

CAPITULO III

ANTECEDENTES SISMICOS

3.1 Sismicidad regional de Costa Rica

Costa Rica, a través de su historia ha demostrado ser un país con un elevado nivel de amenaza sísmica. Los terremotos que han causado daños importantes en el Valle Central han sido originados por diversas fallas locales. La tabla 1 muestra algunos de los temblores y terremotos más importantes de los cuales existe documentación en la historia escrita de Costa Rica.

TABLA 1
TEMBLORES Y TERREMOTOS IMPORTANTES
EN LA HISTORIA ESCRITA DE COSTA RICA
PERIODO PRE-INSTRUMENTAL 1756-1977

AÑO	FECHA	REGIÓN EPICENTRAL	MAGNITUD
1756	14 julio	Desconocida	-
1798	21 febrero	Desconocida	-
1803	27 diciembre	Desconocida	-
1821	10 abril	Desconocida	-
1822	7 mayo	Litoral atlántico	7,5
1827	3 abril	Guanacaste	-
1841	2 setiembre	Cartago	5,8
1842	21 marzo	Sur de San José	-
1851	18 marzo	Norte de Alajuela y Heredia	-
1853	24 agosto	Cañas, Guanacaste	-
1853	8 setiembre	Guanacaste	-
1854	4 agosto	Golfo Dulce	-
1882	3 marzo	Quepos	7,0-7,7
1888	30 diciembre	Fraijanes, Alajuela	5,8
1904	20 diciembre	Limón	7,5
1905	20 enero	Pacífico Central	6,8
1910	13 abril	El Tablazo, San José	5,2
1910	4 mayo	Cartago	5,5
1911	29 agosto	Bajos del Toro	5,5
1911	10 octubre	Guatuso de Alajuela	5,8
1912	22 febrero	Tres Ríos	5,2
1912	6 junio	Sarchí - Toro Amarillo	5,5
1916	27 febrero	Guanacaste	7,5
1916	24 abril	Litoral atlántico	7,6
1916	25 abril	Litoral atlántico	6,9

TABLA 1
TEMBLORES Y TERREMOTOS IMPORTANTES
EN LA HISTORIA ESCRITA DE COSTA RICA
PERIODO INSTRUMENTAL 1978-1992
(continuación)

AÑO	FECHA	REGIÓN EPICENTRAL	MAGNITUD
1924	4 marzo	Orotina	7,0
1935	1 agosto	Bagaces, Guanacaste	5,5
1939	18 junio	Heredia	6,5
1939	21 diciembre	Entrada al Golfo de Nicoya	7,3
1939	22 diciembre	Entrada al Golfo de Nicoya	6,8
1941	5 diciembre	Península de Osa	7,5
1948	19 noviembre	Región central	7,0
1950	5 octubre	Península de Nicoya	7,7
1951	22 agosto	Sur de Cartago	5,2
1952	13 mayo	Oeste del Valle Central	6,9
1952	30 diciembre	Noroeste del Volcán Irazú	5,3
1953	7 enero	Limón	5,5
1955	1 setiembre	Toro Amarillo-Zarcelero	5,8
1956	19 julio	Desconocida	6,0
1957	4 febrero	Desconocida	6,2
1959	13 enero	Pacífico Central	5,9
1962	12 marzo	Pacífico Sur	6,8
1966	9 abril	Pacífico Central	6,4
1973	14 abril	Tilarán	5,5
1978	22 agosto	Sámara	7,2
1978	22 agosto	Sámara	7,0
1979	1 julio	Punta Burica	6,5
1983	2 abril	Golfito	7,3
1983	3 julio	Pérez Zeledón	6,1
1989	26 febrero	Los Santos	4,7
1990	25 marzo	Entrada al Golfo de Nicoya	7,0
1990	mayo-junio	Puriscal	4,5 - 5,0
1990	22 diciembre	Puriscal	5,7
1991	22 abril	Limón	7,6
1991	8 agosto	Los Santos	4,9
1992	6 marzo	Naranjo, Alajuela	6,0

Magnitudes estimadas por Rojas (1993), Montero (1991), cuando $M \leq 5,9$

Magnitudes estimadas por USGS, m_s cuando $M \leq 6,0$, M_s cuando $M > 6,0$

Los sismos en negrita representan los eventos que han causado más daños a la infraestructura

FUENTE: González (1910), Morales (1986), Montero y Alvarado (1988), Montero y Climent (1990), United States Geological Survey (1991).

En la figura 7 se observan ubicados los sismos ocurridos entre 1990 y 1991, según los datos del National Geophysical Data Center de los Estados Unidos de América. Nótese como es evidente la actividad sísmica a lo largo del Sistema de Falla Transcurrente de Costa Rica.

