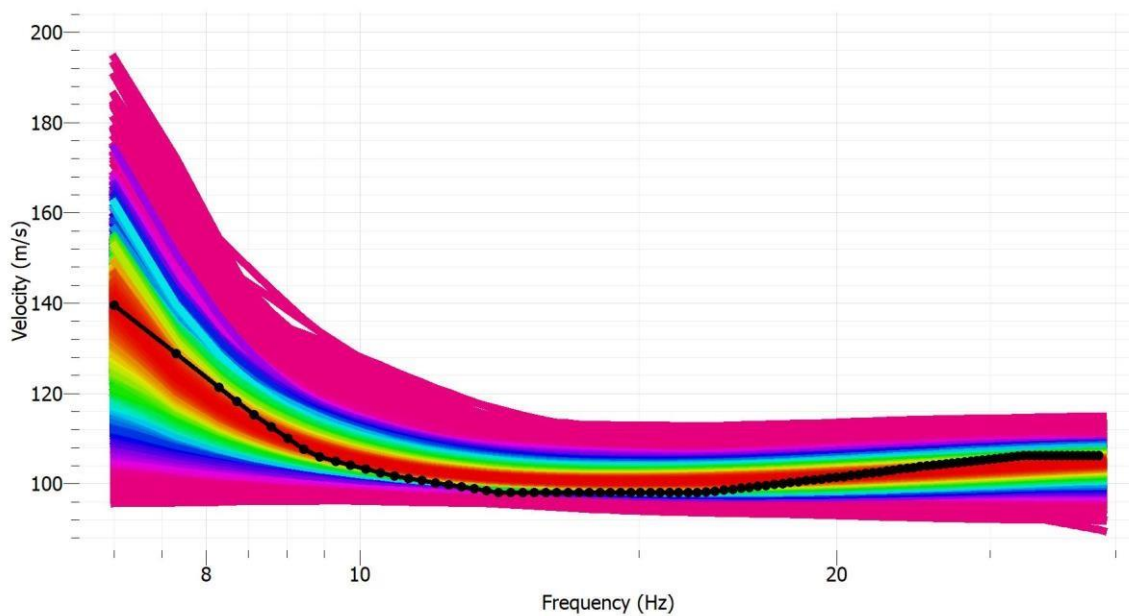


Figura 2.11.-Curva de dispersión teórica, obtenida de la inversión de la curva de dispersión
MASW 2

