

## Capítulo VI

### Análisis de la información obtenida

#### 6.1 Mapa geológico

La geología del área es muy diversa, caracterizada por rocas volcánicas e intrusivos de ambiente oceánico pertenecientes al Complejo de Nicoya. A estos materiales volcánicos están asociadas rocas sedimentarias depositadas en un ambiente marino profundo (pelágico) que transicionan a depósitos continentales (relleno aluvial). También se le asocian productos volcánicos piroclásticos de ambiente continental (Formaciones Bagaces y Liberia) (fig. 2.1).

La edad de toda esta amplia variedad geológica parece indicar que varía desde el Jurásico (Calloviano, unos 169 m.a.: En Tournon & Alvarado, 1995 y 1997) para el Complejo de Nicoya, hasta el Cuaternario (período actual) para los rellenos aluviales.

Diversos autores han trabajado en la diferenciación, origen y edad de las rocas que afloran en esta área, sin embargo la información geológica del área de estudio se obtuvo principalmente con los estudios geológicos realizados por Denyer y Arias (1992 y 1993) en la parte noroeste del área de estudio a escala 1/50000, y del estudio de la "Estructura Geológica Cuaternaria del Norte y Centro de la Península de Nicoya" realizado por Denyer, Arias y Hernández (1993). De este último trabajo se pudo obtener el límite entre la roca y el aluvión a escala 1/50000, muy importante para los propósitos del trabajo en lo que respecta al aluvión considerado como suelo blando. El resto de la geología se obtuvo de los Mapas Geológicos de las Hojas Nicoya y Liberia a escala 1/200000, y las tesis de grado de Arias (1998) y Funaioli & Rossi (1991).

Los rellenos aluviales (de amarillo en el Mapa de Tipos de Suelos. fig. 6.1) son de mucha importancia para el objetivo del trabajo, representa todo el material de las diferentes unidades geológicas que han sido erosionados y depositado en las depresiones.

La delimitación de estos rellenos aluviales y la roca (isopaca cero) tiene un grado de confiabilidad mayor, ya que se obtuvo a partir de los mapas de isopacas a escala 1/50000 (Denyer, Arias & Hernández, 1993) citado anteriormente. Esto tiene mucha importancia para los propósitos del trabajo. A continuación se resume las variaciones del espesor de la capa de aluvión en cada una de las Hojas Cartográficas estudiadas a escala 1/ 50000 en dicho trabajo:

- Carrillo Norte: se encuentran espesores de hasta 80 metros en la parte central. Cerca de la costa no sobrepasan los 20 metros (Coco y Panamá)
- Matapalo y Punta Gorda: los depósitos de aluvión son relativamente bajos, no sobrepasan los 30 metros, y siendo generalmente no mayores a los 20 metros
- Belén: se localiza el aluvión en la parte oriental de la Hoja, a lo largo del río Tempisque. Se alcanzan espesores de hasta 60 metros. Al sureste los aluviones no sobrepasan los 30 metros de espesor.
- Tempisque: en la parte occidental, y alcanzan espesores de hasta 70 metros

- Diríá: se encuentran cercanos a la población de Santa Cruz, alcanzando espesores entre 30 - 50 metros. Al sureste, 1 km de Santa Cruz están los mayores espesores con 60 metros
- Villarreal: en el río Andamojo se tienen los mayores espesores, con un promedio de 20 metros
- Talolinga: cubre extensas áreas , pero con espesores generalmente muy pequeños, alrededor de los 10 metros. En zonas aisladas hay espesores de 20 metros. En la población de San Atonio los espesores son de 10 - 20 metros. Un kilómetro al norte se han obtenido rellenos fluviolacustres mayores a los 30 metros.

Los mayores espesores de aluvión alcanzan los 80 metros, asociados a los viejos cauces del Río Tempisque.

## 6.2 Mapa Tipos de suelos

Las formaciones superficiales son unidades diferenciales de materiales con naturaleza física diferente, se exponen en superficie y llegan a alcanzar espesores importantes. Constituyendo la base de apoyo de las obras civiles, por lo cual el conocimiento de su naturaleza, características y fenómenos a que están sometidos son básicos en la planeación de las obras civiles (Hermelin, 1992).

De acuerdo con lo anterior es de mucha importancia tener presente el grado de meteorización de cada unidad geológica, que van a originar suelos con características físicas y mecánicas diferentes.

En los estudios de microzonificación sísmica se deben considerar las siguientes características de los suelos (Ramírez, 1995)

- Espesores de los estratos
- Propiedades físico-mecánicas de los suelos
- Velocidades sísmicas del subsuelo

Según los criterios de la ATC (Applied Technology Council, 1995), utilizados en códigos sísmicos mundiales, los que se derivan de la experiencia de terremotos como México (1985), Armenia (1988) y otros, los suelos se clasifican en cuatro grupos :

- S<sub>1</sub>: Roca
- S<sub>2</sub>: Suelo Firme
- S<sub>3</sub>: Suelo Blando
- S<sub>4</sub>: Suelo Muy Blando

Para este estudio se definieron de manera general e interpretativa cuatro tipos de suelos, basándose principalmente en el tipo de roca madre presente de acuerdo con el Mapa Geológico (criterios litológicos), y los valores de velocidad de onda cortante ( $V_s$ ) y resistividad, registrados en informes técnicos del SENARA para esta área (fig. 6.2).

Con lo anterior y según los criterios de la FEMA (Federal Emergency Management Agency, 1994), los suelos del área estudiada se clasifican en B, C, D y E (fig. 6.1).

**Tipo B (roca):** corresponde con las rocas meteorizadas del Complejo de Nicoya: basaltos, intrusivos (gabros, dioritas, plagiogranitos) y radiolaritas.

Según los datos reportados en informes técnicos, las velocidades de onda cortante en el basamento oscilan entre los 1500 - 2800 m/s. Tomando en cuenta el grado de meteorización del basamento, en superficie éstos se interpretan que tienen velocidades mayores a los 760 m/s para una clasificación Tipo B según la FEMA (1994). De acuerdo con la ATC (1995), clasifica como tipo  $S_1$ : Roca.

Los valores de resistividad varían entre los 50 - 250 ohmio-metro dependiendo del grado de fracturación, presencia de agua y sales minerales en la matriz, y el grado de meteorización de la roca.