SISMICIDAD EN LA REGIÓN DE COSTA RICA 1710 SISMOS GRAFICADOS

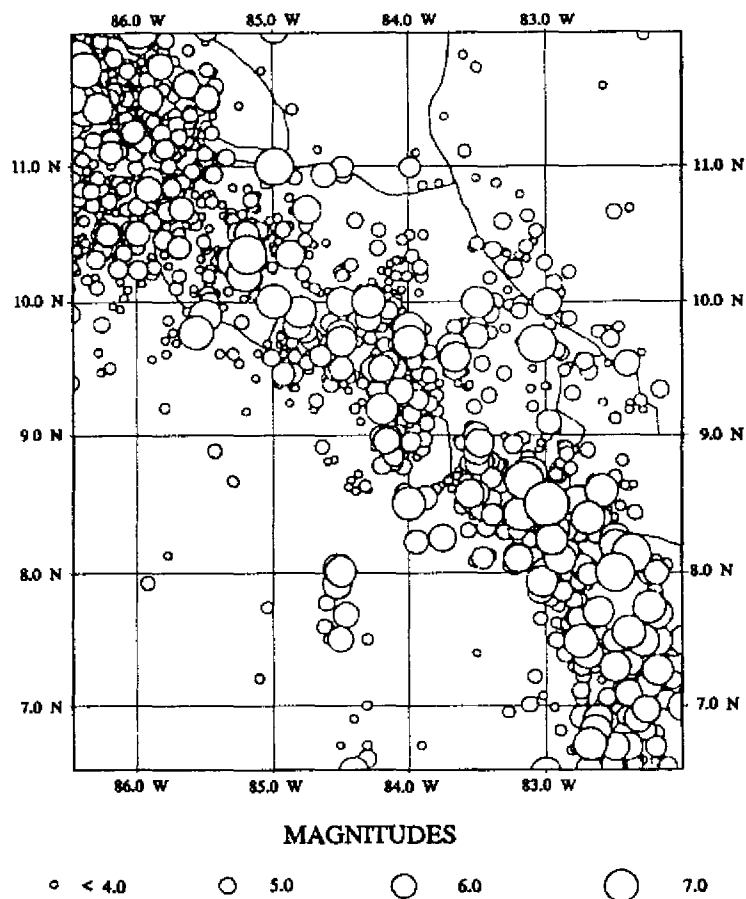


Figura 7.
Localización de 1710 sismos ocurridos durante el período 1900-1991 (National Geophysical Data Center, 1991).

3.2 Sismicidad del Valle Central y del sector de la ciudad de Cartago

3.2.1 Zona sísmica del Valle Central

Según los datos históricos e instrumentales disponibles, el Valle Central en Costa Rica ha mostrado una elevada tasa de actividad sísmica a través de los años.

Si se considera la sismicidad del Valle Central documentada instrumentalmente durante el período 1973-1991 (2169 eventos sísmicos), puede obtenerse un gráfico que relaciona el logaritmo del número de eventos con magnitudes (Fig. 8). El valor obtenido en la inflexión de la recta es el "umbral de detección" (M_0), que coincide con la magnitud más baja detectable por la red sismológica con cierto grado de confiabilidad. La pendiente de la recta (b) se conoce como el índice de sismicidad.

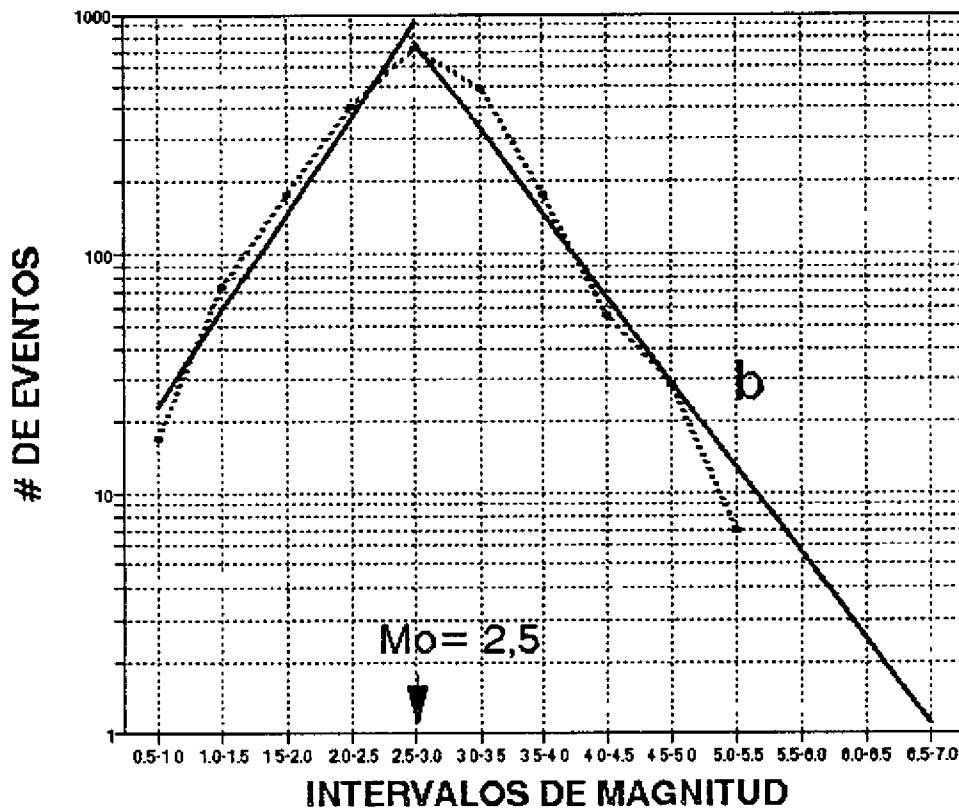


Figura 8. Gráfico de regresión del número de eventos y intervalos de magnitud para el Valle Central durante el período 1973-1991.

