



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

INFORME DEL ESTUDIO GEOFÍSICO DE  
“PETITE SISMIQUE” (MICROSÍSMICA)  
EN EL SOCAVÓN 2 DEL P.H. LAS  
CRUCES, EN EL ESTADO DE NAYARIT.

**TITULACIÓN POR TRABAJO  
PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO GEOFÍSICO**

P R E S E N T A

RODRÍGUEZ CHACÓN MARIO VALENTIN

**DIRECTOR: M. en C. DAVID ESCOBEDO ZENIL**



MÉXICO, D.F. ABRIL DEL 2013

## ***DEDICATORIAS***

*A Dios y a mis padres por darme la vida, una maravillosa formación, por su ternura y todo su amor, y por contagiarme de sus mayores fortalezas. Me enseñaron a ser “luchón” y “decidido” y a tener siempre en ustedes un gran apoyo. Por lo que soy y por todo el tiempo que les robé pensando en mi.....Gracias.*

*Con mucho amor y respeto.*

*A mis abuelos (q.e.d.), que gracias a esos días, semanas y meses que pase con ustedes aprendí a ver la naturaleza y el campo como algo maravilloso, que disfruto y que forma parte de mi vida.*

*A mis hermanas y hermanos por su amor, apoyo y comprensión.*

*Y todos y cada uno de los compañeros y amigos que formaron parte de mi vida durante la carrera.*

## ***AGRADECIMIENTOS***

*A la Universidad Nacional Autónoma de México en especial a la Facultad de Ingeniería por la oportunidad que me dio de realizarme profesionalmente.*

*Quiero agradecer al M.C. David Escobedo Zenil, al Dr. José Héctor Sandoval Ochoa, al Ing. Martín Vidal, al M.C. Mauricio Nava y al Ing. Arturo Tapia Crespo por su tiempo y dedicación que se tomaron en la revisión de este trabajo, especialmente por su asesoría en la mejora de este.*

*Agradezco a la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de la Comisión Federal de Electricidad por la oportunidad de formar parte de sus filas, lo cual me ayudo en mi desarrollo profesional y agradezco especialmente por las facilidades otorgadas en la elaboración de este trabajo.*

*A todos los Ingenieros, compañeros y amigos de la CFE, quienes siempre compartieron su experiencia y conocimientos conmigo al ser parte del equipo, ayudándome en mi desarrollo y formación profesional.*

## ÍNDICE GENERAL

	<i>Página</i>
<b>RESUMEN</b>	
<b>ABSTRACT</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b><i>1.- OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO GEOFÍSICO</i></b>	<b><i>1</i></b>
<b><i>2.- GENERALIDADES DEL PROYECTO</i></b>	<b><i>3</i></b>
<b><i>2.1- Localización y vías de acceso</i></b>	<b><i>3</i></b>
<b><i>2.2- Descripción general de proyecto</i></b>	<b><i>6</i></b>
<b><i>2.3- Descripción geológica general del sitio</i></b>	<b><i>8</i></b>
<b><i>3.- EXPLORACIÓN GEOFÍSICA POR EL MÉTODO DE “PETITE SISMOLOGÍA” (MICROSÍSMICA)</i></b>	<b><i>19</i></b>
<b><i>3.1- Principios físicos</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b><i>3.2- Metodología y volumen de obra</i></b>	<b><i>28</i></b>
<b><i>3.3- Equipo de medición</i></b>	<b><i>32</i></b>
<b><i>3.4- Procesamiento e interpretación</i></b>	<b><i>33</i></b>
<b><i>4.- ANÁLISIS DE RESULTADOS</i></b>	<b><i>39</i></b>
<b><i>5.- CONCLUSIONES</i></b>	<b><i>41</i></b>
<b><i>REFERENCIAS</i></b>	<b><i>43</i></b>
<b><i>ANEXOS</i></b>	

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<i>Página</i>
<i>Figura N° 1.- Croquis de localización del proyecto y del sitio de estudio sobre el río San Pedro</i>	4
<i>Figura N° 2.- Localización del socavón 2 en margen izquierda de la Alternativa Rancho Viejo</i>	5
<i>Figura N° 3.- Distribución de las obras civiles en el área de estudio</i>	7
<i>Figura N° 4.- Columna estratigráfica del área de estudio de la boquilla</i>	9
<i>Figura N° 5.- Distribución en la zona de la boquilla de fracturas y fallas normales principales con dirección NW-SE y NE-SW</i>	16
<i>Figura N° 6.- Relación entre los módulos elásticos, (Telford, 1990)</i>	22
<i>Figura N° 7.- Curva de Histéresis</i>	23
<i>Figura N° 8.- Relación lineal entre el módulo de deformación estático vs frecuencia de las ondas transversales (Marsal y Resendiz, 1979)</i>	25
<i>Figura N° 9.- Cociente del módulo dinámico entre el estático vs longitud de onda Transversal (Marsal y Resendiz, 1979)</i>	25
<i>Figura N° 10.- Detección de onda S, de acuerdo a Schneider</i>	26
<i>Figura N° 11.- Correlación experimental entre el módulo Estático de deformación vs frecuencia de Schneider (1967) y Bieniawski (1978)</i>	27
<i>Figura N° 12.- Arreglo de puntos de tiro utilizado en el estudio</i>	28
<i>Figura N° 13.- (a) y (b), Identificación de arribos de onda P; (c), Generación de la dromocrónica y del modelo de velocidad para la onda P</i>	34
<i>Figura N° 14.- Plano integrado de resultados del estudio sísmico por “Petite Sismique”</i>	38

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	<i>Página</i>
<i>Fotografía N° 1.- Afloramiento de la riolita fluidal (Tm-ic1), identificada aguas abajo del eje Rancho Viejo</i>	<i>11</i>
<i>Fotografía N° 2.- Nucleó que muestra la Ignimbrita de la unidad Las Cruces (Tm-ic2), con oquedades rellenas de cristales de cuarzo, fiammes e indicios de corrientes de fluidez</i>	<i>11</i>
<i>Fotografía N° 3.- Núcleos cortados de Tobas rojizas de la unidad Corapan (Tm-ct2) obtenidos por exploración directa de 102 a 106 m de profundidad</i>	<i>13</i>
<i>Fotografía N° 4.- Núcleos cortados de Ignimbritas de la unidad Corapan (Tm-ci2) de 32 a 36 m de Profundidad</i>	<i>13</i>
<i>Fotografía N° 5.- Depósitos de aluvión en la margen izquierda</i>	<i>14</i>
<i>Fotografía N° 6.- El núcleo muestra un dique diabásico de tono gris oscuro a verdoso observándose vetillas de calcita</i>	<i>15</i>
<i>Fotografía N° 7.- Imagen aérea de la Falla Los Bueyes, en la margen izquierda de la Boquilla</i>	<i>17</i>
<i>Fotografía N° 8.- Abertura de la Falla Las Cruces a nivel del río San Pedro</i>	<i>18</i>
<i>Fotografía N° 9.- (a) y (b), Colocación del geófono, (c) generación de energía en la pared del socavón 2</i>	<i>30</i>
<i>Fotografía N° 10.- Obtención y generación del sismograma “Petite Sismique”</i>	<i>32</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

	<i>Página</i>
<i>Tabla N° 1.- Volumen de trabajo realizado en el Socavón 2</i>	<i>31</i>
<i>Tabla N° 2.- Análisis de resultados</i>	<i>40</i>

## ***ANEXOS***

***Anexo A.- Histogramas de frecuencias de Ondas S***

***Anexo B.- Gráficas de tiempos totales***

***Anexo C.- Duración total en diversos sitios de presas (Schneider, B.)***



## RESUMEN

El presente trabajo técnico tiene como finalidad mostrar los trabajos de exploración sísmica empleando la técnica de "Petite Sismique" (microsísmica), en el socavón 2 de la margen izquierda del proyecto hidroeléctrico Las Cruces, en el estado de Nayarit.

La metodología empleada consiste en obtener de manera indirecta a partir de las propiedades físicas de la roca como son: las velocidades de las ondas compresionales y transversales, así como la densidad ( $\rho$ ), el valor de los módulos elásticos dinámicos (relación de Poisson, módulo de corte, módulo de Young y módulo Estático de deformación) "in situ" de la roca; estos valores sirven de apoyo para un mejor conocimiento de las características físicas y mecánicas del macizo rocoso.

El trabajo de campo consiste básicamente en realizar tendidos sísmicos empleando un solo detector y diversas fuentes móviles para generar los registros (sismogramas) correspondientes para cada tendido. Posteriormente se analiza la información mediante un procesamiento similar al realizado en los estudios de refracción sísmica para las ondas P y S.

El procesamiento de los datos inicia con la identificación de los tiempos de viaje de las ondas compresionales y de cizalla en cada uno de los registros obtenidos, a continuación se elaboran las gráficas distancia-tiempo (dromocrónicas) de cada una y se calculan las velocidades correspondientes para cada tipo de onda mediante el programa IXRefraX. Finalmente se obtiene un modelo de velocidades de ondas P integrado con la información obtenida del levantamiento geológico.

---





Con el valor de las velocidades de las ondas P y S se calculó el valor de los módulos elásticos dinámicos "in situ" de la roca empleando las ecuaciones básicas que se mencionan en el capítulo 3.

Como parte del procesamiento y análisis básico, se realizaron Histogramas de frecuencias de Ondas S y se obtuvieron las gráficas de tiempo total de cada registro. El primero determina la frecuencia máxima para cada tendido sísmico; el segundo se usa como indicativo de la calidad de roca considerando una distancia de 15 m de acuerdo a diversos criterios de B. Schneider (1967) y usando la tabla del anexo C.

Del análisis de resultados obtenidos se determinó el espesor de la roca fracturada y posibles zonas alteradas, así como un mejor conocimiento de las propiedades físicas de la roca de acuerdo a los valores de velocidad de las ondas P y S obtenidos previamente.

El trabajo se ha dividido en 5 Capítulos. El primero de ellos incluye los objetivos planteados en el presente informe así como la justificación del estudio. En el Capítulo 2 se mencionan los datos generales como la localización y una descripción general del proyecto, se discuten asimismo las principales características geológicas de la zona de estudio.

El Capítulo 3 se inicia con los principios físicos que rigen la exploración sísmica por "Petite Sismique" y una descripción de las ecuaciones básicas para el cálculo de los módulos dinámicos. Se expone la metodología para la adquisición de los datos de campo, así como el equipo empleado y la secuencia de procesamiento e interpretación de la información.

En el Capítulo 4 se realiza el análisis de los resultados obtenidos, integrándose la información geológica y generando el modelo de velocidades de ondas P, que consiste en una secuencia de capas, separadas por contactos sísmicos

---



irregulares, cuyos valores de velocidad fueron calculados de los datos de campo previamente obtenidos.

Finalmente, en el Capítulo 5 se resumen las conclusiones y los resultados más importantes obtenidos en este trabajo.

---



## ABSTRACT

The goal of this technical report is to show the "Petite Sismique" (microseismic) technique used in the number 2 adit on the left side of Las Cruces hydroelectric project, in Nayarit state.

The methodology obtain the dynamic elastic moduli (Poisson ratio, shear moduli, Young moduli and elastic deformation moduli) of the rock, from indirect measures of wave velocity and rock density; this values are used to improve the knowledge of physical and mechanical characteristics of the basement rock.

The field procedures consist in a single seismic receiver with different mobile seismic sources to generate the seismic records of each seismic array. Later a similar processing of P and S waves in refraction surveys is made to analyze the recorded data.

The data processing start identifying the travel time of the compressional and shear waves on each record, then a time-distance plot is obtained and the velocity for each type of wave is calculated using the IXRefrax software. Finally a P wave velocity model is generated including the geological information.

With the P and S velocities the rock dynamic elastic moduli are calculated using the elemental equations mentioned in the chapter 3.

Part of the processing and basic analyze is to create a histogram of the S wave frequency as well as total time plots of each record. The first one determines the maximum frequency of each seismic array: the second one is used as a quality rock indicator considering the 15m distance according with Schneider criterion (1967) and the appendix C table.

---



From the results analysis, the fractured rock layer thickness was obtained and it possible alteration zones, also improved the knowledge of the physical properties of the rock according with the P and S waves velocities previously obtained.

This report has been divided in five Chapters. The first chapter includes the objectives of this report and the survey justification. The second chapter describes the project generalities, and the geological setting of the studied area.

Chapter 3 includes the "Petit Sismique" and elastic moduli theoretical background. Also describes the field procedures for data acquisition, instrumentation, data processing and interpretation.

The chapter 4 is a results analysis, integrating the geological information and generating a P wave velocity model, that consist of a layer sequence divided by irregular seismic boundaries, whose values were calculated from the field data.

Finally, in the chapter 5 includes the conclusions and the most representative results of the project.

---



## INTRODUCCIÓN

El proyecto hidroeléctrico Las Cruces se localiza a 60 km de la ciudad de Tepic en la región central del estado siguiendo la carretera federal Tepic-Mazatlán; hasta el municipio de estación Ruiz y continuando hasta la comunidad de San Pedro Ixcatán dentro del estado de Nayarit.

Durante el año 2008 las diferentes disciplinas (geología, geofísica y topografía) retomaron las actividades para continuar con los estudios de exploración a nivel factibilidad del sitio denominado PH Las Cruces (antes Pozolillo). Originalmente se consideraban dos alternativas de tipo de cortina:

- Concreto Compactado con Rodillo (CCR)
- Enrocamiento con Cara de Concreto (ECC)

La finalidad era evaluar las condiciones geológico-geotécnicas a fin de determinar la mejor alternativa.

Para un mejor conocimiento de las condiciones geotécnicas del macizo rocoso se planteó la excavación de un primer socavón exploratorio en la margen izquierda del río San Pedro (socavón 1). La información obtenida de este socavón integrada junto con la información geológica-geofísica de superficie ayudaría a una mejor identificación de condiciones elásticas "in situ" de la roca. Este socavón se realizó a una elevación de 103 msnm con una longitud total de 364.30 m.

En el año 2011 se consideró la alternativa "Rancho Viejo" ubicada a 320 m aguas arriba del eje la cortina CCR inicial. De acuerdo a los estudios de exploración superficial, esta alternativa presentaba mejores condiciones geológico-estructurales para la construcción de la obra hidráulica.

---



Nuevamente se planeó realizar un segundo socavón (denominado socavón 2) sobre la misma margen y a la misma elevación que el socavón exploratorio 1. La longitud total de este socavón 2 es de 339 m.

En este segundo socavón se efectuaron diversas pruebas de campo empleando métodos directos (reconocimiento geológico y pruebas mecánicas) e indirectos (geofísica) de exploración. Las pruebas mecánicas y los métodos geofísicos tienen el objetivo de determinar el módulo de deformación estático. Este parámetro representa el comportamiento mecánico de un macizo rocoso, en particular, cuando se trata de excavaciones subterráneas.

El reconocimiento geológico, consiste en cartografiar los contactos entre las diferentes unidades litológicas; así como distinguir la roca sana de la alterada y recaudar los datos litológico-estructurales que sean de utilidad para la definición del modelo geológico del sitio.

Las pruebas mecánicas, determinan la deformabilidad (se define como "la relación entre la carga aplicada y la tensión resultante") del macizo rocoso realizando mediciones "in situ" de la roca. Se emplean diversos tipos de pruebas para determinar el valor del módulo de deformación como pueden ser: pruebas de placa flexible (PJT), prueba con martillo Schmidt, ensayos mediante Placas de carga (PLT), corte directo, pruebas por Gato Goodman, entre otras.

Las correlaciones entre los diversos tipos de mediciones "in situ", como se ha señalado por varios investigadores (Bieniawski, 1978; Heuze y Amadei, 1985), demuestran que el valor obtenido por las diversas pruebas y/o ensayos "in situ" para obtener el valor del módulo de deformación difiere uno de otro.

---



Como parte de los estudios por exploración indirecta se realizó un estudio de exploración sísmica empleando la técnica de "Petite Sismique". Este método fue propuesto originalmente por Schneider (1967) como un medio para determinar el módulo de deformación "in-situ", de un macizo rocoso. Desde el estudio original, Bieniawski (1978) ha informado resultados adicionales.