**Tipo C (suelo muy denso y roca blanda):** corresponde con los suelos originados de las rocas sedimentarias aflorantes en el área: calcilitas y radiolaritas de origen pelágico, calizas, lutitas calcáreas y silíceas, areniscas, calizas arrecifales y tobas. También se incluyen en esta clasificación los suelos originados por las rocas piroclásticas de las Formaciones Bagaces y Liberia: tobas, ignimbritas y sedimentos lacustres. No se reportan espesores de suelo.

Los valores en las velocidades de onda cortante se infieren que son superiores a los 360 m/s, por lo que se le clasifica como Tipo C, según la FEMA (1994), y como  $S_2$ : Suelo Firme, según la ATC (1995).

Los valores de resistividad por lo general son mayores a los 40 ohmio-metro para rocas meteorizadas.

**Tipo D (suelo blando):** corresponde con los suelos sedimentarios o transportados formados en el área de relleno aluvial (de color amarillo en el mapa de tipos de suelo, fig. 6.1).

Los espesores de suelo en éstos depósitos de relleno varían entre los 0.5 metros hasta los 20 metros como promedio. Por lo general se mencionan espesores de tres metros (Anexo 1), aunque a veces se reportan espesores de hasta 40 metros, según los datos de pozos del SENARA.

Los valores de velocidad de onda cortante registrados en las capas de aluvión o suelo blando, oscilan entre los 100 - 400 m/s, de lo cual se infiere que los suelos originados pueden tener

valores inferiores a los 360 m/s. clasificando como Tipo D según la FEMA (1994) y como S<sub>3</sub>: Suelo Blando según la ATC (1995).

Los valores de resistividad varían entre los 5 - 40 ohmio-metro, dependiendo de las proporciones de grava-arena-limo-arcilla de los depósitos inconsolidados, del grado de saturación y las sales minerales en la matriz.

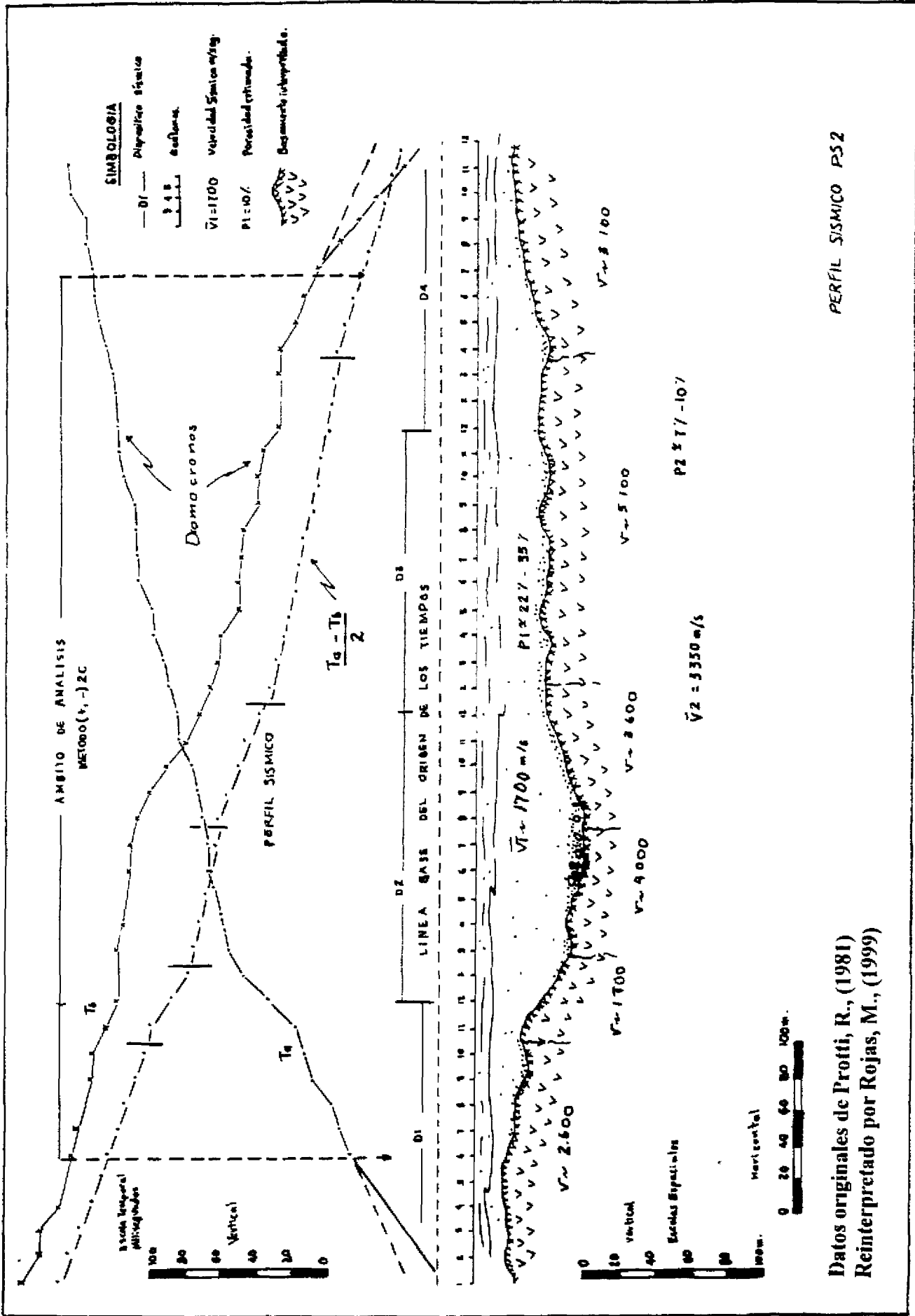
**Tipo E (suelo con  $V_s < 180$  m/s):** en esta clasificación entran los manglares (Qa) o llanuras de inundación, también puede corresponder con suelos muy sueltos ya sean suelos transportados o por meteorización, cuya clasificación según la ATC (1995) es como S<sub>4</sub>: Suelo Muy Blando.

Es importante mencionar que la clasificación anterior que se muestra en la fig. 6.1 se hizo correlacionando criterios litológicos y de propiedades físicas (velocidad de onda cortante, resistividad eléctrica), que en algunos casos se infieren o son generalizados debido a la escala de trabajo. A esto se suma el hecho de que no se hizo geofísica de campo (p.ej pruebas de refracción sísmica y resistividad) y pruebas de laboratorio.