Los parámetros más importantes obtenidos de este gráfico son:

Índice de sismicidad (b):	-0,71
Raíz cuadrática:	0,94
Umbral de detección (M_0):	2,50

Por lo tanto, el Valle Central es una región en donde usualmente ocurren sismos de moderada magnitud, debido a la existencia y actividad de varios sistemas de fallas. Además, en ocasiones ocurren sismos de gran magnitud.

Los eventos sísmicos de Cóbano (25 de Marzo de 1990), Alajuela (22 de Diciembre de 1990) y Limón-Telire (22 Abril 1991), han evidenciado claramente en el Valle Central, varias sub-zonas sísmicas de importancia y con características tectónicas diferentes entre ellas.

3.2.2 Sismicidad local en el sector de la ciudad de Cartago

La región del Valle del Guarco, especialmente en su parte sur, a través de la historia ha presentado sismos que aunque de moderada magnitud ($5 < M < 6,5$), han provocado daños a las ciudades de Cartago y San José. Es importante tener en cuenta esta actividad sísmica para poder comprender la importancia de los estudios de riesgo y amenaza sísmica durante la definición de los parámetros sismorresistentes que requieren las estructuras para su estabilidad y longevidad.

3.2.2.1 Historia sísmica pre-instrumental

La historia sísmica de la ciudad de Cartago es relativamente amplia. Gran parte de ella fue recopilada por el Lic. Cleto González Víquez en su libro "TEMBLORES, TERREMOTOS, INUNDACIONES Y ERUPCIONES VOLCÁNICAS EN COSTA RICA 1608-1910" y por Geovanny Peraldo (1994, tesis de licenciatura en proceso). Es

necesario aclarar que, aunque los sismos a los que se hace referencia en los siglos pasados causaron daños en Cartago, no necesariamente provienen de fuentes sismo-tectónicas cercanas. En lo que se refiere al sector ocupado por la ciudad de Cartago, estos dos autores relatan sobre los siguientes eventos:

SIGLO XVII

a) Período 1600-1699:

Las primeras referencias acerca de los temblores y daños causados en Cartago, aparecen en la época colonial, propiamente en el año de 1638.

-1678:

El gobernador Gómez de Lara hizo reparar la Iglesia Parroquial de Cartago, por los temblores ocurridos en ese entonces.

b) Período 1680-1689:

Entre estos años, ocurrió el terremoto denominado "Terremoto de San Gregorio" un 9 de mayo, según Don Diego de la Haya (1723, en González, 1910) y Kurtze y Streber (1855, en González 1910), el cual ocasionó daños en la ciudad de Cartago.

Peraldo (en comunicación verbal, 1994) sugiere que estos eventos sísmicos son hasta el momento inciertos y es difícil establecer fechas precisas.

SIGLO XVIII

c) Período 1700-1799:

-1728:

El temblor causó daños en las casas de Cartago. Peraldo (en comunicación verbal, 1994) le asigna una intensidad máxima Mercalli Modificada (IMM) de VII.

-1756:

El 14 de julio entre las 2 y las 3 p.m., ocurrió el "Temblor de San Buenaventura" que causó gran destrucción en Cartago. Peraldo G. (en comunicación verbal, 1994) le asigna una intensidad IMM de VII.

-1794:

El sismo causó daños importantes a la Iglesia de Cartago. La intensidad IMM para este sismo fue de VII. (Peraldo en comunicación verbal, 1994).

SIGLO XIX

d) Período 1800-1841:

-1803:

El sismo provocó daños en las iglesias de Boruca y Cartago.

-1821:

El 10 de abril, entre 3 y 4 p.m., se sintió un temblor fuerte que causó agrietamiento de las paredes en Cartago. La intensidad IMM fue de VI⁺ (Peraldo G., en comunicación verbal, 1994).

-1841:

Primera gran destrucción de Cartago (1841)

El terremoto conocido como el "Terremoto de San Antolín" ocurrió el día 2 de setiembre de 1841 a las 6:30 a.m.. Fueron totalmente destruidos Cartago, Curridabat y Tres Ríos, provocándose 16 muertos en Cartago, 3 en San Gabriel, 4 en San Juan y 15 en Curridabat. El total de casas destruidas entre Alajuela, Heredia, San José y Cartago asciende a 4225 (González C., 1910). La Intensidad Mercalli Modificada (IMM) máxima se ha calculado en VIII o más.