En esta técnica se obtiene el valor de la frecuencia dominante del registro de ondas S, y el resultado puede usarse para encontrar el módulo de deformación estático a través del uso de una relación empírica. Los datos combinados de Schneider (1967) y Bieniawski (1978) fueron compilados por Heuze et al, (1981).

El objetivo de la exploración sísmica es el de delimitar las zonas con diferente calidad de roca, así como conocer de manera indirecta el comportamiento geomecánico de la roca mediante la identificación y análisis de las velocidades sísmicas de las ondas P y S.

El análisis y la interpretación de las ondas sísmicas proporcionan una herramienta para un conocimiento más amplio de la unidad rocosa. Por una parte, mediante la distribución de velocidades de las ondas sísmicas permite conocer el estado físico y mecánico del macizo rocoso. Por otra, conociendo la distribución de velocidades y la densidad del medio, se pueden calcular los módulos elásticos del macizo rocoso empleando las relaciones establecidas como las constantes elásticas del medio.

---



## 1.- OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO GEOFÍSICO

El objetivo principal del estudio geofísico realizado en el socavón 2 de la alternativa "Rancho Viejo" por el método de "Petite Sismique" consiste en:

- Determinar las velocidades de propagación de las ondas longitudinales (P) y Transversales (S) del macizo rocoso.
- Obtener el espesor de la roca descomprimida y el modelo de velocidad de ondas longitudinales (P).
- A partir de los valores de velocidad de las ondas P y S, determinar los módulos elásticos dinámicos "in situ" del macizo rocoso, como son:
  - Relación de Poisson
  - Módulo de rigidez
  - Módulo de Young
- Determinar el módulo estático de deformación como una función de la frecuencia máxima de la onda S empleando la relación de Schneider.
- Determinar el tiempo de amortiguamiento para una distancia de 15 m de las gráficas de tiempo total de las ondas P y S.

El conocimiento de las propiedades mecánicas de las rocas empleando técnicas de exploración directas e indirectas es de vital importancia en la etapa de planeación y diseño. Es por ello, que en la etapa de exploración, es necesario realizar estudios que permita un mayor conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de la roca mediante el empleo de métodos de prospección rápida y eficiente.

A partir del conocimiento de las variables físicas como son: densidad, y velocidad de onda P y S es posible determinar, con una muy buena aproximación, las constantes elásticas dinámicas de las rocas por medio de correlaciones experimentales.





En tal sentido, este estudio representa un método de evaluación rápida que proporciona información útil para la caracterización física de la roca. Esta técnica puede ser empleada, en conjunto con otras herramientas para un mejor conocimiento del macizo rocoso.

Como parte del informe se incluyen las gráficas de los histogramas que determinan las máximas frecuencias de las ondas transversales, así como las gráficas de tiempo total de registro para todos y cada uno de los tendidos sísmicos realizados.



---

## **2.- GENERALIDADES DEL PROYECTO**

### **2.1- Localización y vías de acceso**

El proyecto hidroeléctrico Las Cruces se localiza en la parte norte de la ciudad de Tepic a 60 km de distancia de la capital del estado. El acceso al proyecto se realiza, por la carretera federal No. 15 siguiendo la autopista Tepic-Mazatlán; en el Kilómetro 62 se toma la desviación a la derecha de 5 km a Estación Ruiz, continuando por camino pavimentado y bordeando la margen izquierda del río, con un recorrido aproximado de 34 Km, hasta las comunidades de San Juan Corapan, Presidio de los Reyes y San Pedro Ixcatán; a partir de este punto se transita por una brecha de terracería 9 km que concluye en el sitio de la boquilla Las Cruces. En línea recta se encuentra a 30 km de la C.H. Aguamilpa (figura 1).

El río San Pedro en conjunto con los ríos Acaponeta, Baluarte y Presidio, pertenecen a la vertiente del Océano Pacífico y forman la región hidrológica No. 11. El río San Pedro, se considera el de mayor extensión, con un área de captación de 25 407 Km<sup>2</sup>.

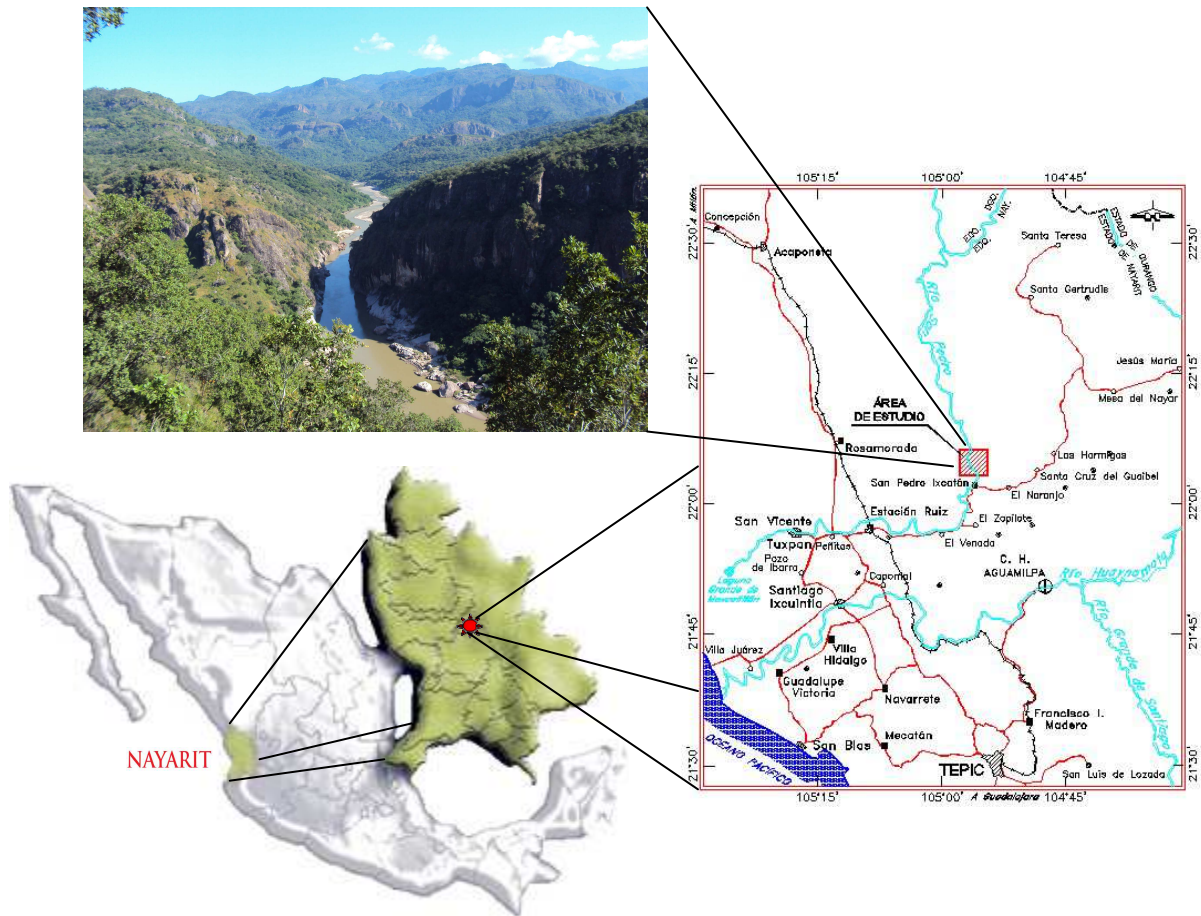


Figura 1.- Croquis de localización del proyecto y del sitio de estudio sobre el río San Pedro.

El socavón 2, se encuentra a una cota de 103 msnm, presenta una longitud total de 339.29 m y se ubica en la margen izquierda por debajo del trazo del eje de la cortina de CCR de la alternativa Rancho Viejo, (figura 2).

Consta de 2 secciones primordiales: la primera sirve como acceso para llegar a la sección principal, tiene una longitud de 101.16 m y va semiparalelo al río San Pedro. La segunda sección (sección principal) sigue por debajo del eje de la cortina, tiene una longitud de 238.13 m. El estudio sísmico por "Petite Sismique", se realizó a lo largo de todo el socavón sobre las dos secciones principales y únicamente sobre la pared izquierda.

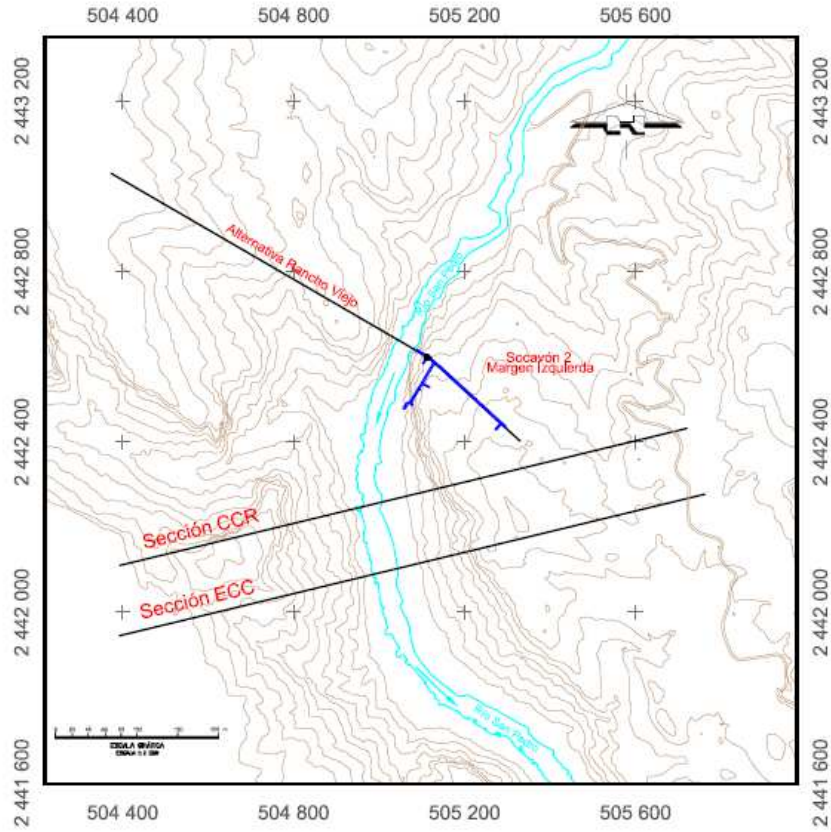


Figura 2.- Localización del socavón 2 en margen izquierda de la Alternativa. Rancho Viejo.



## 2.2- Descripción general de proyecto

El proyecto hidroeléctrico Las Cruces alternativa Rancho Viejo consta de: una cortina u obra de contención con una elevación de diseño a 245 msnm (incluyendo el desplante) y contempla una altura de 178 m, así como una longitud de corona de 815,33 m y el NAME a la cota 243 m.

El eje de la cortina presenta un rumbo NW 47° SE, presentando en el cadenamiento 1+038,08 una deflexión con rumbo NW 59°SE.

La obra de desvío comprende dos túneles de sección portal de 12,00 m de diámetro cada uno y longitudes de 538,80 y 606,89 m; para el túnel 1 la elevación del portal de entrada está en la cota 83,50 msnm y el de salida a los 81,00 msnm, en tanto que en el túnel 2 la entrada está a los 88,50 msnm y el de salida a los 81,00 msnm.

Una obra de excedencias ó canal vertedor, que se ubica en la parte alta de la margen izquierda con una longitud total de 833,07 m. Del inicio del trazo del canal vertedor hasta los 153 m, la sección sigue un rumbo SE 23° NW, con una deflexión a esta distancia con rumbo SE 04° NW, que se conserva hasta finalizar el trazo.

Una obra de generación ó Casa de máquinas externa sobre la margen derecha contenidas en la cortina y finalmente dos ataguías ubicadas aguas arriba y aguas abajo cada una, (ver figura 3).



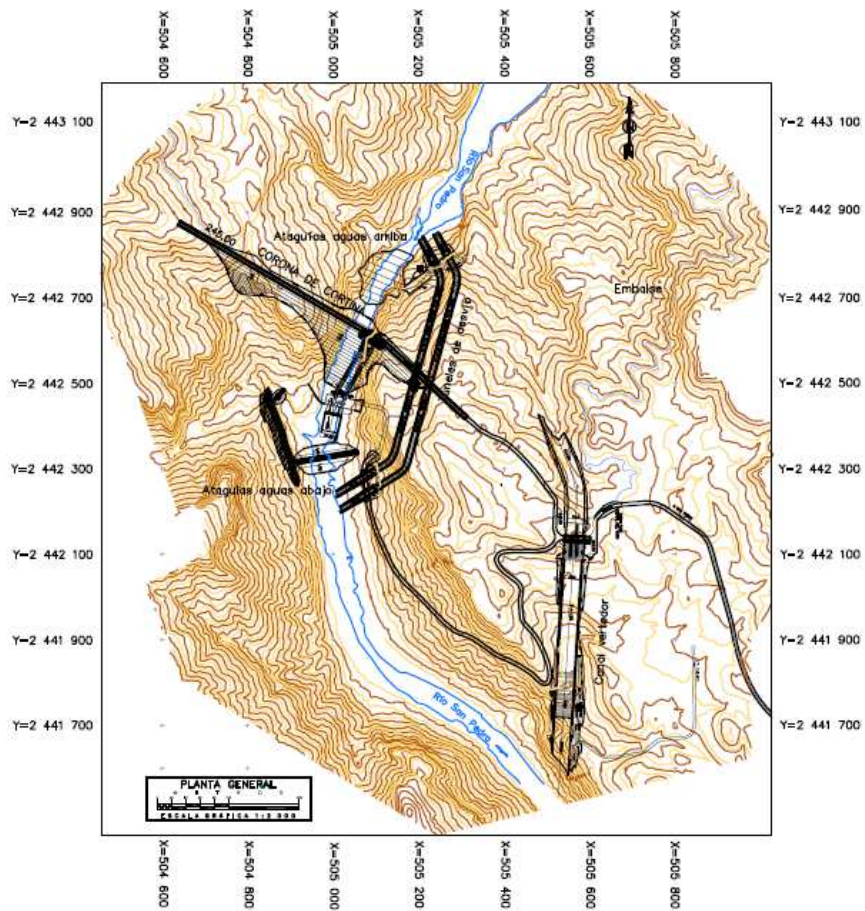


Figura 3.- Distribución de las obras civiles en el área de estudio.



### **2.3- Descripción geológica general del sitio**

Geológicamente el Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, se ubica sobre una sucesión de dos grandes eventos ígneos, representados por escarpes y acantilados escalonados de pendientes verticales prolongadas, de acuerdo a los estudios geológicos realizados en el sitio no se conoce con exactitud el contacto litológico entre ambos eventos que son afectados por cuerpos intrusivos de diferente composición. Estos eventos originaron rocas ígneas extrusivas que pertenecen al Supergrupo Volcánico Superior que conforman la provincia geológica de la Sierra Madre Occidental del Terciario Inferior y Medio.

Litológicamente se identifica una secuencia de derrames lávicos pseudoestratificados e irregulares que afloran en el área de estudio con grandes espesores, estos derrames originaron diferentes rocas, que de acuerdo a la exploración superficial se identificaron como: riolita fluidal, toba lítica, riolitas e ignimbritas riolíticas pertenecientes al Oligoceno-Mioceno Temprano (CFE, 2011).

Esta secuencia de derrames lávicos y pseudoestratificaciones se clasificaron en dos unidades geológicas principales denominadas: Unidad Las Cruces y Unidad Corapan. Estas unidades se encuentran afectadas por grupos de fallas, fracturas y emplazamiento de diques de composición diabásica y/o pórfido andesíticos. Superficialmente estas unidades están cubiertas parcialmente por depósitos no consolidados como: suelo residual (Qsr), depósitos de talud (Qdt) y aluvión (Qal). Como se muestra en la columna litológica de la figura 4.