### 6.3 Mapa Geológico y Sondeos Geofísicos

En el Mapa Geológico y Sondeos Geofísicos (fig. 6.2) se muestra la información de prospección geofísica que se obtuvo a partir de informes técnicos del SENARA. En total suman 28 perfiles de resistividad eléctrica y 9 perfiles de refracción sísmica. El propósito de la geofísica de campo es determinar espesores y características de los rellenos aluviales respecto a la roca de fondo, para aplicaciones hidrogeológicas. Por lo anterior se puede observar en este mapa, que dichos perfiles se ubican en las áreas de relleno aluvial clasificado como Tipo D (fig. 6.1) y Qal en el Mapa Geológico y Sondeos Geofísicos (fig. 6.2). Los parámetros físicos reportados de éstos sondeos geofísicos se utilizaron para obtener los rangos de velocidad de onda cortante tanto en la capa de aluvión como en la roca o basamento (fig. 6.3). Así mismo se obtuvieron los valores de resistividad (fig. 6.4). Ambos parámetros se utilizaron como complemento para definir los parámetros geotécnicos del suelo blando y el mapa de tipos de suelo.

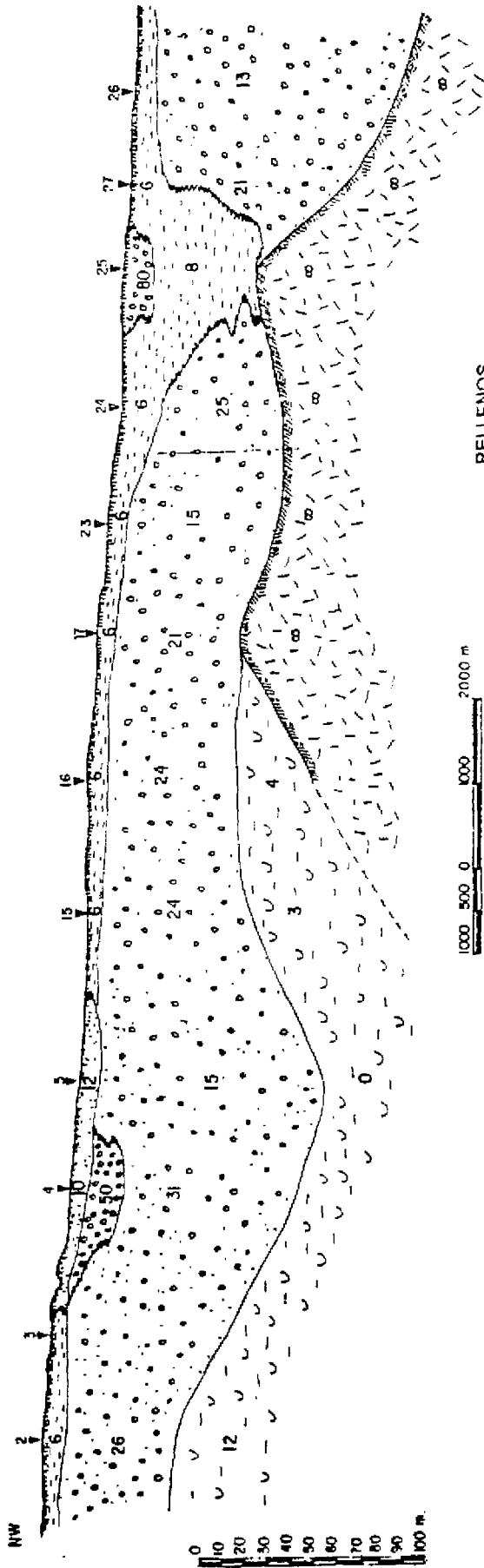
En el Mapa Tipos de Suelos (fig. 6.1) se muestran los 17 pozos seleccionados en el área de estudio. El detalle de la geología de cada pozo y las características de cada perfil de suelo se muestran en el Anexo 2. La información litológica obtenida de éstos pozos con sus respectivos registros de resistividad eléctrica se utilizaron para correlacionar y definir los espesores de aluvión y de suelo. También se les utilizó como base para el análisis de amplificación sísmica en el programa SHAKE.



Datos originales de Protti, R., (1981)  
Reinterpretado por Rojas, M., (1999)

Figura 6.3: PERFIL SISMICO GENERALIZADO

SE



RELLENOS

- 5-10 Ω.m ARCILLA
- 10-20 Ω.m ARCILLA LIMOSA
- 20-30 Ω.m ARENA LIMOSA-ARCILLA
- 30-40 Ω.m ARENA-LIMOS
- 40-60 Ω.m ARENAS GRAVA

**LEYENDA**

- ACUIFERO PRINCIPAL
- ARCILLA
- ARENA ARCILLOSA
- ARENA - GRAVA
- TOBA O SEDIMENTARIO ARCILLOSO
- BASAMENTO CRETACEO

**SIMBOLOGIA**

- SUPERFICIE DEL TERRENO
- SEV
- RESISTIVIDAD Ω - m
- BASAMENTO

PERFIL PE.3  
PERFILES DE CORTES GEOELECTRICOS

INTERPRETADOS

MARGEN DERECHA DEL RIO TEMPISQUE

Modificado de Protti, R., (1981)

Figura 6.4: PERFIL GEOELECTRICO GENERALIZADO

#### 6.4 Determinación de los parámetros geofísicos del suelo y roca a utilizar en el análisis

Se consideraron tres aspectos fundamentales para obtener los parámetros físicos de los perfiles de suelo y roca:

1. El tipo de litología presente (espesor y profundidad)
2. Consideraciones sobre los niveles freáticos (medio saturado o no saturado)
3. La variación de la velocidad de onda cortante con la profundidad.

La litología de cada perfil geológico se definió con base en los datos estratigráficos de los pozos y correlacionado con los registros de resistividad eléctrica de cada pozo. Los sondeos de resistividad eléctrica permitieron definir la profundidad del nivel freático en cada pozo de estudio y a la vez correlacionarse con características litológicas para definir la presencia de capas de arcilla, limos, arena o grava, lo cual implica variaciones en los valores de velocidades de las ondas sísmicas compresiva y cortante, y también en los valores de densidad.