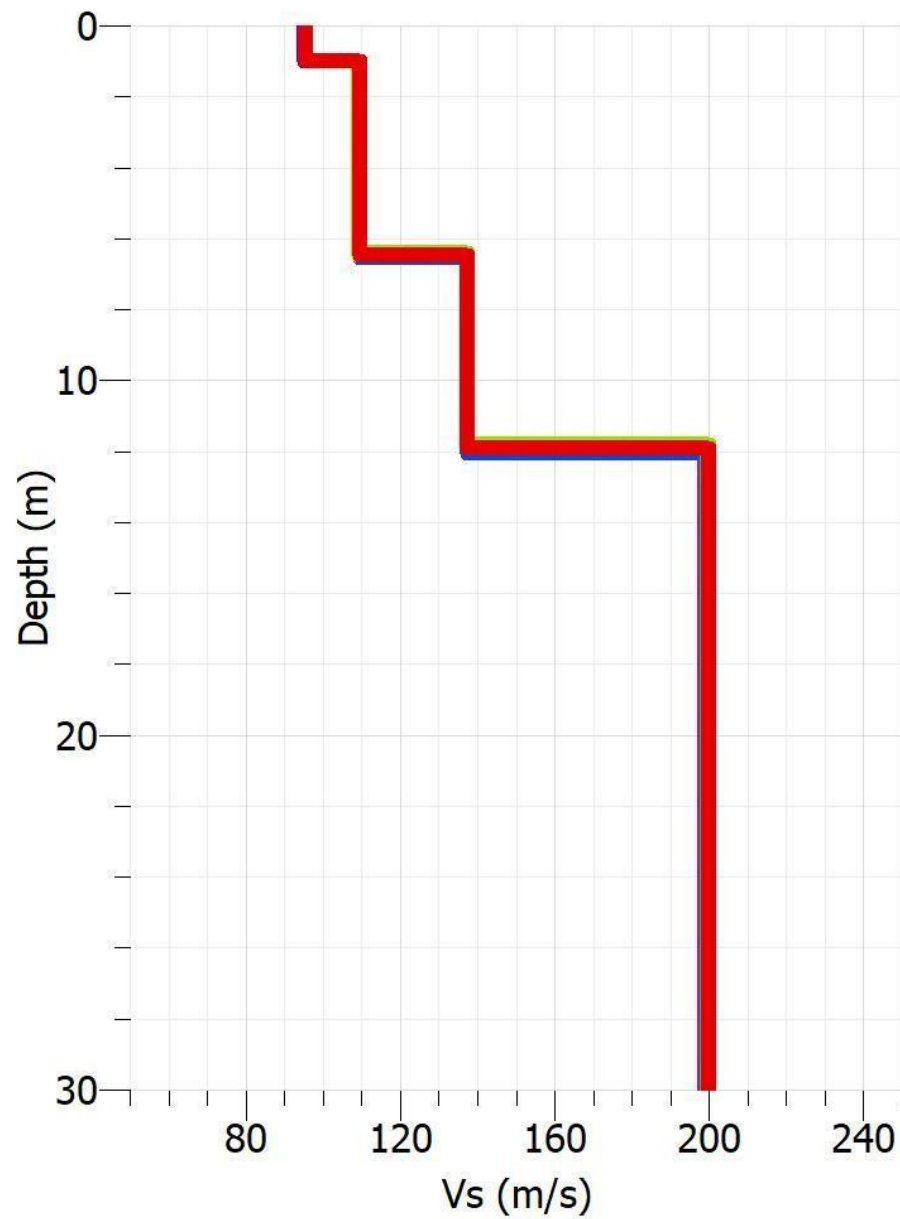


Figura 2.12.-Perfil de velocidades de ondas de corte MASW 2



Resultados de la exploración directa mediante sondeos

A continuación se resume la estratigrafía encontrada en los sondeos, el registro completo se presenta en el **Anexo N°2 y N°3**. Log de perforación de los sondeo S1 y S2 respectivamente.

▮ SONDEO S1 MARGEN DERECHA

Se encuentra un suelo de cobertura, residuales de limos arcillosos de alta plasticidad de consistencia media a firme de color café amarillento a verdoso de humedad baja a media hasta una profundidad de 5.0 m. Subyacente se encuentra un estrato compacto de suelo de consistencia rocosa sedimentaria, correspondiente a una arenisca lítica altamente intemperizada y meteorizada saturada de color verdosa.

▮ SONDEO S2 MARGEN IZQUIERDA

Se encuentra una terraza aluvial reciente formada por capa de arenas fina limosa de compacidad muy suelta a suelta húmeda de color café habano hasta los 5.50 m de profundidad. Subyacente encontramos un estrato de arenas arcillosas y limos de alta plasticidad de compacidad muy suelta a suelta completamente saturada de color gris verdosos hasta los 10 m de profundidad. Subyacente se encuentra un estrato arenas finas y arenas limosas arcillosas de compacidad media de color plomo verdoso hasta 12 m de profundidad. A partir de esta profundidad se encuentra una roca sedimentaria tipo arenisca lítica completamente intemperizada meteorizada saturada de color verdosa.



Capítulo III, Conclusiones y Recomendaciones Puente Existente

Como se puede observar en los sismogramas los resultados obtenidos de las ondas Vs está influenciada por la cimentación del puente, esto es las zapatas de hormigón, posibles cambios de suelo de cimentación y la misma consolidación del suelo tanto del peso del puente como del peso de los terraplenes de los accesos de acceso al puente. La misma vibración del puente por efectos del paso de los camiones de gran tamaño ha provocado una consolidación de los estratos del subsuelo de cimentación.