ERA	PERÍODO	ÉPOCA	NOMENCLATURA	LITOLÓGIA	EDAD (Ma)		
CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Qal Qsr Qdt	Depósitos de aluvión, Suelo residual y Depósitos de talud.	0,01		
			DISCORDANCIA				
			DISCORDANCIA				
	TERCIARIO	NEÓGENO	MIOCENO	Tm-dd	Tm-dd: Dique diabásico de tono gris oscuro a verdoso, textura porfídica, estructura compacta, duro y denso, presenta hematización, cloritización y silicificación.	5,3	
				Tm-pa	Tm-pa: Dique pórfido andesítico de tonos violáceos, altera a un tono oscuro con fenocristales blanquecinos, textura porfídica, estructura tabular o en dique estrato.		
				<b>Secuencia Ignimbrítica del Nayar</b>			
				<b>Unidad Corapan</b>			
				Compuesta por una intercalación de paquetes de ignimbritas y tobas de composición riolítica.			
				Tm-ci(3,4)	Tm-ci(3,4): Ignimbrita de color gris, textura piroclástica, fuertemente soldada, estructura compacta y dura.		
				Tm-ci2	Tm-ci2: Ignimbrita de color gris claro a blanca, moderadamente soldada, textura piroclástica, compacta y con alteración argílica baja.		
Tm-ci1				Tm-ci1: Ignimbrita gris clara en su parte superior y vítrea rojiza en la inferior, textura piroclástica, fuertemente soldada, estructura compacta, dura, se caracteriza por tener pómez alargadas.			
PALEÓGENO	OLIGOCENO	MIOCENO	Tm-ct(1,2,3,4)	Tm-ct(1,2,3,4): Toba de tono rojo a ocre con pigmentos blancos (posibles plagioclasas), textura piroclástica, estructura en estratos medianos y porosos se caracteriza por ser una roca que altera fácilmente a un material arcillo-arenoso.			
			<b>Unidad Las Cruces</b>				
			Riolita fluidal e ignimbritas riolíticas y líticas, diferenciándose por su textura, color y contenido lítico.				
			Tm-ic2	Tm-ic2: Ignimbritas líticas de composición riolítica de tonos grises, rojizos y blanquecinos, de textura piroclástica, compacta, roca dura, con oquedades parcialmente rellenas de cristales de cuarzo. Localmente existe una variación de toba blanquecina alterada por argilización y silicificación.			
			Tm-ic1	Tm-ic1: Riolita fluidal de tono gris claro, textura afanítica, con minerales (cuarzo) alineados en la dirección del flujo. En ocasiones su base se compone de un vitrófido de color negro y rojizo.	23		
			Tom-ta	Tom-ta: Alternancia de tobas líticas y cenizas de composición riolítica de color pardo rojizo a verdosas, de textura piroclástica, de estructura estratiforme, en una mesostasis vítrea y desvitrificada.			
			To-ic	To-ic: Lutita carbonosa de color gris oscuro con bandas blancas (cuarzo y feldespato), de textura olástica, estructura en estratos delgados de grano muy fino.	33,9		

Figura 4.- Columna estratigráfica del área de estudio de la boquilla (imagen tomada del informe geológico de factibilidad del P.H. Las Cruces 2011).

La unidad Las Cruces, presenta dos miembros representados por la riolita fluidal y la ignimbrita riolítica y lítica. Por otro lado, la unidad Corapan se representa por una intercalación de ignimbritas y tobas. A esta intercalación de ignimbritas y tobas se le representa como la secuencia ignimbrítica del Nayar.





La Lutita Carbonosa (To-lc), se identificó por estudios petrográficos realizados a las muestras obtenidas por exploración directa (barrenación); se identificó como una roca de textura clástica y matriz de grano fino a medio, contiene minerales de cuarzo, feldespato, calcita y biotita.

Las tobas líticas y cenizas de composición riolítica (Tom-ta), se presentan como una alternancia de tobas líticas y cenizas de grano fino a medio de composición riolítica. Presentan una textura piroclástica de estructura compacta y mesostasis vítrea, con abundantes líticos de composición intermedia a félsica, así como, alteraciones de cloritización y hematización. Estos dos miembros de la columna estratigráfica no afloran en el sitio de la boquilla pero se determinaron mediante exploración directa (barrenación). Representan la base de la secuencia estratigráfica del sitio.

La Unidad Las Cruces, pertenece al Terciario Mioceno Temprano y está constituida por la riolita fluidal (Tm-ic1) y por ignimbritas riolíticas y líticas (Tm-ic2), diferenciándose por su textura, color y contenido lítico.

La riolita fluidal (Tm-ic1), se identificó a nivel de cauce principalmente y aguas abajo de la proyección de las obras, (fotografía 1). Superficialmente presenta alteraciones por meteorización como argilitización y silicificación, su textura es afanítica, presenta minerales como cuarzo, feldespatos, plagioclasas, escasos ferromagnesianos, vidrio y además fragmentos de toba.



Fotografía 1.- Afloramiento de la riolita fluidal (Tm-ic1), identificada agua abajo del eje Rancho Viejo.

Las Ignimbritas riolíticas y líticas (Tm-ic2) se muestra en la fotografía 2. Se presenta en ambas márgenes del sitio y en algunas zonas va desde el cauce hasta las partes medias de las laderas donde es cubierta parcialmente por depósitos no consolidados como talud, suelo residual y aluvión. Está compuesta por fragmentos de roca de composición intermedia a ácida, pómez y fiammes, fuertemente argilitizada y oxidada.



Fotografía 2.- Núcleo que muestra la Ignimbrita de la unidad Las Cruces (Tm-ic2), con oquedades rellenas de cristales de cuarzo, fiammes e indicios de corrientes de fluidez.



La unidad Corapan, se encuentra en toda el área de la boquilla, está constituida por la alternancia de cuatro horizontes de tobas de composición riolítica (Tm-ct1, Tm-ct2, Tm-ct3 y Tm-ct4) y cuatro paquetes de ignimbritas de la misma composición (Tm-ci1, Tm-ci2, Tm-ci3 y Tm-ci4), depositados de forma concordante sobre la unidad Las Cruces. A continuación se describen de manera general los miembros de esta unidad.

Las tobas de composición riolítica (Tm-ct1, Tm-ct2, Tm-ct3 y Tm-ct4) afloran de manera aislada en algunas partes del sitio de estudio sobre las dos márgenes acuñándose hacia ambos extremos. En la margen izquierda se encuentra en contacto con la parte superior de la unidad Las Cruces.

Estas tobas muestran escasa compacidad y textura piroclástica. Presentan minerales de cuarzo, feldespatos, plagioclasas, hematita, líticos andesíticos y riolíticos de ignimbritas de composición ácida.

Los miembros Tm-ct2 y Tm-ct3 se encuentran afectados por diques de composición andesítica de textura porfídica (Tm-pa), emplazados en forma de dique-estrato dentro del horizonte tobáceo. Se clasifican como una toba vitrolítica de composición riolítica fuertemente argilitizada y oxidada. La toba Tm-ct2 se muestra en los núcleos de la fotografía 3.



Fotografía 3.- Núcleos cortados de Tobos rojizos de la unidad Corapan (Tm-ci2) obtenidos por exploración directa de 102 a 106 m de profundidad.

Los miembros de esta unidad (Tm-ci1, Tm-ci2, Tm-ci3 y Tm-ci4), en general, presentan las siguientes características: son rocas ignimbríticas de color gris clara, fuertemente soldada, estructura masiva y compacta; su mineralogía consiste de feldespatos, plagioclasas, vidrio, hematita, biotita y líticos, en ocasiones subangulosos; los miembros Tm-ci1 y Tm-ci2 presentan una textura piroclástica, mientras que los miembros Tm-ci3 y Tm-ci4 son de textura eutaxítica con alteraciones hidrotermales y parcialmente oxidadas. El miembro Tm-ci2 (ver fotografía 4), se encuentra caolinitizado y argilitizado de poca compacidad y dureza al grado de ser muy blandas y en algunas ocasiones deleznable.

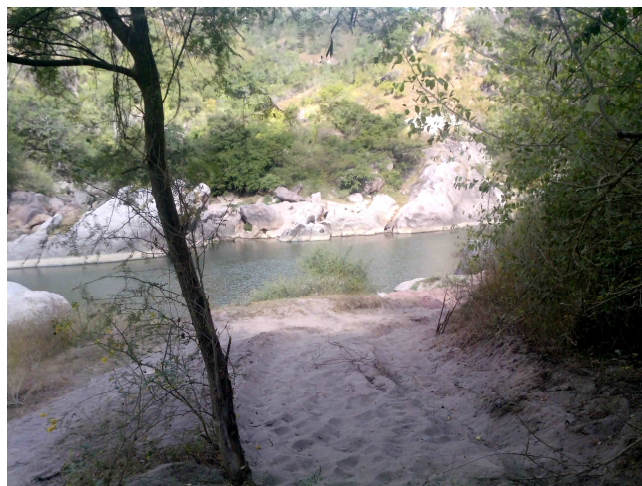


Fotografía 4.- Núcleos cortados de Ignimbritas de la unidad Corapan (Tm-ci2) de 32 a 36 m de profundidad.





De acuerdo a sus características y génesis los depósitos no consolidados se dividieron en tres tipos: Los depósitos de aluvión (Qal), que se muestran en la fotografía 5, son fragmentos de diferentes tipos de roca y de tamaños variables que van desde el limo y arena; el espesor puede ser de hasta 9 m, se presenta principalmente a nivel de cauce; los depósitos de suelo residual (Qsr), constituido por material mineral u orgánico del tamaño de las arcillas y limos, así como fragmentos de roca. Generalmente, se forman por la disgregación y desintegración de las tobas de la unidad Corapan. Se encuentran en las partes altas y planas con espesores pequeños; los depósitos de talud (Qdt), ubicados en los cambios de pendientes fuertes como cantiles, laderas y zonas cercanas al río, están constituidos por cantos, gravas y bloques de diferentes tamaños.



Fotografía 5.- Depósitos de aluvión en la margen izquierda

Los Cuerpos intrusivos que afectan a los miembros de las unidades Las Cruces y Corapan, son diques diabásicos y diques pórfido andesíticos. A continuación se describen de manera breve cada uno de ellos:

Los Diques diabásicos (Tm-dd), son cuerpos tabulares de composición andesítica a diabásica, que se emplazan sobre fallas y fracturas. Son de color gris oscuro a verdoso, con textura afanítica y porfídica (Fotografía 6).



Estos diques se presentan con fracturación intensa y presentan rasgos cinemáticos de desplazamiento.



Fotografía 6.- El núcleo muestra un dique diabásico de tono gris oscuro a verdoso observándose vetillas de calcita.

Emplazando estratigráficamente a las tobas vitrolíticas de los miembros Tm-ct2 y Tm-ct3, se presenta un dique Pórfido andesítico (Tm-pa), de color gris-verdoso a rojizo, de textura fanerítica a porfídica, de estructura compacta, masiva, muy densa, de alta resistencia. Presenta alteración supergénica (hematización), y alteraciones hidrotermales (propilitización y silicificación).

Estructuralmente el área de estudio está afectada por sistemas de fallas de tipo normal con orientación NW-SE, NE-SW.

El plano de la figura 5, muestra las estructuras más representativas del sitio, así como una visión sobre las que cruzan o afectarían directamente las obras civiles. Estas fallas, fracturas y contactos geológicos se presentan en ambos márgenes de la boquilla.





### ● **Falla Los Bueyes**

Esta falla se considera que puede afectar de manera directa las obras civiles. Su expresión superficial se denota por una depresión topográfica de gran extensión (fotografía 7). La apertura de esta falla en determinadas partes está relleno por fragmentos de diferente tamaño y en otras ocasiones se observa descubierto con superficies sin estrías ni material de falla, erosionado por el arroyo Los Bueyes que se desplaza en gran parte por esta falla. Sobre esta estructura se emplaza un dique diabásico, el cual se encuentra fragmentado y cloritizado con relleno de arcilla.



Fotografía 7.- Imagen aérea de la Falla Los Bueyes, en la margen izquierda de la boquilla.

### ● **Falla PHC-2**

La falla PHC-2, tiene una longitud aproximada de 550 m y una orientación general N35°W con echado de 75° SW. Esta falla se infiere que continúa por el cauce del río.

### ● **Falla El Cantil**

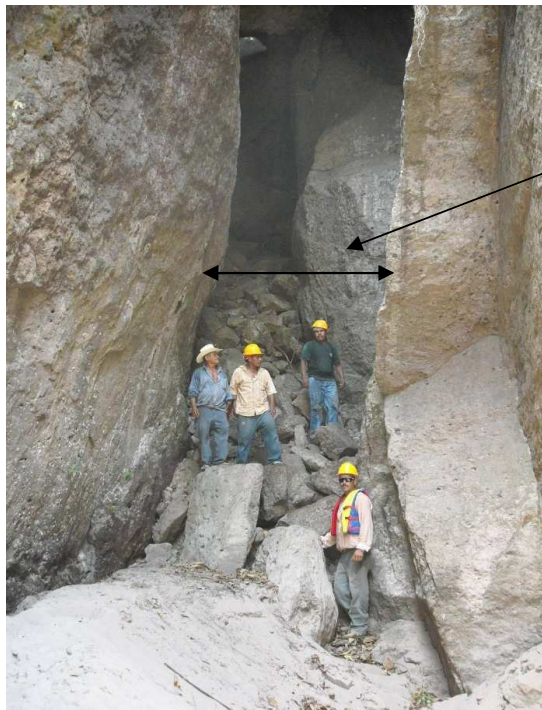
Esta cruza en forma diagonal al cauce río San Pedro, se presenta desde la zona acantilada interrumpiéndose con la Falla Los Bueyes por el extremo Este, se logró mapear una longitud aproximada de 800 m. Mediante exploración directa se detectó un cuerpo intrusivo diabásico (Tm-dd) con alteraciones hidrotermales.





### ● Falla Las Cruces

Esta falla se observa sobre ambos márgenes, a nivel del cauce se muestra con una abertura máxima de 4 m de ancho disminuyendo hacia el interior hasta aproximadamente unos 2 m, (fotografía 8). Se encuentra rellena por material areno-arcilloso y bloques de gran tamaño, se muestra una forma irregular, alabeada y en ella está emplazado un dique diabásico.



Abertura de la falla Las Cruces debido a la erosión del dique diabásico (Tm-dd)

Fotografía 8.- Abertura de la Falla Las Cruces a nivel del Río San Pedro.

### ● Falla Escarpe

La Falla el Escarpe, inicia en la margen derecha cerca del cauce del río San Pedro con un rumbo de N 10°-15° W y echado de 78° al NE, se infiere una longitud aproximada de 230 m. El plano de falla es roca a roca de la ignimbrita de la unidad las Cruces Tm-ic2.



### **3.- EXPLORACIÓN GEOFÍSICA POR EL MÉTODO DE "PETITE SISMIQUE" (MICROSÍSMICA)**

Existen diversos métodos o técnicas de exploración "in situ" para determinar la deformabilidad de los macizos rocosos. De acuerdo a la teoría de la elasticidad, el módulo de deformación se define como: "La relación que existe entre el esfuerzo aplicado y las deformaciones producidas a una unidad de roca".

El método de "Petite sismique" (llamado también microsísmica o tendido sísmico corto), permite estimar las características geomecánicas del macizo rocoso haciendo uso de determinados parámetros elásticos de las rocas. "Schneider en 1967 estableció correlaciones entre la frecuencia y el módulo de deformación estático "in situ" de macizos rocosos; así como entre la longitud de onda y la razón entre los módulos dinámico y estático" (Sanz S., 1985, p. 399).

Originalmente Schneider (1967), realizó varias pruebas para medir diversos parámetros de la onda S incluyendo la frecuencia, atenuación, la longitud de onda y la velocidad. Russell en estudios previos explicó la relación entre los módulos estáticos y dinámicos de deformación, así como con la longitud de la onda de corte, estos estudios sirvieron como apoyo a los estudios de Schneider.

El método "Petite Sismique", se considera una técnica de exploración rápida y adecuada para el estudio y caracterización de afloramientos y obras subterráneas. Constituye una herramienta confiable y de necesaria consideración en las campañas de reconocimiento "in situ".