La consideración del nivel freático tiene importancia para considerar la variación significativa que tiene la velocidad de la onda compresiva en un medio saturado y no saturado. La onda compresiva a diferencia que la onda cortante puede propagarse en el agua, esta generalmente aumenta su valor en medio saturado, debido a que los espacios o vacíos de los depósitos sedimentarios inconsolidados son ocupados por el agua. Esto también tiene implicaciones indirectas en los valores de la velocidad de la onda cortante en tanto se modifique la estructura o empaquetamiento del esqueleto del sedimento, o bien considerando el factor de la profundidad. Las velocidades de las ondas sísmicas compresiva y cortante generalmente aumentan con la profundidad debido a la compactación y rigidez del medio debido a los esfuerzos litostáticos e hidrostáticos, aún a profundidades someras donde generalmente se ubican los depósitos inconsolidados.

Se obtuvieron cuatro relaciones sobre la variación de las velocidades sísmicas de las ondas P ( $V_p$ ) y S ( $V_s$ ) con la profundidad en medio saturado y no saturado aplicado a depósitos inconsolidados, utilizando para ello diversas fuentes (entre las más importantes "Bulletin Seismological Society of America" para el período (1994-1998). Todos los datos corresponden a diferentes métodos de medición. Estos son exploración sísmica de refracción, método de sonda suspendida (suspension logging test), sondeo de exploración sísmica Cross-Hole, ensayo de sísmica Down-Hole, métodos usando análisis espectrales de ondas superficiales (dispersión, explosiones, etc), registros acelerográficos y análisis de regresión, entre otros. A todas ellas se les aplicó la regresión que mejor se ajustara a la dispersión de los datos, y de esta forma poder obtener un valor medio de  $V_p$  o  $V_s$  a cada profundidad, o dado el caso de tener el valor de velocidad de la onda P ( $V_p$ ) obtener por relación el valor de velocidad de la onda cortante S ( $V_s$ ).

En el área de estudio se registran valores de velocidad de la onda P ( $V_p$ ) a partir de los resultados de refracción sísmica obtenidos mediante los estudios de geofísica de los informes técnicos del SENARA (figs. 6.2 y 6.3). Se registran valores entre el rango de 700 - 1700 m/s ( $V_p$ ). La figura 6.2 muestra los perfiles de refracción sísmica (PS) y de resistividad eléctrica (PE) que se han

realizado en el área de estudio. Las figuras 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 muestran las correlaciones hechas con las diversas fuentes de datos. De esta forma se desarrolló una metodología de trabajo para asignar valores de velocidad de onda cortante ( $V_s$ ) en función de la profundidad en medio saturado y no saturado.

Es importante sin embargo mencionar que dichas correlaciones se generalizaron a depósitos inconsolidados sin tomar en cuenta específicamente si son arcillas, arenas o grava. Lo anterior al considerar cuatro factores de importancia que son los siguientes:

1. La escala de trabajo (se cubre un área de estudio de 14 Hojas Cartográficas a escala 1/50000)
2. La información de las fuentes (diversidad de terminologías referidas a materiales inconsolidados, estudios generalizados, falta de información detallada a depósitos de suelos, etc)
3. El área de estudio con características de cuenca fluvial se espera depositación heterogénea o mezclada de arcillas, arenas y grava en mayor o menor proporción
4. No se hizo exploración de geofísica de campo y pruebas de laboratorio

Sin embargo se recopilaron datos suficientes y se desarrolló una metodología de trabajo que permitió asignar valores razonables de acuerdo con las condiciones del medio.

La Figura 6.5 muestra la variación de la velocidad de la onda P ( $V_p$ ) con la profundidad. En este gráfico se muestran de color los datos registrados en el área de estudio, específicamente en los depósitos aluviales al norte del área de estudio (Hojas Belén y Carrillo Norte), y al suroeste (Hojas Diríá y Villarreal). Es importante observar que los datos presentan el mismo patrón de dispersión que las otras fuentes e inclusive algunos valores están dentro de la curva de regresión. Como observación en esta curva se incluyen valores tanto en medio saturado como no saturado. Como regla general los valores en medio saturado se ubican a la derecha de la curva de regresión, por tanto los valores correspondientes al medio no saturado a la izquierda de la curva de regresión.

Por lo tanto no es erróneo aplicar estas correlaciones al área de estudio, tomando en cuenta de que la gran mayoría de los datos no son representativos del área de estudio. Sin embargo se puede decir que los valores dados al lado derecho de la curva de regresión en los primeros 50 metros de profundidad pueden ser representativos de los aluviones saturados del Tempisque en el área de estudio y los valores ubicados al lado izquierdo de la curva de regresión pueden ser representativos de aluviones no saturados en el área de estudio. Otro aspecto importante que se observa es la mayor variación que se presenta en los valores para los primeros 50-70 metros. Sin embargo dicha curva empieza a ser funcional a partir de los 5 metros de profundidad, debido a que existe desviación en los valores a profundidades menores.