3.2.2.2 Historia sísmica instrumental

A partir del año 1878 comienzan a publicarse las intensidades de los sismos de acuerdo a como lo sintió la gente, por ejemplo: "14 de noviembre a las 10 a.m. hubo un temblor muy débil".

Durante el año 1888 el señor Henry Pittier, creó el Instituto Físico-Geográfico, y con sismómetros de péndulo, dió algunas medidas para el tamaño de un sismo. Lo que hacían estos sismómetros, era trazar rayas y la distancia máxima entre los puntos mas alejados de una misma línea era el tamaño del sismo, es decir, a mayor número de centímetros, más cercano y fuerte era el evento. Ese mismo año, un 30 de diciembre, ocurrió el Terremoto de Fraijanes, causando 5 muertos en la Laguna de San Isidro y daños en Alajuela y San José. La medida obtenida por Pittier para este sismos fue de 30,5 mm (González C., 1910).

SIGLO XX

1905:

Un enjambre sísmico cercano a la ciudad de Cartago, ocurrido entre el 27 y el 29 de diciembre causó daños con una intensidad IMM de VII.

1910:

Segunda gran destrucción de Cartago (1910)

Se producen dos eventos importantes, uno el 13 de abril (temblor del Tablazo) de magnitud inferior a 5,5 a las 0:37 a.m., que causó daños en San José y otro el 4 de mayo a las 6:47 p.m., que provoca una nueva destrucción de la ciudad de Cartago y en el que hubo 362 muertos y de magnitud estimada en 5,5.

Las intensidades máximas estimadas por Montero y Miyamura (1981) sugieren un valor IMM entre VII y VIII y proponen que el sismo del 4 de mayo, está asociado con la falla del Valle de Coris.

1951:

El 9 de agosto de 1951, un terremoto causó daños en Paraiso, Orosi y lugares aledaños. Tuvo una intensidad máxima IMM de VII. Está asociado tal vez al extremo este-sureste de la falla del Valle de Coris (Montero et al., 1991).

1952:

Otro evento que, aunque no causó daños considerables a la infraestructura, provocó pérdidas humanas, fue el Terremoto de Patillos, ocurrido el 30 de diciembre de 1952 (Falda noroeste del Volcán Irazú). Este evento produjo 21 muertos por deslizamientos (Mora y Morales, 1986).

3.2.2.3 Sismicidad instrumental del área de Cartago durante el período 1974-1991:

Esta región del Valle Central se ha denominado Sub-zona de Cartago. Para esta parte del análisis se localiza entre las latitudes $9,70^{\circ}$ - $10,10^{\circ}$ N y las longitudes $83,75^{\circ}$ - $84,00^{\circ}$ W. La base de datos utilizada contó con 260 eventos sísmicos.

De las diferentes relaciones obtenidas de la figura 9, podemos rescatar lo siguiente:

Indice de sismicidad (b):	-0,54
Raíz cuadrática:	0,93
Umbral de detección (M_0):	2,50

Este índice de sismicidad es más bajo que el obtenido para todo el Valle Central durante el período 1973-1991 aunque en general estos parámetros refuerzan la consideración de que la región tiene fallas activas y que en ellas se producen eventos de mediana magnitud.