Consiste en la obtención, identificación y análisis de las velocidades de las ondas sísmicas por medio de un tendido de refracción sísmica empleando un solo detector fijo y diversas fuentes móviles (PT).



La característica principal de esta técnica es la identificación y análisis que se realiza a las ondas S, el análisis se puede realizar en términos de la frecuencia, de la longitud de onda y del amortiguamiento del tren de onda (disminución de la amplitud en el tiempo). Por medio de este análisis se puede establecer algunas características físicas del macizo rocoso como: el grado de fracturamiento, compacidad, etc.

### **3.1- Principios físicos**

Los métodos de exploración sísmica, se basan en las propiedades físicas que tienen los materiales del subsuelo para permitir la transmisión de energía por medio de ondas (elásticas o acústicas). Estas ondas sísmicas, obedecen las leyes de refracción de Snell y se fundamentan en los principios de Fermat y Huygens.

Los métodos sísmicos de exploración, determinan en forma indirecta las variaciones de velocidad con que se transmiten las ondas sísmicas en los materiales del subsuelo, de tal manera que se permita correlacionar el parámetro físico como es la velocidad (ondas P o S) con las condiciones geotécnicas tales como alteración, fracturamiento y compacidad del macizo rocoso.

El comportamiento de las ondas sísmicas se estudia mediante la teoría de la elasticidad, esto es que, la velocidad de transmisión de las ondas depende de las constantes elásticas (módulo de Young, la relación de Poisson y el módulo de Rigidez) de los materiales en que se propagan.

La mecánica del medio continuo tiene una estrecha relación con la ley de Newton para determinar el comportamiento elástico de los materiales, es decir, describe el comportamiento de los módulos elásticos dinámicos mediante la ecuación de onda.



Si se nombra a **S** como el desplazamiento que sufre un elemento de volumen de su posición original, de tal manera que el vector de campo describa la deformación del medio, entonces y de acuerdo con la teoría de la elasticidad, la ecuación de onda se representa como:

$$\frac{\delta^2 S}{\delta x^2} = V_l^2 \nabla \cdot \nabla S - V_t^2 \nabla \times \nabla \times S \dots\dots\dots (1)$$

Donde  $V_l = V_p$  y  $V_t = V_s$ , representan físicamente las velocidades de las ondas longitudinales y transversales, y mantienen una estrecha relación con los parámetros elásticos del medio. Se definen mediante las siguientes expresiones:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \dots\dots\dots (2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \dots\dots\dots (3)$$

En donde:

$\rho$  = Densidad

$K$  = Módulo de Bulk o de incompresibilidad

$G$  = Módulo de corte

“Se observa que para medios elásticos continuos (isótropo y homogéneo) las velocidades de propagación de las ondas P y S dependen de los módulos elásticos dinámicos. Por consiguiente, si se conocen las velocidades de propagación de las ondas P y S se pueden determinar estos módulos” (Vásquez, 2001).



En la figura 6, se muestran algunas de las relaciones matemáticas que existen entre los módulos elásticos.

<b>Módulo de Young (MPa)</b>	<b>Módulo de Rigidez (MPa)</b>	<b>Relación de Poisson</b>	<b>Módulo de Bulk (MPa)</b>
$E = 2G(1 + \nu)$	$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$	$\nu = \frac{(3K - 2G)}{2(3K + G)}$	$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$
$E = \frac{9Gk}{(G + 3k)}$	$G = \frac{3EK}{(9K - E)}$	$\nu = \frac{(3K - E)}{6K}$	$K = \frac{EG}{3(3G - E)}$
$E = 3K(1 - 2\nu)$	$G = \frac{3K(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)}$	$\nu = \frac{(E - 2G)}{2G}$	$K = \frac{2G(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$

Figura 6.- Relación entre los módulos elásticos (Telford, 1990)

Las ecuaciones anteriores, determinan la relación entre la velocidad de propagación de las ondas en un medio y sus características elásticas dinámicas. Una propiedad importante para conocer el valor de estos módulos es la densidad del medio que se estudia

Esta propiedad del medio se puede obtener directamente en pruebas de laboratorio o indirectamente mediante registros geofísicos de pozos, como por ejemplo el registro de rayos gamma, de densidad, entre otros.

En geotecnia, los valores de deformación y características elásticas (módulo de Young, módulo de rigidez, etc.) no son valores constantes, sino que éstos dependen principalmente de tres factores:



1. Módulo tangente o módulo secante, está directamente relacionado con la definición del módulo dentro de la curva de Histéresis (esfuerzo-deformación).
2. Tiempo de carga.
3. Nivel de deformación, se produce en el material en el momento de la medición.

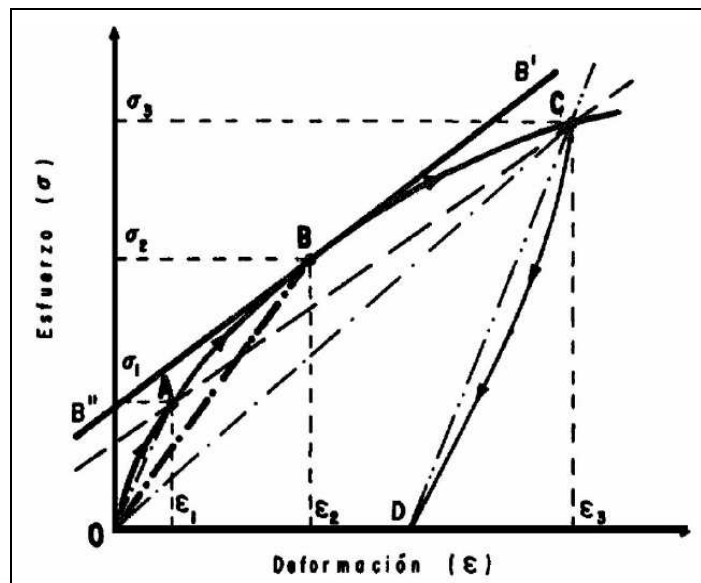


Figura 7.- Curva de Histéresis

La figura 7, muestra dos ramas de la curva de Histéresis donde se define la pendiente del módulo tangente y el módulo secante, partir de las rectas B''B B' y OB, respectivamente.

Estos factores determinan el cálculo de los módulos de deformación estáticos y son contraposición a los dinámicos que son obtenidos a partir de las velocidades sísmicas. La relación entre los valores de los módulos estáticos y dinámicos resultan ser de gran importancia en el diseño de obras de ingeniería, puesto que el comportamiento elástico de estas es diferente bajo la carga prolongada de su propio peso, que ante una carga rápida provocada por un sismo.



Una característica importante de los módulos dinámicos con respecto a los módulos estáticos es que varían en cuanto a su valor, esto dependiendo en gran medida del tipo de roca, grado de saturación, compacidad, etc. Regularmente el valor de los módulos dinámicos es mayor con respecto a los estáticos.

Lo anterior se debe a las diferentes condiciones en que se llevan a cabo las pruebas para la obtención de su valor. Los ensayos empleados para calcular el valor de los módulos estáticos de deformación pueden durar días e incluso semanas y se realizan en pruebas de laboratorio, donde la roca es sometida a presiones variables; en cambio en las pruebas dinámicas "in situ" la excitación de la roca es de unos milisegundos y la carga es prácticamente nula.

Como se mencionó al inicio del capítulo, Schneider (1967) estableció las correlaciones experimentales que existen entre el módulo de deformación y la frecuencia de la onda, así como la relación exponencial del cociente de los módulos dinámico y estático ( $E_d/E_s$ ) con respecto a la longitud de la onda de corte. Lo mencionado se representa en las figuras 8 y 9.

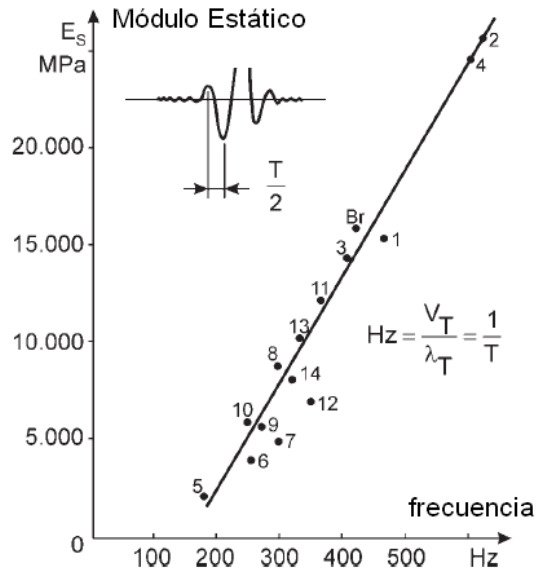


Figura 8.- Relación lineal entre el módulo de deformación estático vs frecuencia de las ondas transversales (Marsal y Reséndiz, 1979)

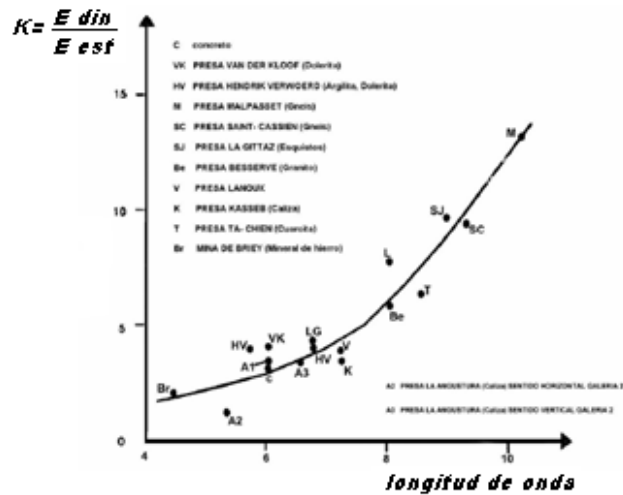


Figura 9.- Cociente del módulo dinámico entre el estático vs longitud de onda transversal (Marsal y Reséndiz, 1979)





De acuerdo a Schneider (1967), la frecuencia de las ondas S pueden ser obtenidas de la traza de la señal empleando los diferentes tiempos de las amplitudes de la señal, esto de acuerdo al conocimiento de que las ondas P viajan dos terceras partes más rápido que las ondas S.

La velocidad de las ondas S, es mayor con respecto a las ondas superficiales, sin embargo, se pueden identificar debido a que presentan una menor amplitud. La figura 10, muestra el procedimiento para identificar la onda S, así como obtener el valor de la frecuencia.

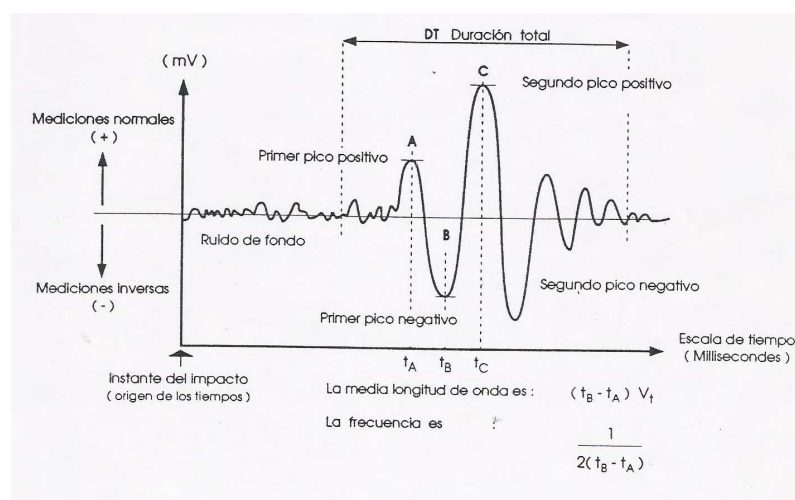


Figura 10.- Detección de onda S, de acuerdo a Schneider (1967).

La relación lineal entre el módulo estático de deformación y la frecuencia de la onda S obtenida de pruebas experimentales y relaciones empíricas, para rocas compactas de poca fracturación y frecuencias mayores a los 200 Hz se observa en la figura 11. Recientemente Bieniawski (1978), incluye algunos datos que muestran un comportamiento similar a la correlación antes mencionada.

De acuerdo a datos de Monjoie y Schroeder (1978), cuando se presentan frecuencias por debajo de los 200 Hz, se presenta una pequeña incurvación asintótica sobre el eje de la frecuencia, lo que es representativo de macizos rocosos de menor calidad.

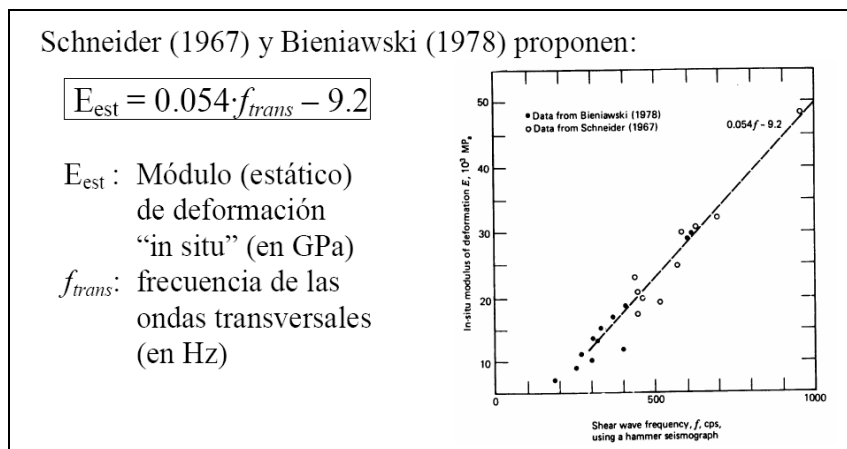


Figura 11.- Correlación experimental entre el módulo Estático de deformación vs frecuencia de Schneider (1967) y Bieniawski (1978).

Otro parámetro importante que se puede obtener del registro del método del tendido sísmico corto, es el denominado tiempo total de amortiguamiento. Este se define como el tiempo medido en el sismograma desde el inicio de la vibración (arriba de la onda P), hasta un décimo de la amplitud máxima del movimiento de la onda S.

Físicamente este valor se relaciona con la calidad de la roca, es decir, los materiales de mayor rigidez producen vibraciones más duraderas que los materiales que presentan mayor fracturamiento y discontinuidades. A mayor tiempo de amortiguamiento el material sobre el que se propaga la onda sísmica es de mayor rigidez, lo cual es importante para el diseño de las obras en estudios geotécnicos.



### 3.2- Metodología y volumen de obra

La metodología empleada para la obtención de los datos de campo mediante el método de "Petite Sismique" ó "tendido sísmico corto", consiste en un tendido modificado empleando los principios de la refracción sísmica convencional; la diferencia radica en emplear un solo sismodetector (geófono), el cual permanece fijo y bien sujeto a la roca y se establecen distancias equidistantes para ubicar los diferentes puntos de tiro (PT) móviles (ver figura 12).

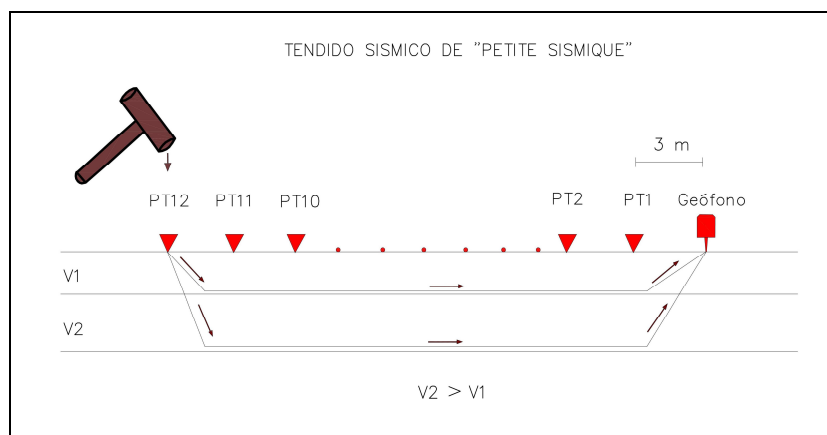


Figura 12.- Arreglo de puntos de tiro utilizado en el estudio.