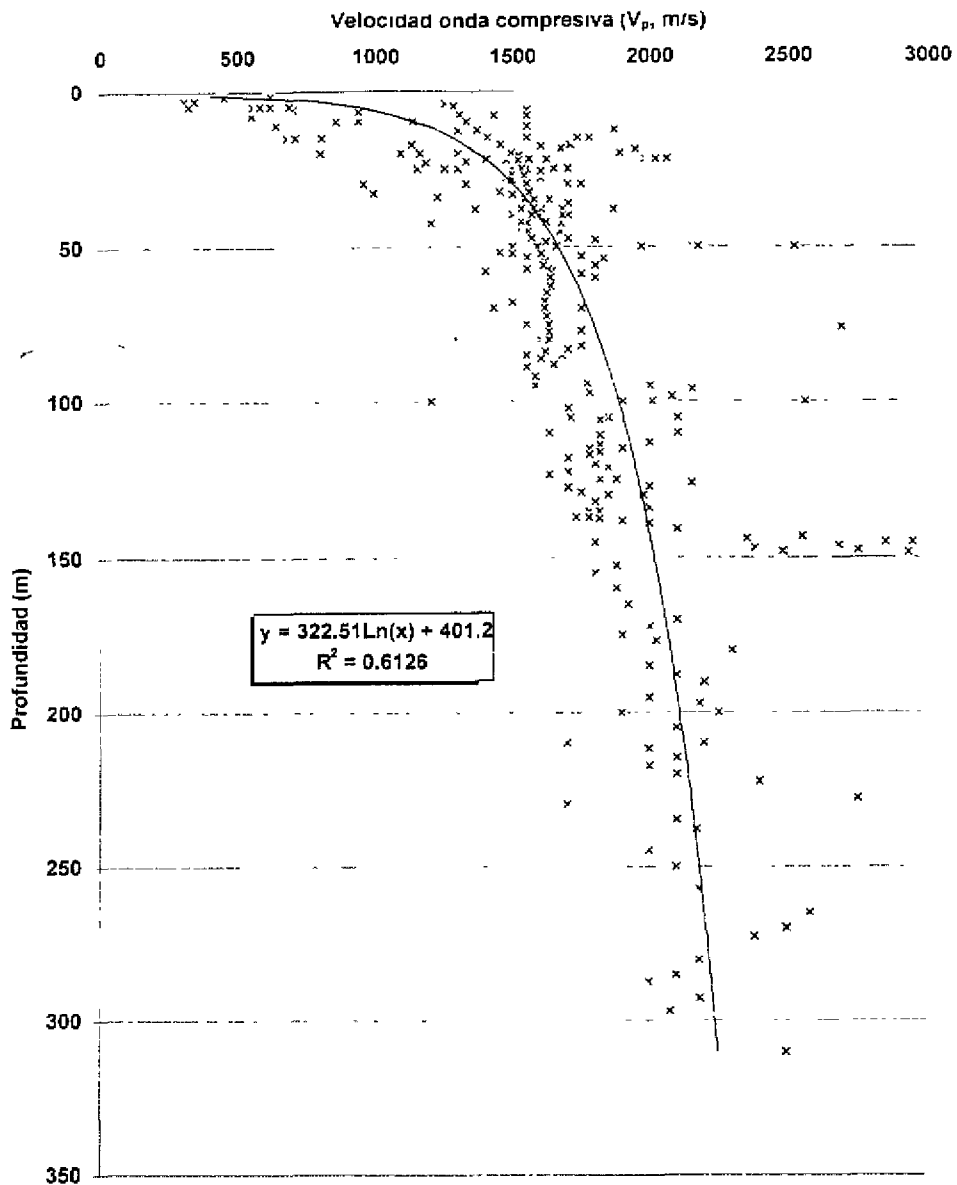


Figura 6.5: Variación promedio de la velocidad de onda compresiva ( $V_p$ ) con la profundidad en depósitos inconsolidados (Fuente bibliográfica: 1.6.19.37,54,68.69.70.71.73,79.90,91.105,113.120,125 )

La Figura 6.6 muestra la variación de la velocidad de la onda cortante ( $V_s$ ) con la profundidad en medio saturado. Se determinó que esta curva es funcional en depósitos de granulometría gruesa (arenas y gravas), sin embargo puede ser práctica en depósitos de granulometría fina a profundidades más superficiales (0.2-2 metros) .

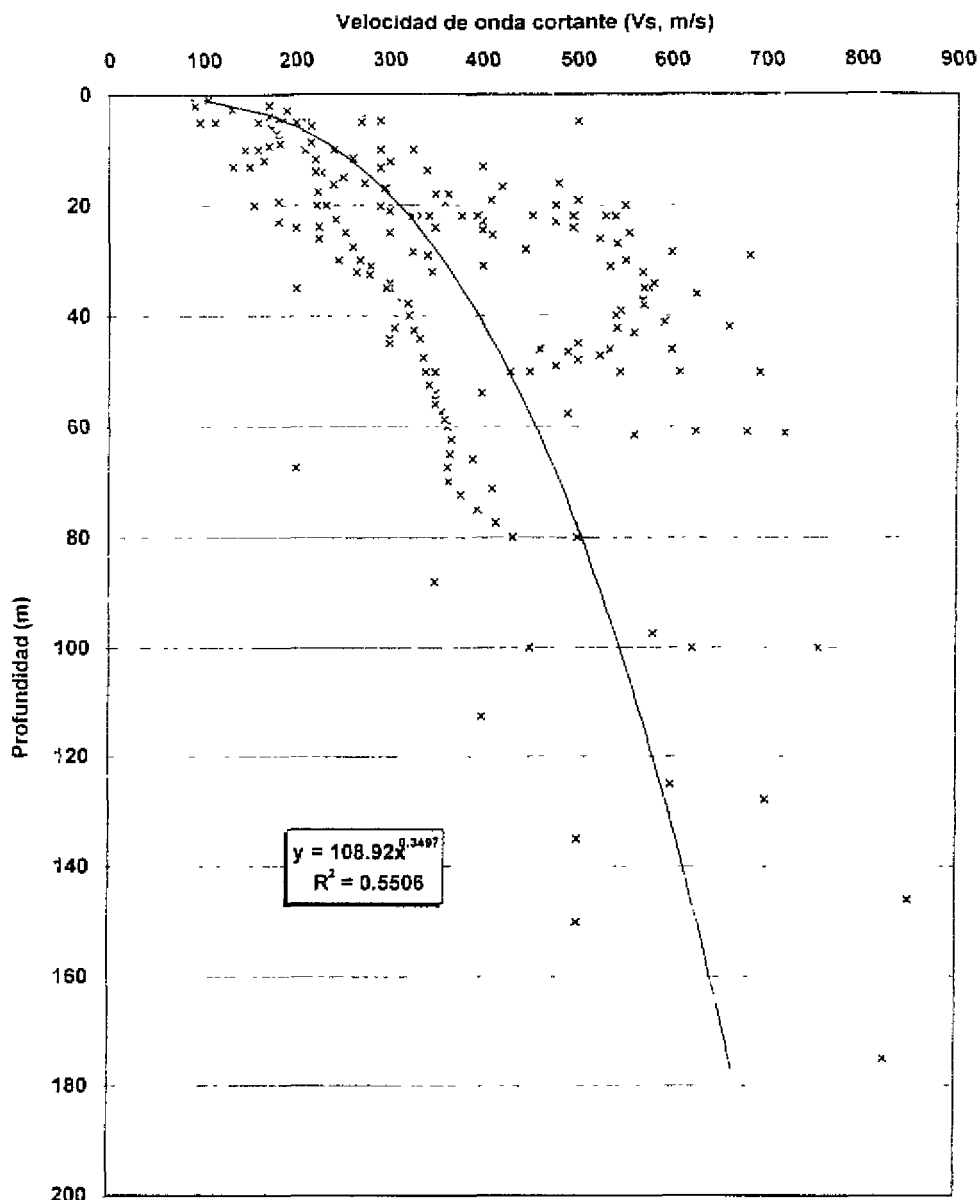


Figura 6.6: Variación promedio de la velocidad de onda cortante ( $V_s$ ) con la profundidad en depósitos in consolidados saturados (Fuente bibliográfica: 1, 20, 54, 65, 68, 69, 91, 104, 113, 122).