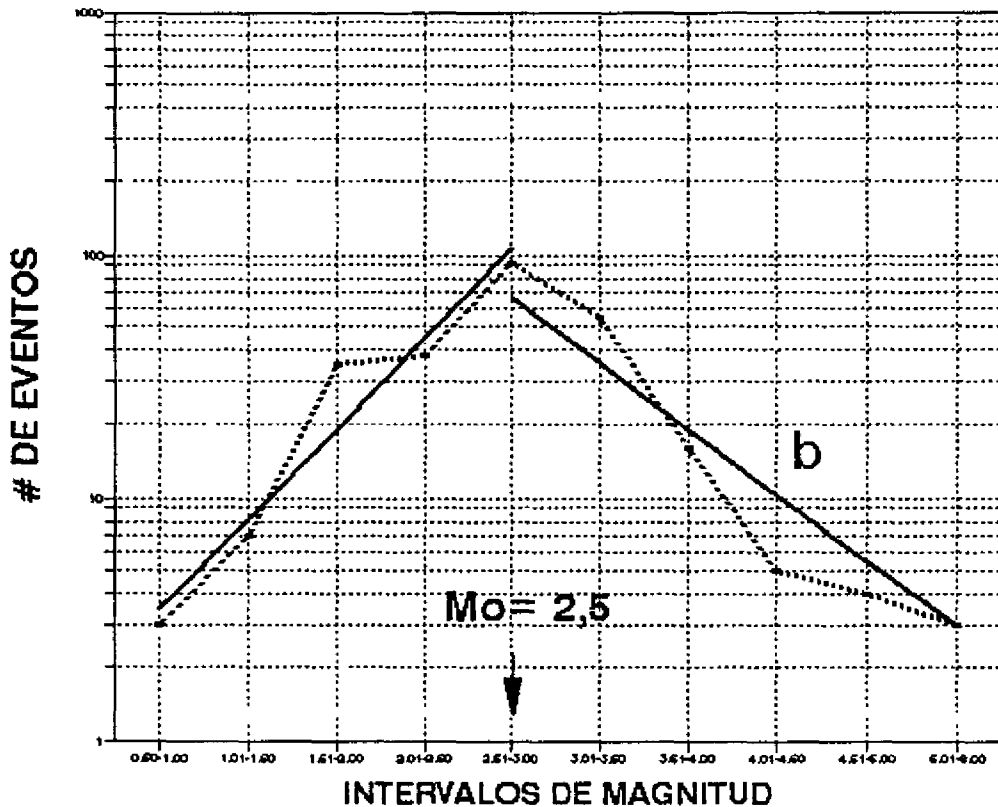


Figura 9. Gráfico de regresión del número de eventos y intervalos de magnitud para el área de Cartago durante el período 1973-1991.

CAPITULO IV

CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO EN CARTAGO

4.1 Modelo del subsuelo

Gutiérrez (1979), considera que el término "local" resulta un poco ambiguo de definir, por lo que para los efectos de este trabajo lo definiremos como las condiciones geológicas y topográficas existentes en el sitio y sus alrededores inmediatos de la estructura civil y que son capaces de influir en su respuesta.

Desafortunadamente, el parámetro aceleración y las características hidrogeológicas, geotécnicas y geofísicas del suelo generalmente no son tomadas muy en cuenta en los estudios de amenaza sísmica. No obstante, es reconocido su valor e importancia en la caracterización de la respuesta del suelo durante un sismo.

Para sitios caracterizados por estratos de suelo sobre una base rocosa, es necesario determinar las modificaciones producidas por los estratos. Para suelos formados por estratos horizontales, la excitación horizontal en la superficie es causada fundamentalmente por las ondas secundarias. Existen algunos programas de computo que simulan el comportamiento de las ondas sísmicas primarias (ondas P) y secundarias (ondas S). Sin embargo, los resultados obtenidos de estos programas, serán cierto bajo ciertas condiciones:

- i) Las capas de suelo son horizontales y homogéneas, colocadas sobre una base rocosa también horizontal.

- ii) Las dimensiones horizontales son infinitas.

iii) La excitación en la roca es idéntica en todos los puntos para cualquier instante (Gutiérrez, 1979).

En Costa Rica, dada la complejidad geológica de su suelo y subsuelo, se pueden considerar las capas de suelo como horizontales únicamente en algunos de los valles en donde se asientan las principales ciudades. Sin embargo, la profundidad, la posición horizontal, las dimensiones infinitas y la homogeneidad del basamento rocoso casi nunca se cumplen.

Veletsos (1978) considera que las propiedades más importantes del suelo que deben conocerse son.

- a- Módulos.
- b- Pesos específicos.
- c- Velocidad de la onda S.
- d- Densidad.
- e- Relación de Poisson.

Ishihara (1985) menciona que también es importante conocer:

- f- Curva granulométrica.
- g- Grado de compactación.
- h- Índices de plasticidad.
- i- Ángulo de fricción.
- j- Resistencia a los esfuerzos cortantes.
- k- Presión de poros.
- l- Capacidad soportante.

Todas estas consideraciones, junto con los datos de las aceleraciones, deberían de tomarse en cuenta rutinariamente en los estudios de amenaza sísmica y de riesgo.

4.2 Datos Geotécnicos

La caracterización geotécnica de los suelos en la parte sur de la ciudad de Cartago, específicamente los estudios realizados por Mora en Montero et al. (1991), indican que existen dos tipos de suelos predominantes; uno las arenas gravosas y el otro arenas limosas, con las características promedio que se muestran en las Tabla 2a, 2b Y 2c.

TABLA 2a.
CARACTERISTICAS PROMEDIO DE LAS ARENAS GRAVOSAS

FAMILIA GRANULOMETRICA	PORCENTAJES
grava	10,04 %
arena	82,28 %
finos	07,67 %

(Montero et al., 1991)

TABLA 2b.
CARACTERISTICAS PROMEDIO DE LAS ARENAS LIMOSAS

FAMILIA GRANULOMETRICA	PORCENTAJES
% de grava	02,00 %
% de arena	80,24 %
% de finos	18,12 %

(Montero et al., 1991)

TABLA 2c.
**VALORES PROMEDIO DE LAS ARENAS LIMOSAS
SEGUN PRUEBA DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE**

PROPIEDAD	VALOR
L. líquido	56,91
L. plástico	31,79
I. plástico	25,13

(Montero et al., 1991)

Por otro lado, las propiedades físicas de los suelos de la parte sur del área estudiada, fueron determinadas por Mora (Véase Montero et al., 1991). Los resultados obtenidos de pruebas realizadas en diferentes sitios, son muy similares entre sí, por lo que en este trabajo se muestran los valores promedio, los cuales se presentan en la Tabla 3. En general, son suelos poco compactos, cohesivos, granulares y con una presencia variable de fracción fina. La capacidad soportante admisible se ha calculado usando la Teoría de Terzaghi para una zapata corrida infinita y se ha utilizado un factor de seguridad de 3, obteniéndose valores que oscilan entre 95 y 108 kPa. Estos valores obviamente están en función del ancho del cimiento, sin embargo, para algunos tipos de suelos la capacidad soportante es menor de 95 Kpa (Véase Montero et al., 1991).