La adquisición de los datos de campo se realiza de la siguiente manera: Una vez instalado y conectado todo el equipo, se fija un geófono en la pared del socavón y se generan las ondas sísmicas en los lugares definidos denominados puntos de tiro (PT) a cada 2 y 3 m a lo largo del socavón, después de realizar las conexiones correspondientes y verificar el correcto funcionamiento del equipo se procede a la adquisición de la información de campo a modo de obtener una buena señal de registro.

La energía, se genera mediante el impacto de un cuerpo pesado, que en este caso fue un marro de 12 libras de peso sobre otro colocado en la superficie de la pared del socavón, los cuales están conectados mediante un dispositivo



apropiado para lograr la sincronía necesaria entre el inicio de la perturbación de la señal y el inicio de la grabación en el sismógrafo para generar la primera traza.

Una vez obtenida la primera traza, se desplaza la fuente al siguiente punto y se activa el siguiente canal hasta completar el registro o sismograma de 12 trazas; posteriormente se fijó el mismo geófono en el otro extremo del tendido, y se realiza la misma operación en sentido inverso, generando de este modo los dos registros de ida y vuelta que se requieren para el procesamiento y análisis de la información.

Se utilizó un cable sísmico con espaciamiento máximo de 5 m entre cada canal de registro para la conexión del geófono a los 12 canales considerados para generar el sismograma. El geófono empleado fue de componente vertical de 28 Hz de frecuencia, como fuente de poder para el sismógrafo, se utilizó una batería de 12 volts.



(a)



(b)



(c)

Fotografía 9.- (a) y (b), Colocación del geófono; (c), generación de la energía en la pared izquierda del socavón 2.



De esta forma para cubrir uniformemente la longitud total de la línea de estudio, cada tendido cubrió una distancia de 26 o 39 m de longitud. De acuerdo a la distancia entre puntos de tiro que se haya considerado. Cabe mencionar que la separación entre puntos de tiro fue de 2 y 3 m.

El volumen de obra consistió de 10 tendidos sísmicos, a lo largo de las paredes de la tabla izquierda del socavón 2. Se cubrieron 321 m de longitud distribuidos de la siguiente manera: 3 en la entrada del socavón y 7 en el socavón principal (perpendicular al río), en la tabla 1 siguiente se hace una síntesis:

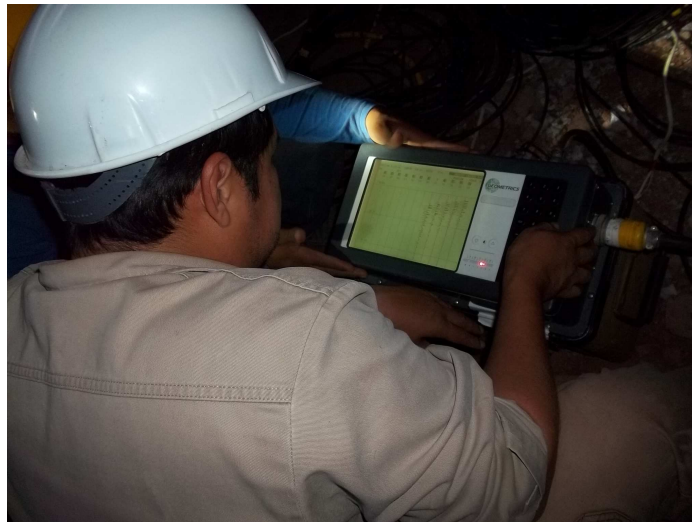
Tendido Sísmico	Ubicación	Tabla	Cadenamiento
1	Socavón principal	Izquierda	0+153 a 0+192
2	Socavón principal	Izquierda	0+129 a 0+155
3	Socavón principal	Izquierda	0+103 a 0+129
4	Socavón principal	Izquierda	0+064 a 0+103
5	Socavón principal	Izquierda	0+038 a 0+064
6	Socavón principal	Izquierda	0-001 a 0+038
7	Socavón principal	Izquierda	0+001 a 0+040
8	Entrada del Socavón	Izquierda	0+057 a 0+096
9	Entrada del Socavón	Izquierda	0+018 a 0+057
10	Entrada del Socavón	Izquierda	0+006.5 a 0+026

Tabla 1.- Volumen de trabajo realizado en el Socavón 2.



### 3.3- Equipo de medición

El equipo utilizado fue un sismógrafo Smartseis de 12 canales marca Geometrics, el cual está diseñado para visualizar en pantalla la información registrada y poder analizar en forma inmediata el tiempo de arribo de las ondas longitudinales o primarias, entre otras funciones cuenta con: una salida para impresión de sismogramas que registra los datos en tiempo del arribo de la señal, tipo de filtro a emplear y ajuste manual de ganancias para visualizar con claridad los registros para una mejor identificación de los arribos de la señal.



Fotografía 10.- Obtención y generación del sismograma por "Petite Sismique".





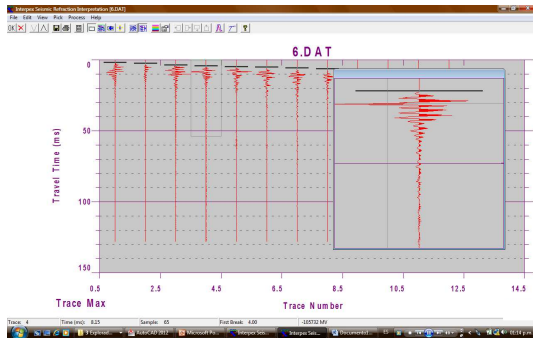
### 3.4- Procesamiento e Interpretación

Una vez obtenidos los sismogramas de los datos en campo, el procesamiento de la información comienza con la lectura e identificación de los tiempos de arribo de las ondas longitudinales (P), así como de las ondas transversales (S), cabe mencionar que la identificación de la onda S es un poco más compleja, debido a diversos factores como pueden ser ruido ambiental e interferencias de maquinaria en funcionamiento de cada uno de los sismogramas generados, (figura 13).

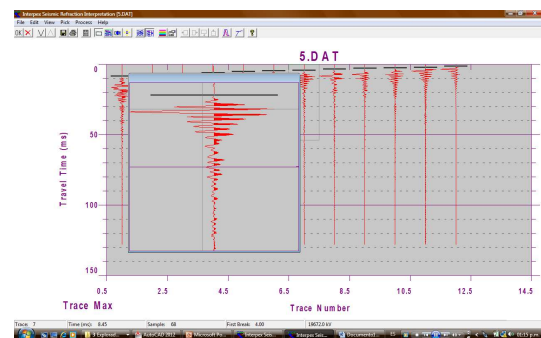
El procesamiento y la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P y S se realizaron empleando el software IXRefrax, que es un paquete para el procesamiento de datos de Refracción Sísmica enfocado a la Interpretación automática, semi-automática y completamente manual usando el método recíproco generalizado (GRM). Este método permite el análisis de las curvas dromocrónicas para el cálculo de velocidades, espesores, forma de los contactos y cambios laterales en la velocidad dentro de los horizontes (capas) refractores (figura 9 (c)). El método GRM, fue desarrollado por Palmer (1980).

Se toma como referencia la ubicación del geófono y los puntos de tiro equidistantes, para de este modo elaborar la gráfica tiempo-distancia (dromocrónicas), donde el eje de las ordenadas corresponde a los tiempos de arribo de las ondas longitudinales y transversales expresadas en milisegundos y el eje de las abscisas corresponde a la separación entre el geófono y la fuente móvil.

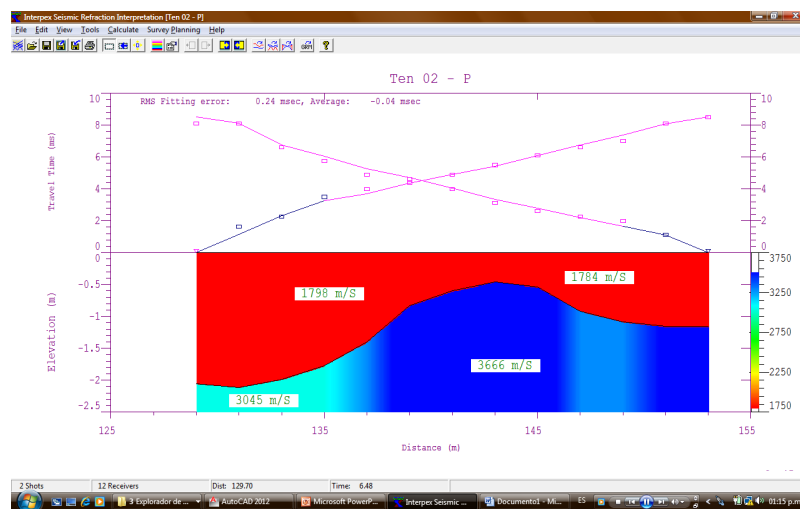
Para la identificación de la onda S, se determina el valor de la frecuencia empleando la longitud media de onda como se muestra en la figura 10.



(a)



(b)



(c)

Figura 13.- (a) y (b) Identificación de los primeros arribos de onda P; (c) Generación de la dromocrónica y del modelo de velocidad para la onda P.

Una vez identificados los arribos se genera y analiza la dromocrónica correspondiente y se procede al cálculo de las velocidades de onda longitudinal ( $V_p$ ) y transversal ( $V_s$ ). Empleando el valor de la densidad del medio ( $\rho=2.22$  gr/cm<sup>3</sup>) y con las expresiones 4, 5 y 6, se calcula el valor de los módulos dinámicos como son: la relación de Poisson ( $\nu$ ), el módulo de Corte ( $G_D$ ) y módulo de Young ( $E_D$ ):



$$V_D = \frac{0.5(Vp^2 - Vs^2)}{Vp^2 - Vs^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$G_D = \rho Vs^2 \dots\dots\dots (5)$$

$$E_D = 2(1 + V_D)\rho Vs^2 \dots\dots\dots (6)$$

Donde  $\rho$  es la densidad.

Posteriormente se elaboraron histogramas para determinar la distribución de frecuencias de la onda transversal ( $f_s$ ) para todos y cada uno de los sismogramas (véase anexo 1). De este modo se determina el valor máximo más representativo de la frecuencia.

El siguiente paso es determinar el módulo estático de deformación ( $E_s$ ) como una función de la frecuencia ( $f_s$ ) por medio de la correlación experimental de Schneider siguiente:

$$E_s = 0.054 f_s^{-9.2} \dots\dots\dots (7)$$

Finalmente, se obtuvo el valor de los tiempos totales (amortiguamiento de la onda) en todos los sismogramas y se gráficaron para obtener el valor correspondiente para una distancia de 15 m (véase anexo 2).

El valor del tiempo total ( $T_t$ ), se emplea como un índice de la calidad de roca. La tabla del anexo 3, proporciona una visión para distintos valores obtenidos de estudios en diversos tipos de materiales en diversas presas donde se aplicó la técnica del "Petite Sismique".



La interpretación se realizó a través del análisis de las gráficas y los cálculos ya mencionados en donde se analizaron los contrastes de velocidad sísmica aparentes obtenidos de las dromocrónicas, posteriormente se realiza el proceso de inversión empleando el algoritmo del método recíproco generalizado (GRM) para obtener las velocidades reales y los espesores de cada una de las capas detectadas para formar un modelo sísmico de velocidades.

De acuerdo a las observaciones realizadas en la entrada del socavón se observa roca fracturada originada de las detonaciones producidas y extracción del material, geológicamente el fracturamiento también se asocia al paso de la falla el Escarpe y a estructuras secundarias; sin embargo, del cadenamiento 0+000 al 0+060 se determinaron espesores de roca descomprimida de 0.5 a 1.8 m con velocidades de onda compresional de 1090 a 1850 m/s, la roca de mejor calidad en esta parte del socavón presenta velocidades de 3200 a 3500 m/s.

Del cadenamiento 0+060 y hasta el entronque con el socavón principal aumentaron las velocidades de la roca descomprimida hasta 2300 m/s y se obtuvo un espesor máximo de 1.9 m; sin embargo, las velocidades de la roca sana resultaron ser menores con respecto al valor de la entrada del socavón con un valor de 2950 m/s. Este valor se asocia a una roca medianamente fracturada influenciada por una estructura geológica denominada falla 82, ubicada a la altura del cadenamiento 0+080 de la sección de entrada.

En el socavón principal que va del cauce y hasta el cruce con la sección de entrada, se levantó el tendido 7, el cual arroja espesores máximos de roca descomprimida de 2.0 m con velocidades de 2100 m/s y la roca sana, se definió con velocidades de onda longitudinal de 3100 a 3150 m/s.



En el socavón principal donde se levantaron los tendidos sísmicos 1 y 6 (cadenamientos: 0+153 a 0+192 y 0+000 a 0+038), se detectaron velocidades de 2100 m/s, lo que se infiere como roca fracturada, mientras que para el macizo rocoso se obtuvieron velocidades de 3400 a 3500 m/s que demuestran la buena calidad de la roca.

Para los tendidos 2, 3, 4 y 5, se presenta una disminución en los valores de velocidad, tanto para la primera capa como para la roca "in situ", las velocidades para la primera capa de roca descomprimida van de 1250 a 1700 m/s, presentando un pequeño incremento de 2000 m/s (del cadenamiento 0+096 a 0+116), lo que demuestra, que en esta zona la roca se presenta fracturada y alterada, ocasionado por las fallas Cascabel, Escorpión y la falla Las Cruces, además de pequeñas fallas secundarias (fallas 56, 64, 78, 88, 89, 97, 112, 120, 127 y 134) identificadas mediante la información geológica levantada, ver figura 14.

La velocidad de macizo afectado por estas estructuras disminuye en cierto grado hasta velocidades que van de los 2450 a los 3100 m/s, considerándose como roca poco alterada y fracturada. Los espesores de la primera capa de roca alterada alcanzan hasta los 4 m de espesor a la altura de la zona afectada por alteración.

La figura 14, muestra los resultados obtenidos del estudio por "Petite Sismique" integrada con información geológica recabada del sitio.