La Figura 6.7 muestra la relación entre las velocidades de las ondas P y S ( $V_p$ - $V_s$ ) en medio saturado y no saturado. La regresión de la recta en medio saturado se determinó que es aplicable en depósitos de granulometría fina y para valores de velocidad de la onda P ( $V_p$ ) entre el rango (1300-2400 m/s). La regresión de la recta en medio no saturado se determinó que es funcional en depósitos de granulometría gruesa (arenas y gravas) o en sedimentos consolidados. Sin embargo parece que tiende a sobrestimar los valores de velocidad de la onda cortante ( $V_s$ ). En los datos de la recta en medio saturado se reporta de color un dato del área de estudio, el cual es representativo de aluviones saturados en los alrededores de Nicoya.

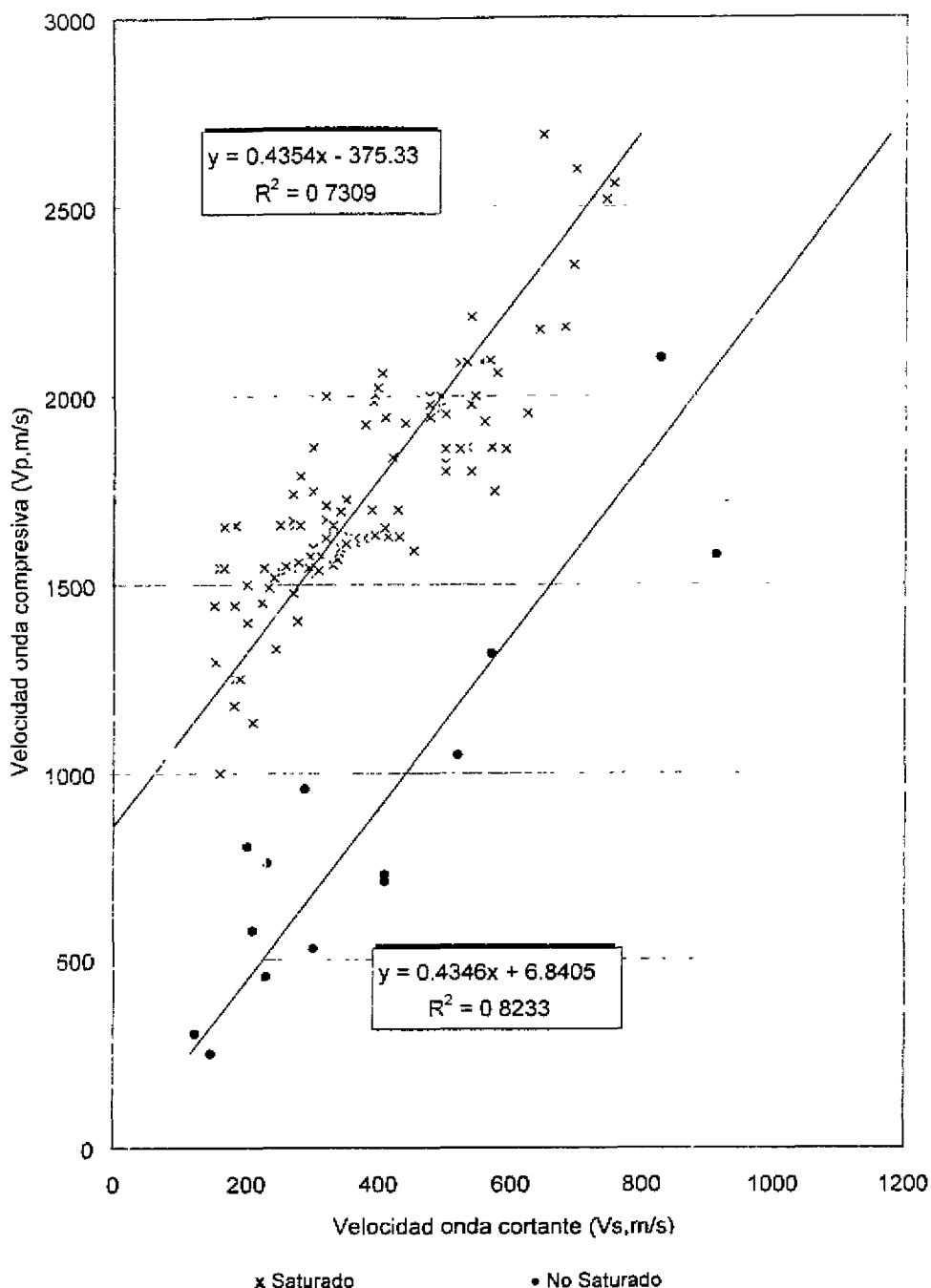


Figura 6.7. Relación promedio entre las velocidades de onda cortante ( $V_s$ ) y compresiva ( $V_p$ ) en depósitos Inconsolidados saturados y no saturados (Fuente bibliográfica: 1, 15, 19, 51, 54, 58, 65, 68, 69, 71, 73, 79, 91, 113, 120, 122).

La Figura 6.8 muestra la variación de la razón de Poisson con la profundidad en medio saturado. Esta relación se utilizó en algunos casos como un parámetro de corrección por profundidad. Su importancia práctica está dada a profundidades mayores de 10 metros en el caso de depósitos de granulometría fina y mayor a 20 metros para el caso de sedimentos de granulometría gruesa.