TABLA 3
PROPIEDADES FISICAS PROMEDIO DE LOS SUELOS

PROPIEDADES	VALOR
P.U. seco [kN/m ³]	11,81
P.U. húm. [kN/m ³] *	16,95
P.U. sat. [kN/m ³]	17,26
P.U. sol. [kN/m ³] *	26,56
Grav. espec. (Gs)	02,71
Rel. vacíos (e)	01,26
Porosidad (n)	55,50
Grad. satur.(S) *	94,00
Ang. fric. inter. (°)	16,75
Cohesión (KPa)	19,77

*Calculados con contenido de humedad natural

P.U.: Peso Unitario
(Montero et al., 199)

4.3 Datos Geofísicos

4.3.1 Resistividad eléctrica

Los estudios realizados en la parte sur de la ciudad de Cartago, consideran que el patrón de isorresistividades pueden variar de los 10 a los 80 ohm-m (Véase Montero et al., 1991). Se pueden asociar estos valores específicos de resistividad para ciertos materiales a diferentes profundidades en el perfil de la capa de suelo (Tabla 4).

TABLA 4
RESISTIVIDADES DE DIFERENTES MATERIALES EN SUR DE CARTAGO

MATERIAL	RESISTIVIDAD (ohm-m)	ESPESOR (m)
CAPA SUELO HUMICO SUPERFICIAL	10-40	2-5
LAHARES	20-40	5-9
ROCAS SEDIMENTARIAS METEORIZADAS	10-17	2-5
ROCAS SEDIMENTARIAS (SUSTRATO)	40 o más	----

(Montero et al., 1991)

Las figuras 10a y 10b representan una interpretación geoeléctrica de los perfiles A y B realizados en la parte sur de la ciudad de Cartago (Véase Montero et al., 1991; ver ubicación de los perfiles en la Fig. 5), con sus correspondientes litologías.

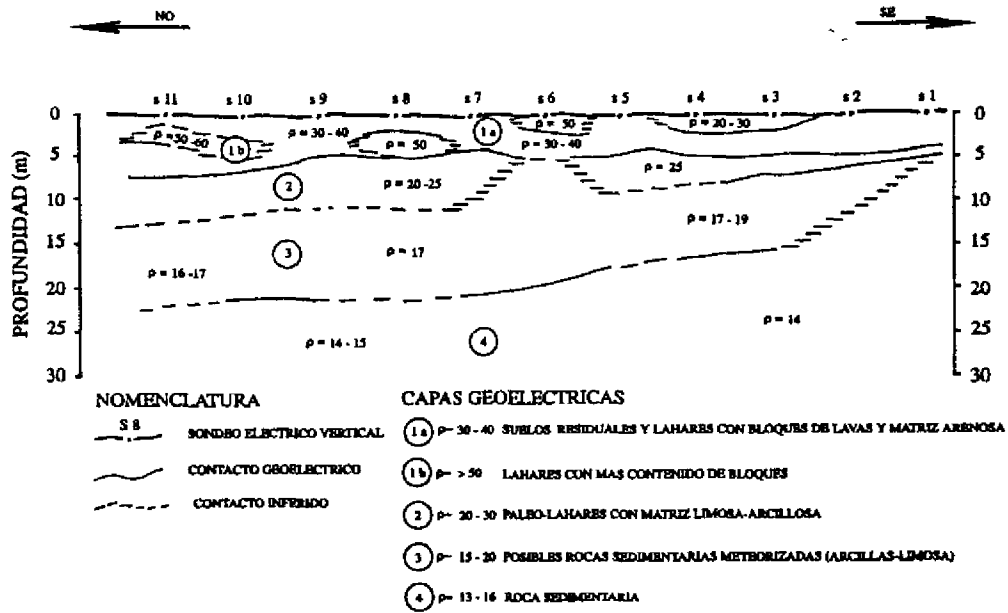


Figura 10a.
Interpretación del sondeo geoelectrico, Perfil A. Método de Schlumberger. Los Diques-Guarco, Cartago (Montero et al., 1991).