INFORME DEL ESTUDIO GEOFÍSICO DE "PETITE SISMIQUE" (MICROSÍSMICA) EN EL SOCAVÓN 2 DEL P.H. LAS CRUCES, EN EL ESTADO DE NAYARIT

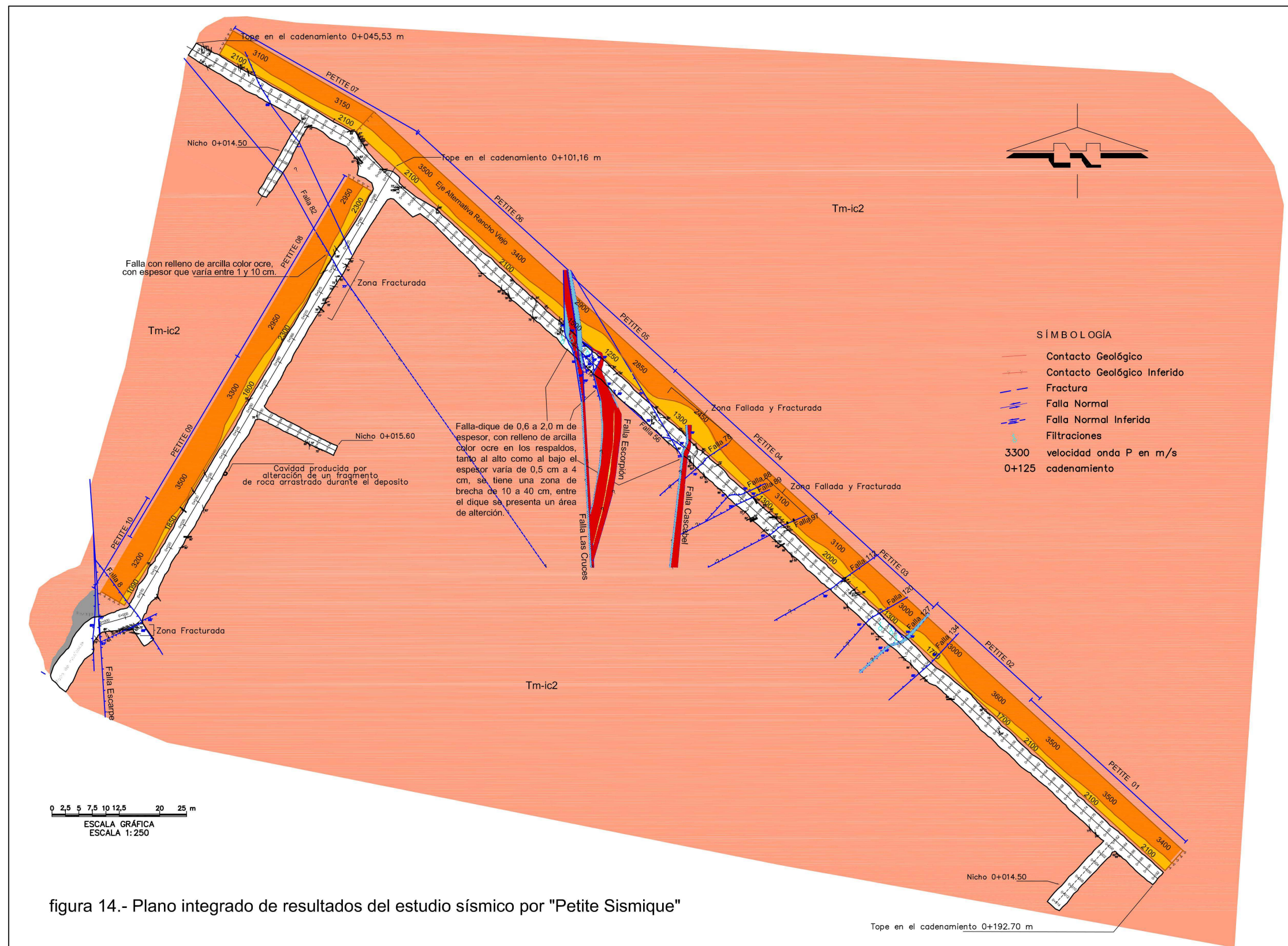


figura 14.- Plano integrado de resultados del estudio sísmico por "Petite Sismique"



---

---

#### 4.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

La tabla 2, muestra los resultados obtenidos y el valor de los módulos elásticos dinámicos calculados a partir del valor de las velocidades de las ondas P, S y densidad. Así como del módulo estático de deformación ( $E_s$ ) y el tiempo total ( $T_t$ ).

La frecuencia más representativa de la onda transversal determinada para el socavón fue de 500 Hz. Así como el valor determinado del módulo estático calculado a partir de este valor y empleando la relación de Schneider (1967) y Bieniawski (1978), fue de 17800 MPa.

El valor del tiempo total para el socavón 2 va de 33.42 a 48.33 ms, que de acuerdo con la tabla de Schneider, los sitios de presas con estos valores corresponden a una roca de regular a buena calidad.





Tabla 2: Análisis de resultados del estudio por "Petite Sismique" en el socavón 2 del P.H. Las Cruces.

Tendido Sísmico	Ubicación	Cadenamiento (m)	Velocidad "Vp" [m/s]	Velocidad "Vs" [m/s]	Relación de Poisson "ν"	Módulo de rigidez "G" [Mpa]	Módulo de Young "E" [Mpa]	Densidad "ρ" [gr/cm <sup>3</sup> ]	frecuencia de onda "S" [Hz]	Módulo estático "Es" [Mpa]	Tiempo total "Tt"[ms]	
1	SOCAVÓN PRINCIPAL	0+153 a 0+192	2100	1090	0.32	2634	6931	2.22	600	23200	33.67	
			3500	2000	0.26	8880	22335	2.22				
2		0+129 a 0+155	1700	800	0.36	1419	3853	2.22	500	17800	48.23	
			3400	1650	0.35	6044	16270	2.22				
3		0+103 a 0+129	1400	780	0.27	1349	3439	2.22	400	12400	47.32	
			3100	1800	0.25	7193	17920	2.22				
4		Zona de Falla (0+064 a 0+076)	0+064 a 0+103	1300	750	0.25	1247	3119	2.22	500	17800	38.00
				3100	1600	0.32	5683	14986	2.22			
			1300	750	0.25	1249	3123	2.22				
			2450	1300	0.30	3752	9785	2.22				
5	0+038 a 0+064	1350	880	0.13	1717	3882	2.22	400	12400	45.50		
		2850	1450	0.33	4668	12372	2.22					
6	0-001 a 0+038	2100	1150	0.29	2932	7540	2.22	500	17800	33.42		
		3470	1800	0.32	7193	18930	2.22					
7	0+001 a 0+040	2100	1300	0.19	3747	8912	2.22	600	23200	44.99		
		3140	1900	0.21	8014	19413	2.22					
8	ENTRADA DEL SOCAVÓN	0+057 a 0+096	2300	1150	0.33	2932	7819	2.22	600	23200	38.08	
			2950	1700	0.25	6416	16057	2.22				
9		0+018 a 0+057	1850	1000	0.29	2217	5736	2.22	500	17800	37.01	
			3500	2000	0.26	8880	22335	2.22				
10		0+006.5 a 0+026	1090	670	0.20	995	2381	2.22	500	17800	45.00	
			3250	1750	0.30	6799	17620	2.22				



---

## 5.- CONCLUSIONES

- En la figura 14, se muestra la información geológica integrada junto con el modelo de velocidades de ondas P determinado a partir del procesamiento de la información de todos y cada uno de los tendidos sísmicos. La distribución de velocidades y espesores de la roca descomprimida se presenta a continuación.
- En el socavón se determinó que la roca fresca presenta una capa descomprimida con un espesor promedio de 1.5 m definida con velocidades de onda compresional que varían de 1090 a 2300 m/s; sin embargo estos espesores aumentan hasta con 4m en las zonas de falla, específicamente entre los cadenamientos 0+036 al 0+082.
- Para la roca fresca no descomprimida, se determinaron velocidades de onda longitudinal (P) que varían de 3000 a 3500 m/s, mientras que para la onda transversal (S) van de 1600 a 2000 m/s; sin embargo, estas velocidades disminuyen entre los cadenamientos 0+036 al 0+082, arrojando valores para la onda longitudinal (P) de 2450 a 2850 m/s y para la onda transversal (S) de 1300 a 1450 m/s, valores que se asocian a la influencia de las fallas-dique que se observan en campo.
- Los módulos dinámicos más representativos en el área del socavón donde se alcanzan las velocidades de onda P máximas son: módulo de rigidez presenta un valor de 6683 MPa y el módulo de Young alcanza un valor promedio de 17093 MPa. El módulo de Poisson presenta un valor promedio de 0.28; estos valores determinan que el macizo rocoso presenta buenas condiciones elásticas y se muestra como una roca de regular a buena calidad.



- El valor promedio del módulo estático en función de la frecuencia de la onda S, determinada a partir de la relación lineal de Schneider es de 16672 MPa.
  
- El valor más representativo de la frecuencia de la onda transversal es de 500 Hz, valor que geológicamente considera a las ignimbritas con un fracturamiento de bajo a moderado.
  
- De acuerdo a los valores de tiempo total y frecuencias obtenidas en el macizo rocoso, se considera que es de regular a buena calidad.
  
- De los valores determinados de la velocidad de onda longitudinal y del módulo de Young en la roca del socavón de esta área de la margen izquierda del río San Pedro, indican que las ignimbritas de la unidad las Cruces (Tm-ic2) de acuerdo a la clasificación de Schneider es de regular a buena calidad.
  
- El método empleado en este estudio proporciona índices del comportamiento y características geomecánicas útiles para deducir un valor aproximado del módulo de deformabilidad de la ignimbrita Tm-ic2.



---

---

## REFERENCIAS

- ◆ Belesky R.M., Bienawsky, Z.T. and Greenfield R.J., (1981), "**Leatest Research Findings from Petite Sismique trials, acoustic emission microseismic activity in geology**", Proc. Of the third conf. trans tech. Publications Pennsylvania state university laboratory of rocks.
  
- ◆ Bieniawski, Z.T., (1978), "**Determining Rock Mass deformability: Experience from case histories**", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 15, No 5, pp. 237-247.
  
- ◆ CFE, (2011), "**Informe de avance en la etapa de factibilidad geológica de la alternativa Las Cruces**", México. Agosto.
  
- ◆ CFE, (2003), "**Levantamiento geológico de un socavón exploratorio**"; Guía de procedimientos, departamento de Geología, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil; Guadalajara.
  
- ◆ CFE, (1996), "**Informe de Prefactibilidad Geológica del PH Pozolillo, Nayarit, México**", Subdirección Técnica, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil; Guadalajara.
  
- ◆ Comisión Nacional del Agua, (1993), "**Exploración Geosísmica, Manual de Diseño de Agua Potable y Alcantarillado**", México. Editorial Ingeniería Técnica y Estudios, SA de CV, Libro V, Diciembre.
  
- ◆ Chávez, Aguirre, José María, (2006), "**Geotecnia**", México Comisión Federal de Electricidad, p. 31 – 71.



- 
- ♦ Contreras López Enrique, (1995), **“Correlaciones empíricas entre las constantes elásticas dinámicas y las velocidades de las ondas P y S de las rocas”**, Boletín de la IIEE, Septiembre/Octubre.
  
  - ♦ Heuze, F. E. (1981), **“Geomechanics of the climax “mine-by”, Nevada Test Site, 22nd U.S.”**, Symposium on Rock Mechanics, held at Mit, Boston, June 28 July-July 2, pp. 428-434.
  
  - ♦ J. Marsal Raul, Resendiz Nuñez Daniel, (1979), et al. **“Presas de tierra y enrocamiento”**, Editorial Limusa México. Primera reimpresión, 1979.
  
  - ♦ J.J. Zucca, (1984), **“Petite Sismique Measurements at the Spent Fuel Test-Climax”**, University of California, September.
  
  - ♦ Palmer D., (1980), **“The generalized Reciprocal method of Seismic Refraction Interpretation”**; Society of Exploration Geophysics.
  
  - ♦ Sanz Saracho M., Sola Casado P., (1985), **“Los nuevos métodos sísmicos y las digrafías de sondeos mecánicos en el proyecto y construcción de Presas”**, Revista de obras públicas, Mayo-Junio, pág. 397 a 412.
  
  - ♦ **“Scarabe, investigations method for the rapid assessment of rockmass quality”**, Bureau d'ingenieurs conselt, Paris, France.
  
  - ♦ Sheriff, R., Geldart, L, et al., **“Exploración Sismológica”**. México, Editorial Limusa, Volumen 1, 309 p.
  
  - ♦ Schneider, B. (1967), **“Moyens nouveaux de reconnaissance des massifs rocheux”**. Annales de l'I.T.B.T.P., Paris.



- ◆ Vásquez, A., (2001), “**Introducción a la Geomecánica Petrolera**”, V.V.A. Consultores, C.A., 5a Edición, Caracas.
  
- ◆ Telford, W.M., Sheriff, R.E., (1990), “**Applied Geophysics**”, 2nd edition, Cambridge University Press.



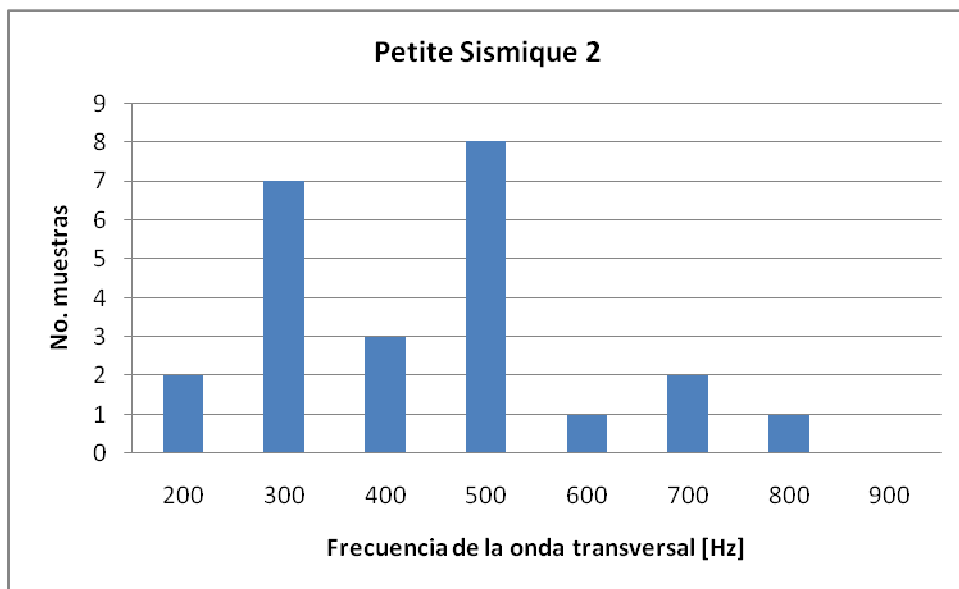
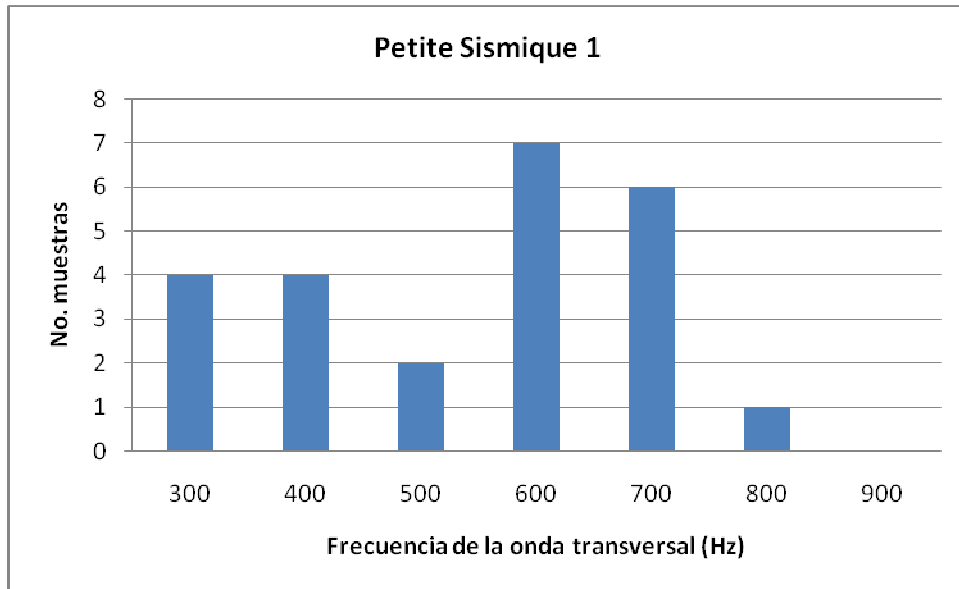
## ANEXOS