A fin de corregir la influencia de la cimentación del puente existente que resultaría en la obtención de Vs más altos en superficie y no representarían la condición del suelo de cimentación en la nueva ubicación, la interpretación de los registros ha consistido en obtener de ellos una curva de dispersión (un trazado de la velocidad de fase de las ondas superficiales versus la frecuencia), filtrándose solamente las ondas superficiales que representen la condición del subsuelo natural, ya que son estas ondas las que predominan en el grupo de ondas, poseyendo alrededor del 70% de la energía del tren de ondas. Además, la velocidad de fase de estas ondas tiene un valor que varía entre el 90% al 95% del valor de la velocidad de propagación de las ondas S (Vs). Luego mediante un procedimiento de cálculo inverso iterativo (método de inversión) y a partir de la curva de dispersión calculada se obtiene el perfil sísmico del terreno en función de Vs para cada punto de estudio, que se presenta a continuación.

El ensayo corresponde al ensayo MASW-01 de 115 m de longitud ubicado en la margen derecha del Río San Miguel, genero un ensayo de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 metros, en el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos, las cuales son asociados a materiales granulométricos y lutitas de mala calidad.

Tabla 3.1, Tabla de Resultados MASW-01

Estrato	Prof (m)	di (m)	Vsi (m/s)	di/Vsi
1	0	1,5	130	0,01
2	1,5	3,5	100	0,04
3	5	4	135	0,03
4	9	21	250	0,08
	30			
Suma:		30		0,16

MASW-01

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} = \frac{30 \text{ m}}{0,16 \text{ m/(m/s)}}$$

$$V_{s30} = 187,30 \text{ m/s}$$



De acuerdo con la tabla de clasificación de suelos de las normas de seguridad estructural para Ecuador NEC, se clasifica como perfil de suelo tipo D

De manera similar en la otra margen se presentan valores sísmicos y espesores similares, de igual forma el material es asociado a posibles materiales granulométricos y lutitas de mala calidad. Aunque es importante mencionar que este margen presenta una disminución en las velocidades de onda corte, lo cual es ocasionado por la presencia de materiales más arcillosos e intemperizados debido a la presencia constante de agua, ya que con base a la inspección del área se pudo determinar que es una zona natural de inundación formando una terraza aluvial de reciente formación.

Tabla 3.2, Tabla de Resultados MASW-02

Estrato	Prof (m)	di (m)	Vsi (m/s)	di/Vsi
1	0	1	95	0,011
2	1	5	110	0,045
3	6	6	120	0,050
4	12	18	200	0,090
	30			
Suma:	30			0,20

MASW-02

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} = \frac{30 \text{ m}}{0,196 \text{ m/(m/s)}}$$

$$V_{s30} = 153,08 \text{ m/s}$$

De acuerdo con la tabla de clasificación de suelos de las normas de seguridad estructural para Ecuador NEC, se clasifica como perfil de suelo tipo E

Las recomendaciones contenidas en el presente informe se basan en los datos obtenidos del plan exploratorio realizado.

No se prevé fenómenos de licuefacción de consideración sin embargo se recomienda realizar un evaluación del fenómeno en la margen izquierda sobre la terraza aluvial reciente. En este sentido, es recomendable la cimentación profunda mediante pilotes hasta los estratos de suelo rígidos competentes.



Se recomienda que en la margen izquierda se construya primero el terraplén hasta las cotas del proyecto, compactando en capas acorde con las normas MOP-001-F-2022 y luego la construcción de los pilotes de la cimentación, aunque implique que se tenga que escavar el terraplén construido

Marco Apunte Ordóñez
Ingeniero Civil-Consultor

Elaborado:	Revisado:	Aprobado:
MSc.Ing. Patricio Ludeña E.	Ing. Ana Torres Bermeo	Ing. Jorge Carrillo Tutivén
Técnico en Geotecnia	Supervisora del Contrato	Administrador del Contrato