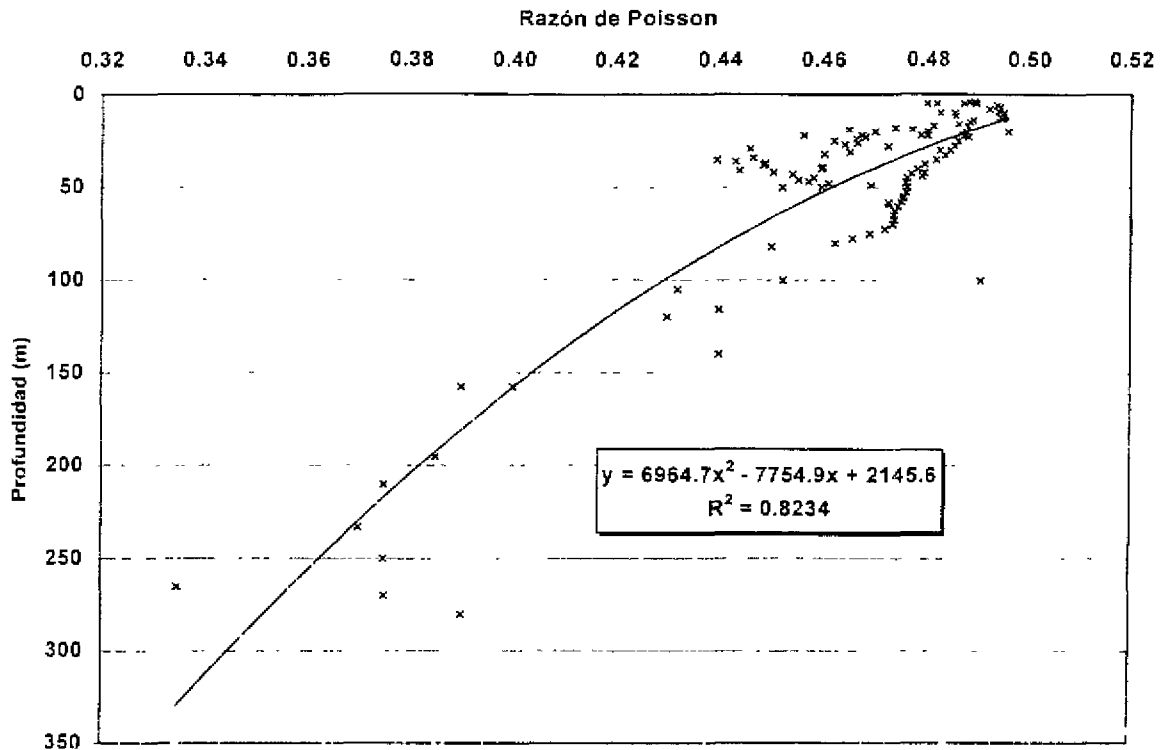


Figura 6.8. Variación promedio de la razón de Poisson con la profundidad en depósitos inconsolidados saturados (Fuente bibliográfica: 1, 54, 68, 69, 71, 113, 122).

La razón de poisson relaciona ambas velocidades según la relación:

$$\nu = \frac{1}{2} \left[ \frac{1 - 2 \left( \frac{V_s}{V_p} \right)^2}{1 - \left( \frac{V_s}{V_p} \right)^2} \right] \quad (6.1)$$

La ecuación anterior se obtiene a partir de la teoría de la elasticidad y se usa para rocas o cuerpos elásticos, sin embargo esta ecuación permite obtener la razón de poisson a cada profundidad teniendo los valores de velocidad a cada profundidad. En algunos casos se tenían los valores de la razón de poisson con la profundidad, en otros se calculó según las diferentes fuentes, y se procedió a plotear los valores de poisson con la profundidad en un gráfico a escala aritmética. Sin embargo se utilizó otra ecuación para obtener el valor de la onda S ( $V_s$ ), conociendo de antemano el valor de la velocidad de onda P ( $V_p > 2.5$  km/s) y la razón de poisson:

$$V_s = V_p \sqrt{\frac{2\nu - 1}{2\nu - 2}} \quad (6.2)$$

La ecuación anterior puede ser válida para valores de velocidad de onda P ( $V_p$ ) mayores a 2.5 km/s.

Las correlaciones anteriores se utilizaron tomando en cuenta el rango de variación en la velocidad de onda P en gravas, arenas y arcillas. De esta forma se obtuvo un valor promedio a cada profundidad según la regresión aplicada y luego se procedió a definir un valor razonable trasladándose a uno u otro lado de la curva según el rango de variación para cada tipo de sedimento (granulometría, espesor y grado de saturación).

Una vez que se obtiene la velocidad de la onda cortante ( $V_s$ ) con la metodología anterior se procedió a obtener la densidad según la variación en los valores de la velocidad de la onda S ( $V_s$ ) a cada profundidad. Tomando en cuenta que la velocidad de la onda S ( $V_s$ ) varía con la rigidez del medio y el grado de saturación, se elaboraron dos curvas que relacionan la velocidad de la onda S ( $V_s$ ) con la densidad en medio saturado y no saturado. Ambas regresiones permitieron obtener el valor de la densidad a cada profundidad según el valor de velocidad asignado (Figuras 6.9 y 6.10).

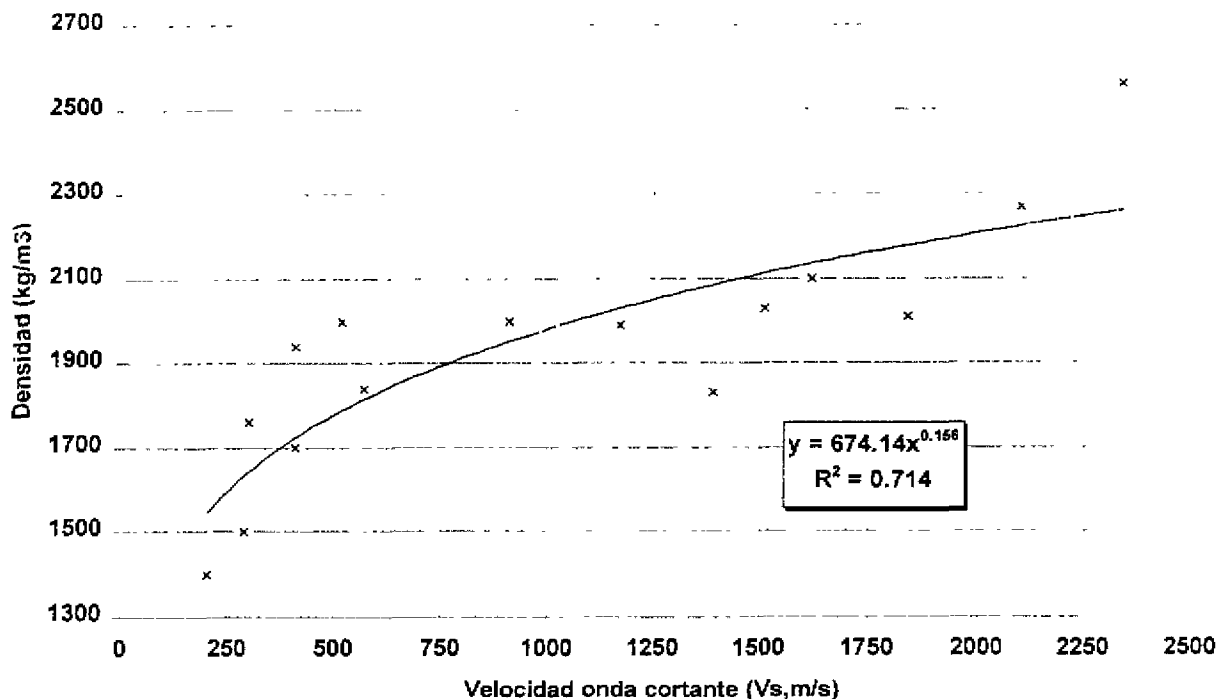


Figura 6.9: Variación promedio de la densidad con la velocidad de onda cortante en depósitos inconsolidados no saturados (Fuente bibliográfica: 19, 54, 73).