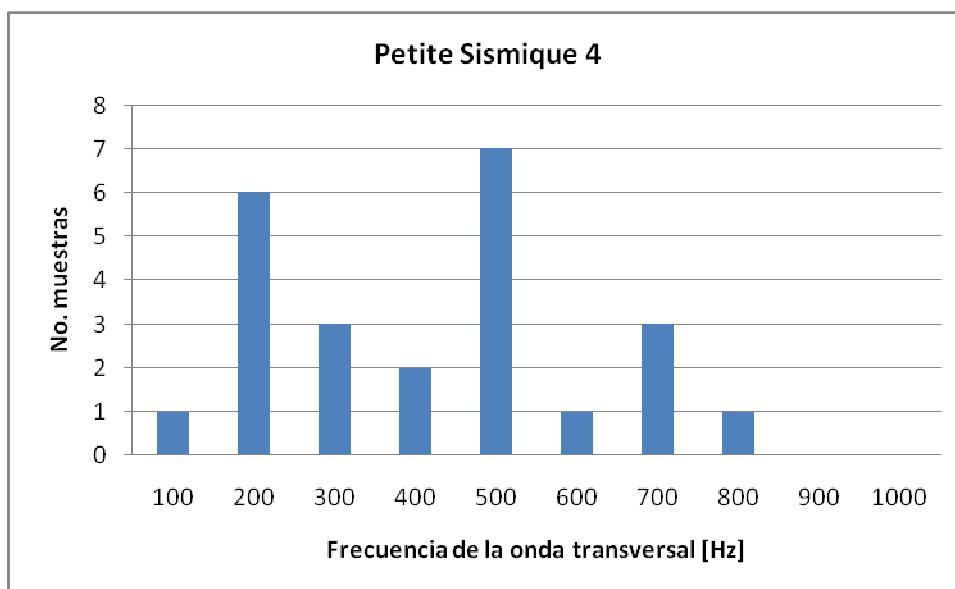
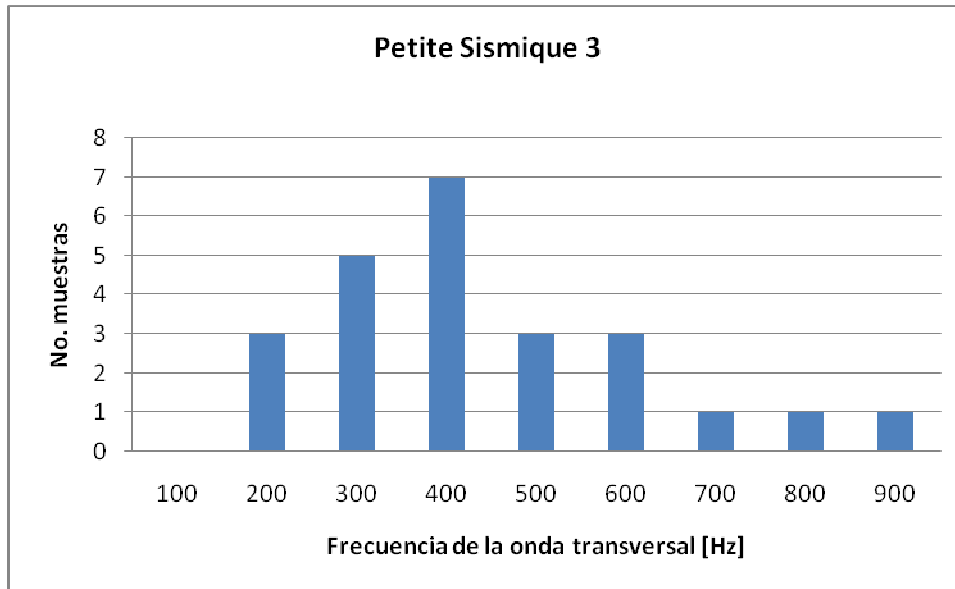
---

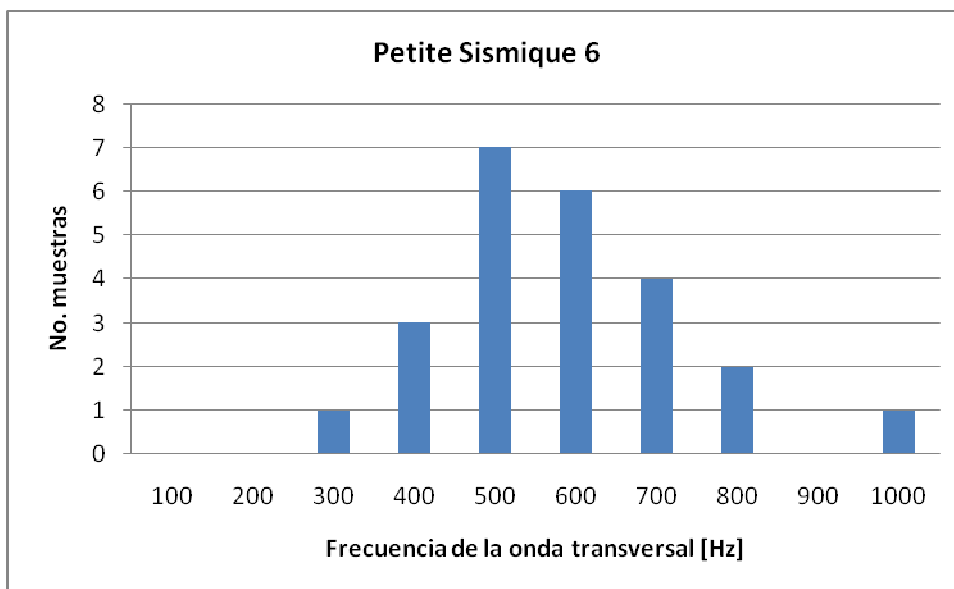
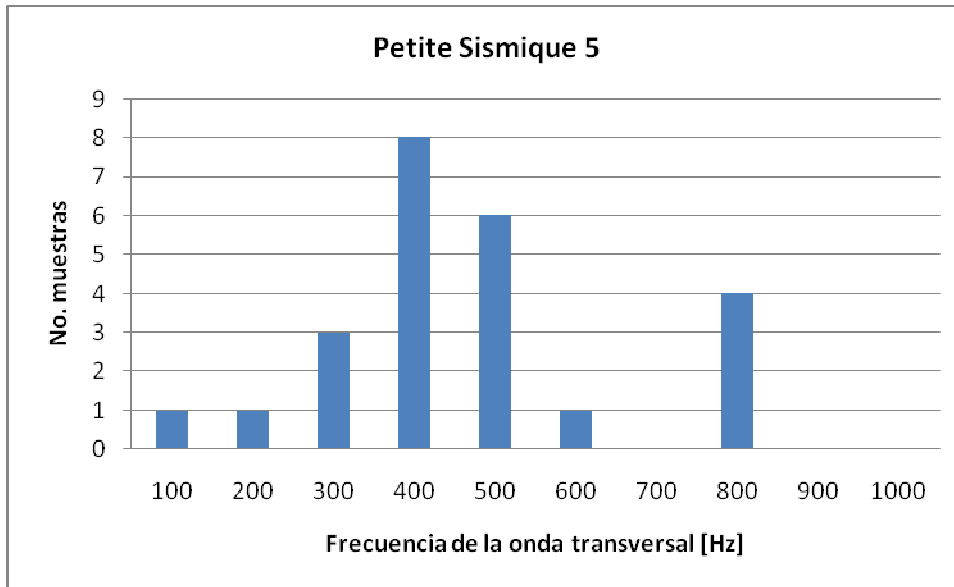


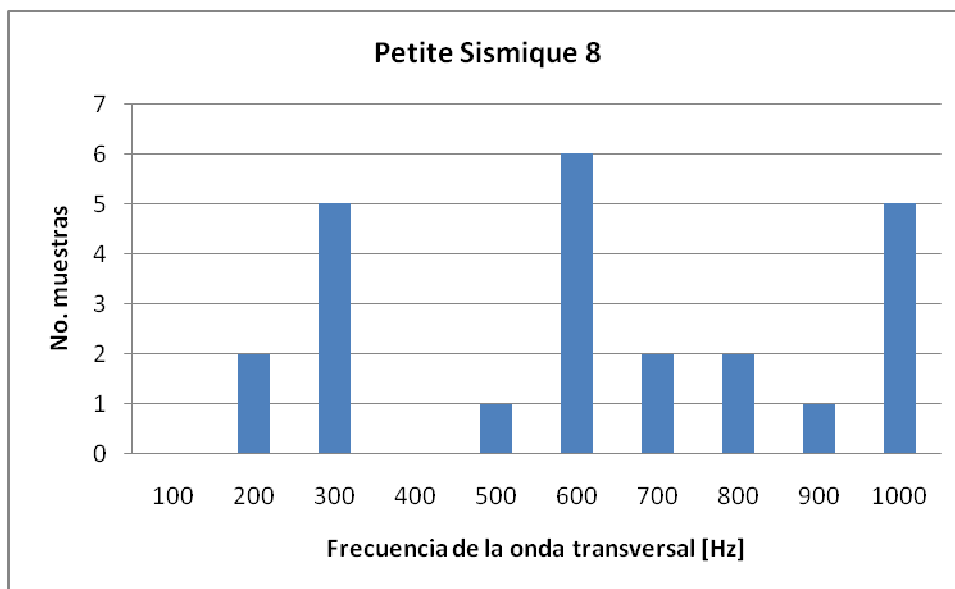
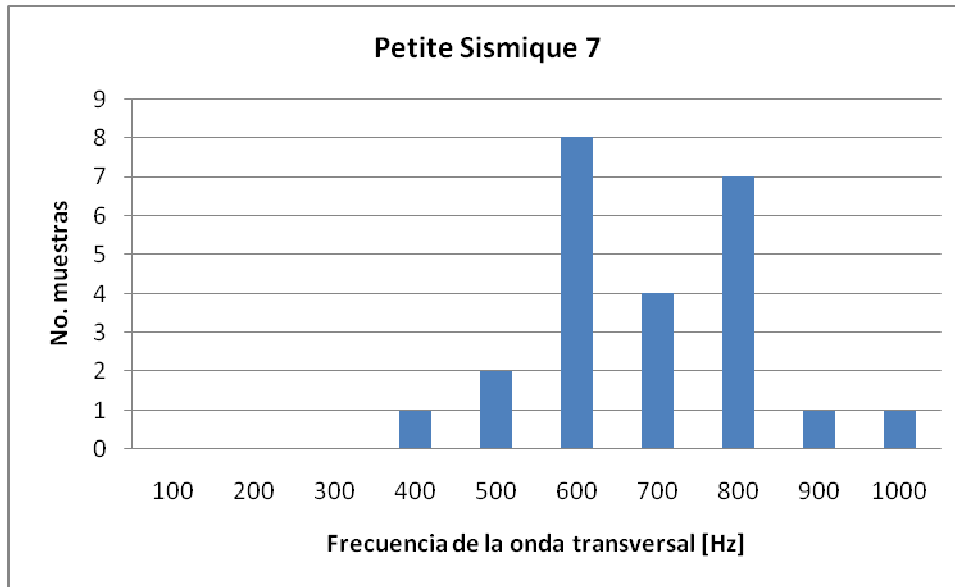


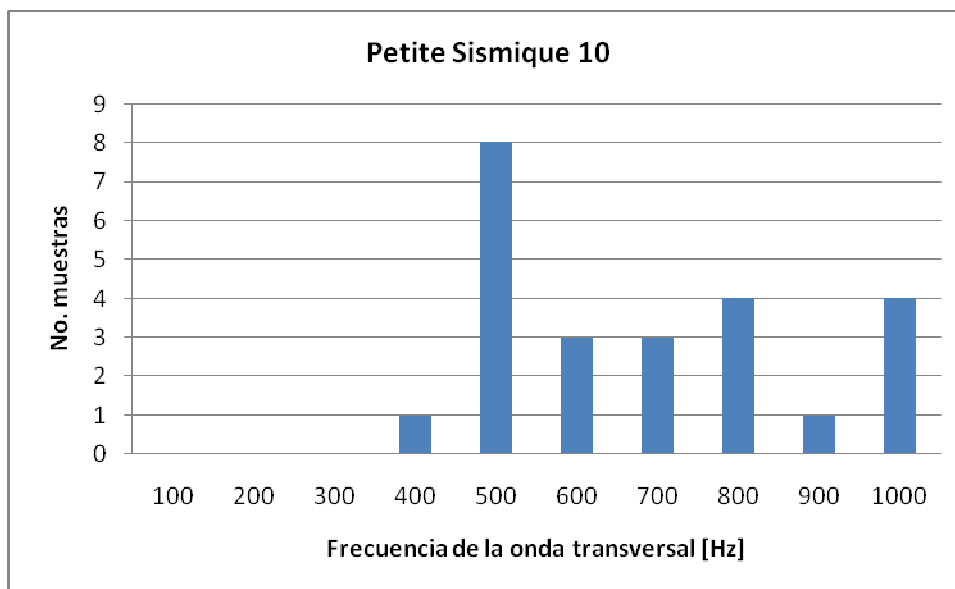
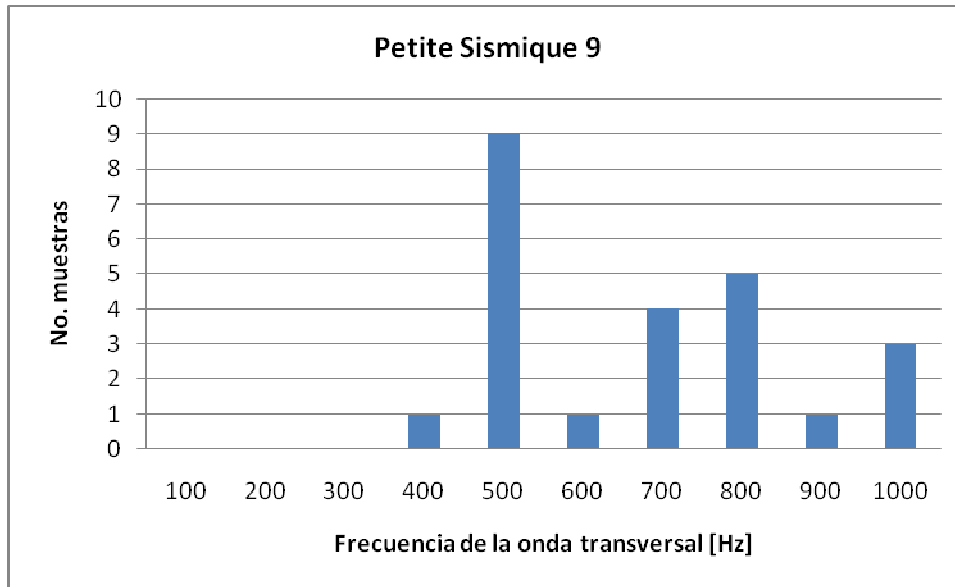
### Anexo A.- Histogramas de frecuencias de Ondas S





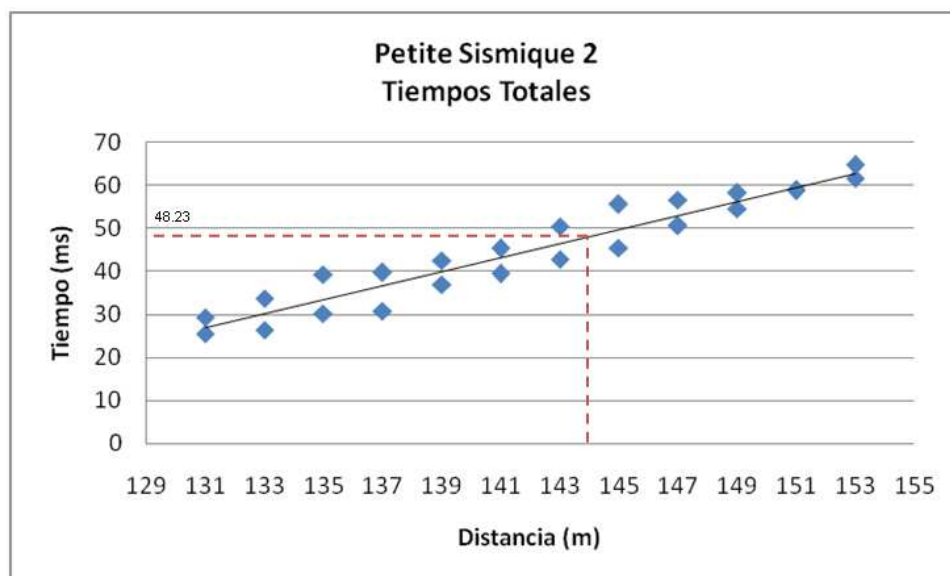
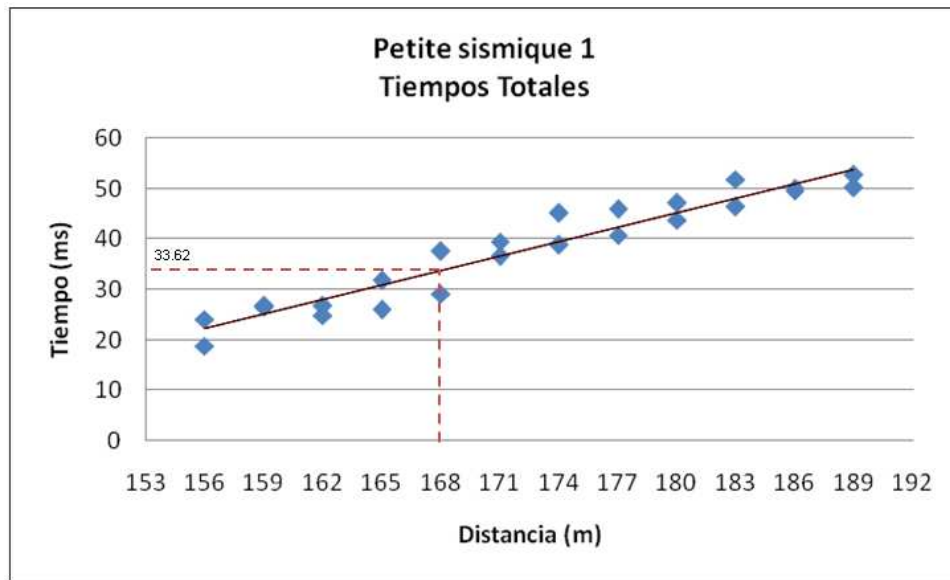