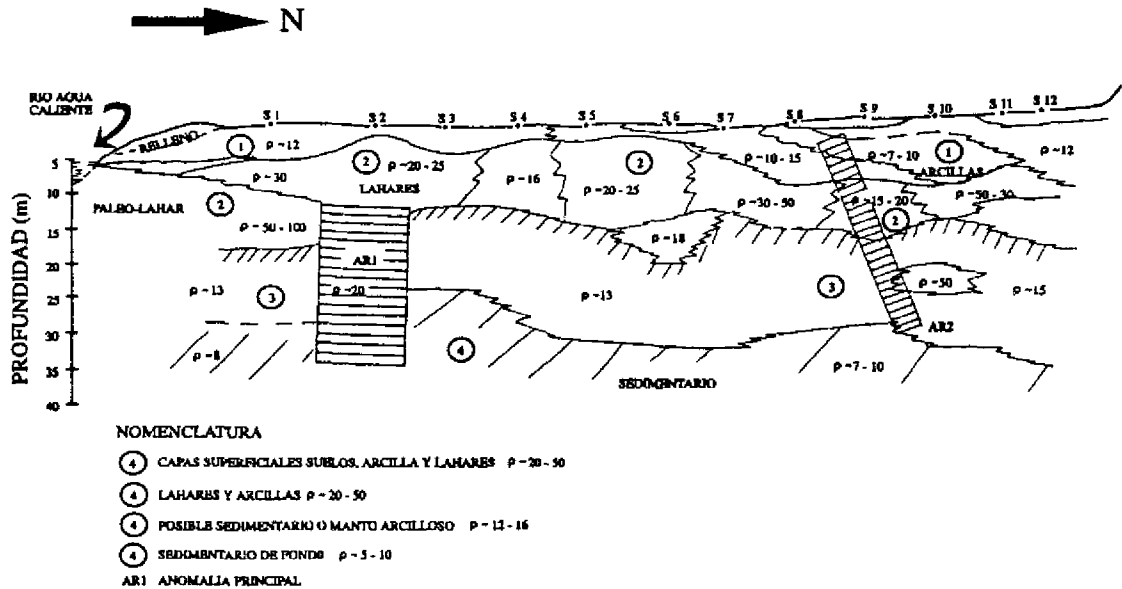


Figura 10b.
Interpretación del sondeo geoelectrico, Perfil B Método Schlumberger Duarco-Suarre, Cartago (Montero et al., 1991).

4.3.2 Refracción Sísmica

La capa superficial de suelo se caracteriza por poseer velocidades de la onda compresional (V_p) entre 0,20 y 0,70 km/s. Por su parte, las capas con lahares presentan valores de V_p entre 0,80 y 1,80 km/s y finalmente, la capa sedimentaria, es decir, el sustrato rocoso en sus horizontes superiores muestra valores que varían entre 2,00 y 2,50 km/s. Las capas meteorizadas de la roca tienen velocidades de la onda primaria compresional entre los 1,5 y 1,8 km/s. Las relaciones de Poisson de los lahares y el sedimentario pueden variar entre 0,3 y 0,4 (Véase Montero et al., 1991).

Las velocidades de la onda cortante disminuyen conforme la profundidad de las capas es menor y generalmente pasan de 0,42 km/s a 24 metros de profundidad a 0,12 km/s en la superficie (Altamirano, 1987). Estas varían según el tipo de material que atraviesen.

4.4 Datos hidrogeológicos

Los datos de las perforaciones para aguas subterráneas realizadas en la región indican que el espesor de suelo y otros depósitos superficiales (cenizas, lahares, etc.) hasta la parte superior del sustrato rocoso, varía entre los 20 m y 130 m y en algunos casos más.

En la parte central de la ciudad de Cartago, donde habita la mayoría de la población, las perforaciones hechas no han alcanzado la roca ha excepción de la perforación IS-109 localizada en la parte oriental de la ciudad y cuya profundidad fue de 200 metros. En este pozo a los 66 metros aparecen a los 66 metros una brecha tobácea y los 70 metros las lavas (Fig. 11a).

Las lavas provenientes del Volcán Irazú, generalmente se encuentran interestratificadas con depósitos sedimentarios y piroclásticos. Como por ejemplo, depósitos blandos de cenizas, lahares, depósitos lagunares, paleosuelos y depósitos sedimentarios rocosos. Aparecen en El Bosque de Cartago entre 12 y 40 metros de profundidad con espesores de 1 a 8 m. En Campo Ayala y Paraíso Industrial, aparecen entre 15 y 45 metros y el espesor varía de 8 a 15 m. Entre 20 m y 75 m aparecen en San Francisco con espesores entre 15 y 30 metros. En Dulce Nombre de Cartago y Taras las lavas aparecen a 80 metros de profundidad y los espesores son considerables, alrededor de 50 metros. En el Parque Industrial, aparecen a 30 metros y sus espesores varían entre 10 y 30 metros, mientras que en Sabana y Paraiso la profundidad varía entre 15 y 50 m y los espesores entre 10 y 20m.

Sin embargo no siempre aparecen las lavas. Se ha perforado en algunos sitios hasta 128 metros, por ejemplo en Coris, cerca de las montañas, en donde aparecen primero las rocas sedimentarias de la Formación Coris a 100 metros de profundidad.

Las diferencias de profundidad en las que pueden aparecer las lavas varían en un mismo sector debido a que se trata de coladas ramificadas que discurrieron a lo largo de cañones fluviales y depresiones y posiblemente también a los efectos del fallamiento tectónico, por lo que las lavas aparecen desde los 20 metros hasta casi 100 metros. Además, generalmente estas lavas se encuentran intercaladas con materiales sedimentarios como los descritos anteriormente.