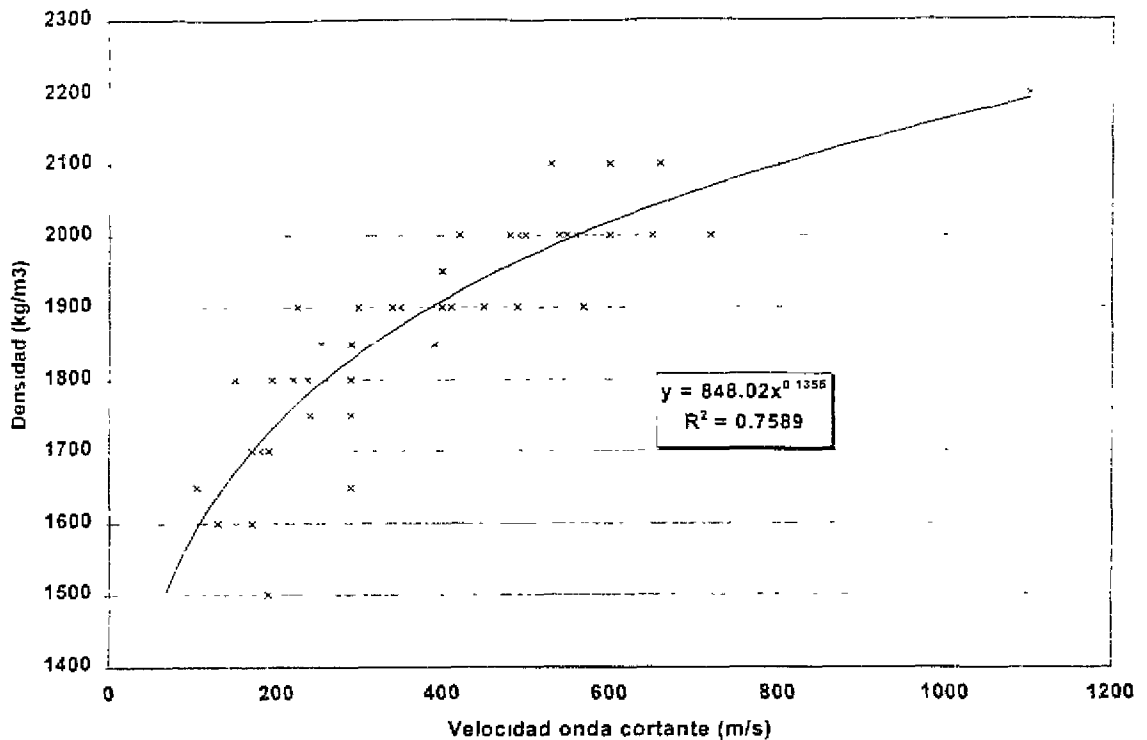


Figura 6.10: Variación promedio de la densidad con la velocidad de onda cortante en depósitos inconsolidados saturados (Fuente bibliográfica: 1, 54, 59, 113).

Al comparar ambas curvas para una velocidad de onda cortante dada, se puede observar que la curva correspondiente al medio no saturado presenta valores de densidad menor comparado con la curva en medio saturado en la cual aumenta significativamente (aproximadamente en un 10%) los valores de densidad debido a la presencia de agua en los poros. El agua no presenta resistencia al cortante, cuyo efecto es el de la onda S o cortante, por tanto es de esperar que la velocidad de la onda cortante no tenga una variación significativa si comparamos los valores en medio saturado y no saturado, a menos que la presencia de agua o saturación en los sedimentos inconsolidados modifiquen significativamente la estructura o empaquetamiento del suelo como se mencionó anteriormente.

Una vez que se tiene la velocidad de onda cortante y la densidad (también dado en peso unitario,  $\text{kN/m}^3$ ), se calcula el módulo dinámico de corte ( $G$ ) en MPa, según la relación:

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (6.3)$$

donde:

$\rho$  : es la densidad en  $\text{kg/m}^3$

$V_s$  : es la velocidad de la onda cortante en m/s

Los estudios de refracción sísmica en el área de estudio descritos al comienzo establecen varios rangos en la velocidad de la onda P ( $V_p$ ) para roca. Estas velocidades corresponden a las rocas del Complejo de Nicoya, que se consideran como el basamento de la región. Dichas rocas son generalmente basaltos o intrusivos básicos, y en algunos casos rocas silíceas sedimentarias. Se reportan valores entre el rango 2700-5800 m/s en la cuenca del río Andamojo (Protti, 1980) al suroeste del área; 3030-4860 m/s en la margen derecha del río Tempisque, al sur de Filadelfia y oeste de Belén, San Blas y Sardinal (Protti, 1981); 2700-3560 m/s al suroeste de Filadelfia (Vásquez, 1985). Teniendo en consideración estos rangos de velocidad de onda P ( $V_p$ ), se procedió a tomar un valor promedio en cada caso y asignar el valor correspondiente en cada pozo según su cercanía al lugar donde se reportan los datos de velocidad en los estudios de refracción sísmica. Para tomar el valor correspondiente de velocidad de la onda S ( $V_s$ ), se utilizó la siguiente relación que generalmente se aplica en sismología para roca:

$$V_p = \sqrt{3} V_s \quad (6.4)$$

También se utilizó una curva de correlación entre las velocidades sísmicas  $V_p$  y  $V_s$  con el fin de tener otra fuente de referencia para asignar el valor correspondiente de velocidad de onda cortante en cada pozo (Fuentes: 49, 57, 58, 113, 115). La densidad en roca se obtuvo de la misma forma que se hizo con los depósitos inconsolidados, relacionando la velocidad de la onda S ( $V_s$ ) con la densidad y obteniendo una curva de regresión, sin embargo se usaron otras fuentes disponibles en los laboratorios de Geología y Geotecnia del ICE.