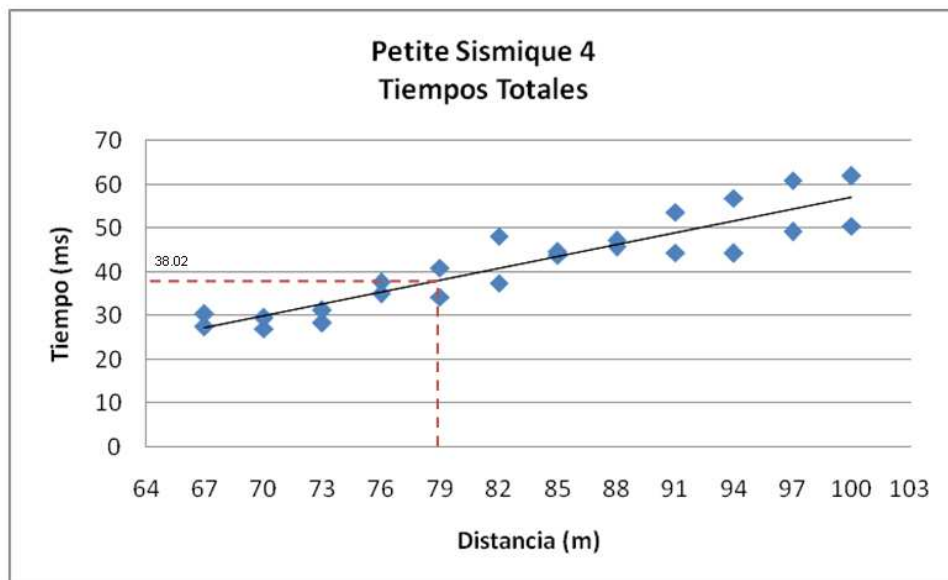
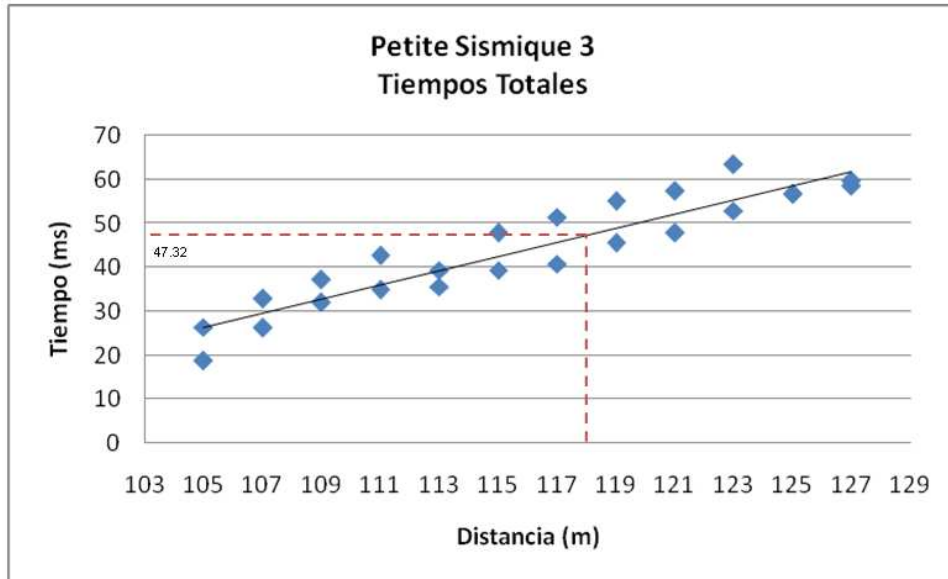




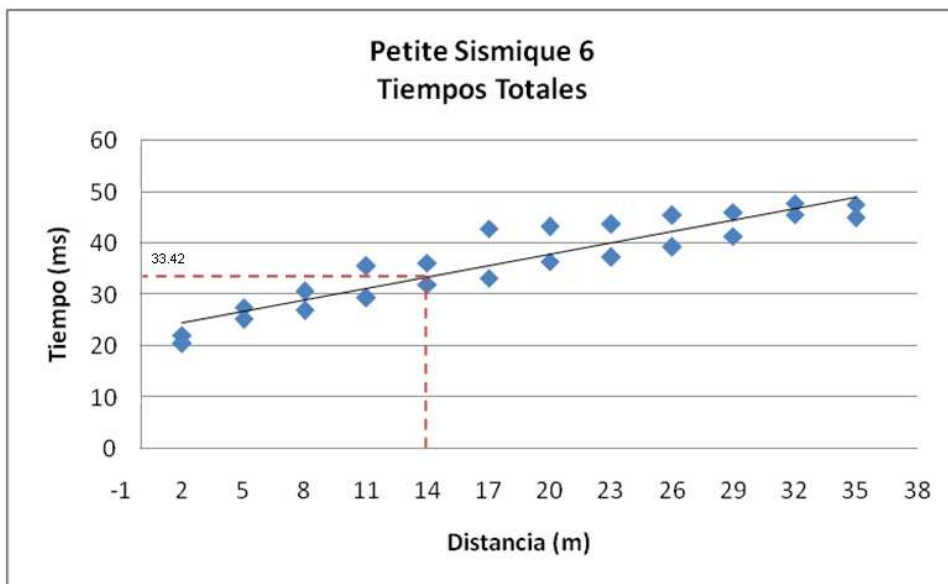
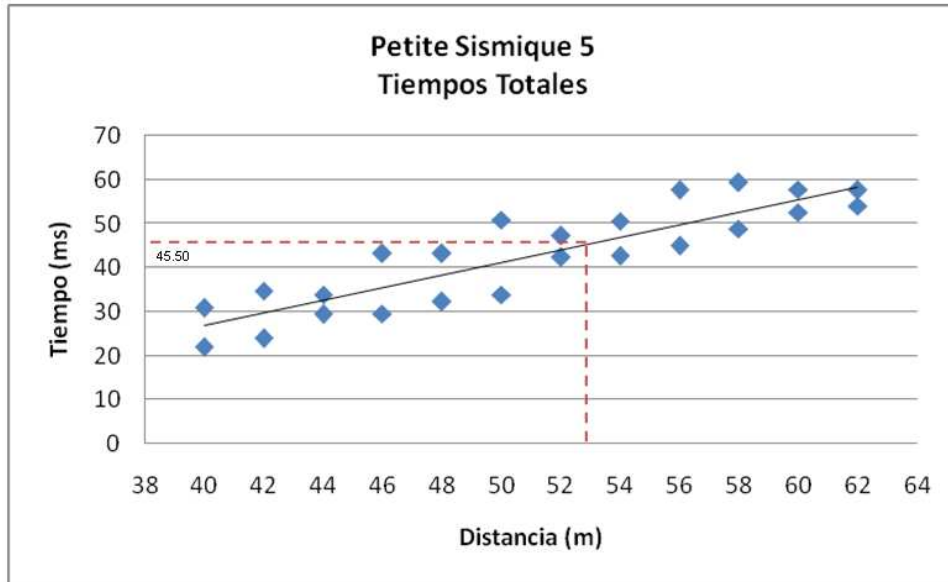


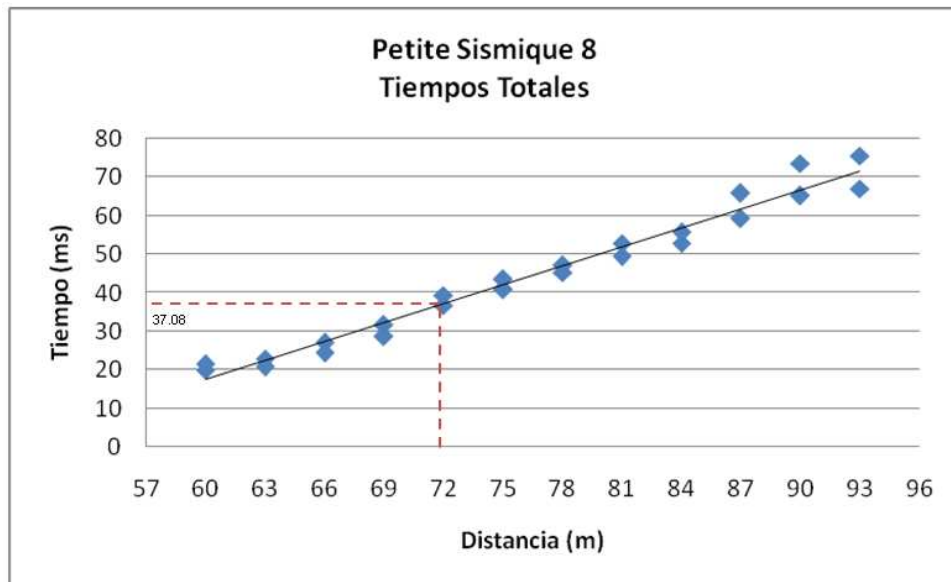
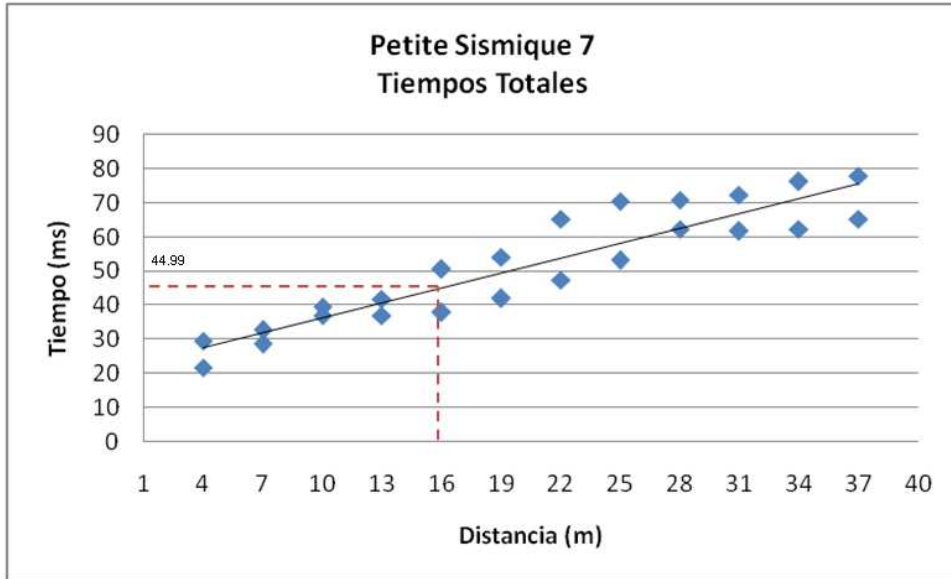
### Anexo B.- Gráficas de tiempos totales

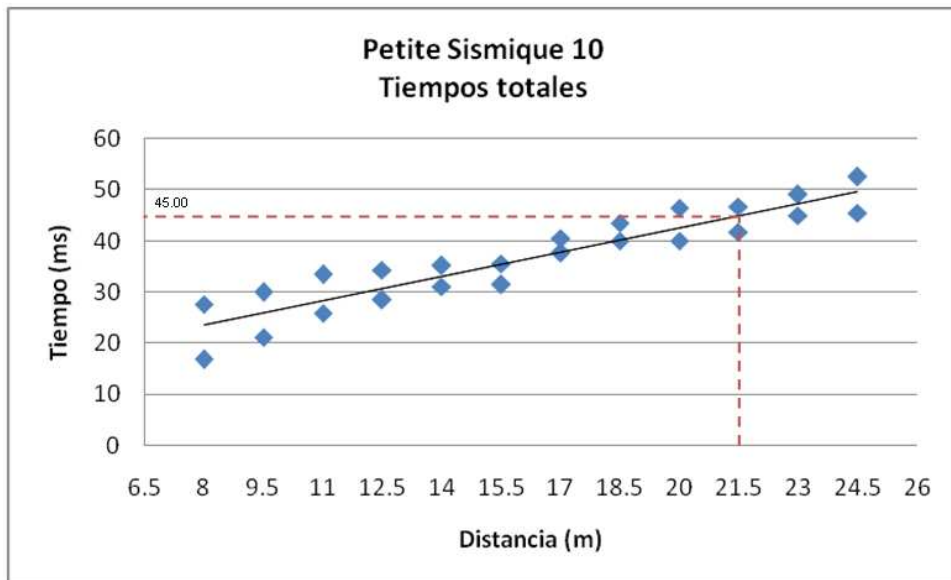
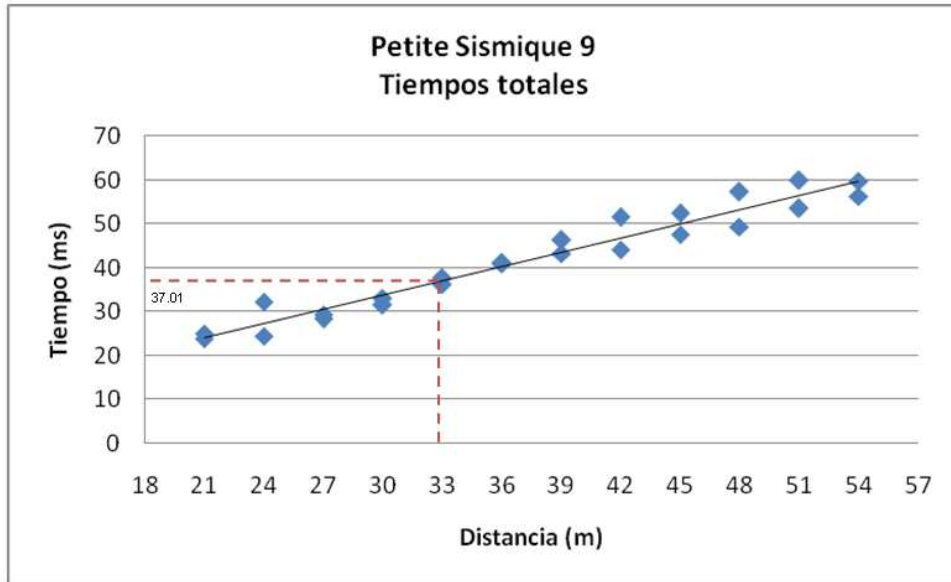














### Anexo C.- Duración total en diversos sitios de presas (Schneider, B.)

No.	Sitio	Material	No. de tendidos (perfiles)	Duración total (ms)
1	Zimapán	Caliza masiva dolomitizada	16	19
2	Katse	Basalto	13	32
3	Sir	Concreto	2	40
4	Berke	Caliza masiva	16	52
5	Sir	Concreto Rodillado	2	58
6	Gomal	Caliza fracturada e inyectada	4	70
7	Lijaxia	Esquisto y magmatita compactos	24	76
8	Long tan	Cuarcita – Limolita	10	78
9	La Borie	Granito – gneis	8	127
10	Aoulouz	Dolomita Kárstica fracturada	24	169
11	Caramany	Gneis alterado	6	180

Modificación tabla inédita de B.Schneider