Ocho de los pozos de mayor profundidad, cuatro localizados en la parte norte y cuatro localizados en la parte sur del área de estudio (Fig. 5), dan una idea de como varía el espesor del suelo blando y la profundidad a la cuál se localizan las lavas y los materiales sedimentarios (Fig. 11a y 11b).

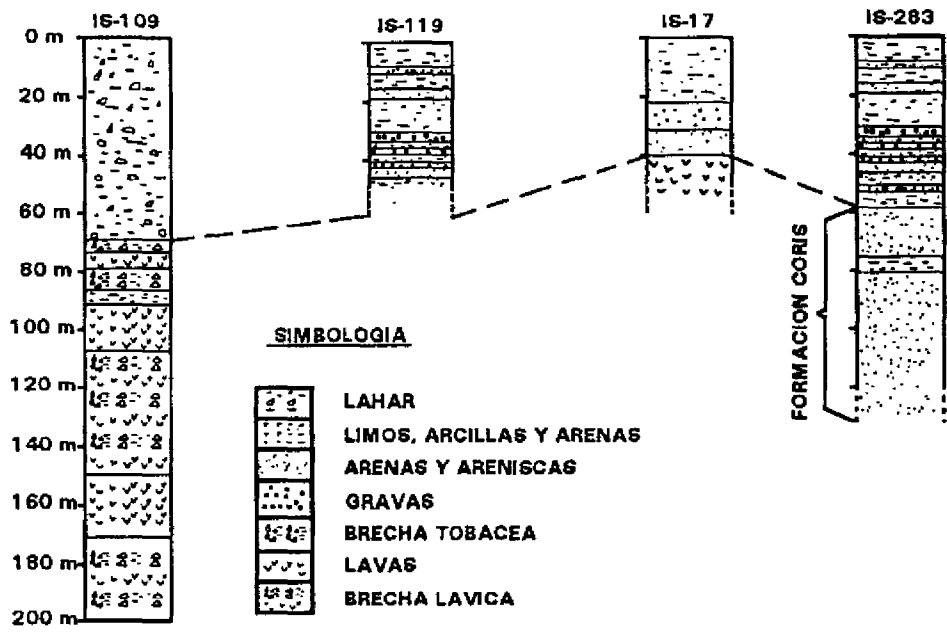


Figura 11a.
Cambios en el espesor del suelo blando y la profundidad de las lavas y las rocas sedimentarias en la parte norte del área estudiada

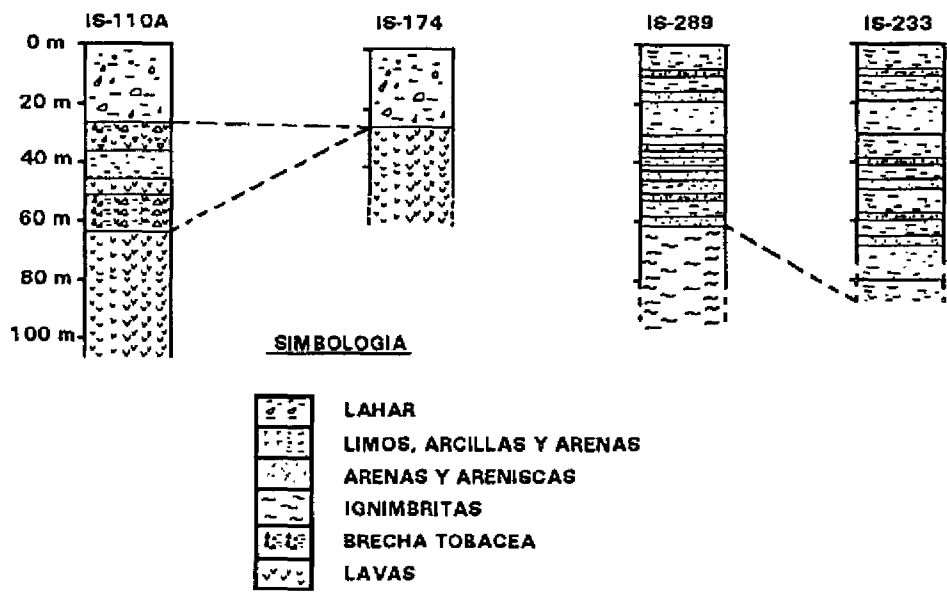


Figura 11b.
Cambios en el espesor del suelo blando y la profundidad de las lavas y las rocas sedimentarias en la parte sur del área estudiada

Desde el punto de vista del agua subterránea y de los niveles freáticos, estos se encuentran entre 2 y 4 metros de profundidad e incluso pueden ascender hasta alcanzar en algunas áreas el nivel del suelo superficial. El otro nivel se puede encontrar a profundidades de 40 metros o más.

En resumen, la heterogeneidad de las capas litológicas del suelo, sobre un basamento no horizontal, el cambio de los niveles freáticos, las dimensiones finitas de las capas y el cambio de nivel de los diferentes contactos, hace difícil el análisis de la respuesta dinámica del suelo al utilizar los programas o algoritmos disponibles.