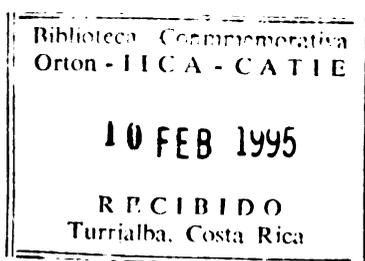


**ANALISIS DE LA AMENAZA DE LICUEFACCION,  
LAVAS, LAHARES Y CAIDA DE CENIZAS  
VOLCANICAS EN LA REGION CARIBE  
NORTE DE COSTA RICA**



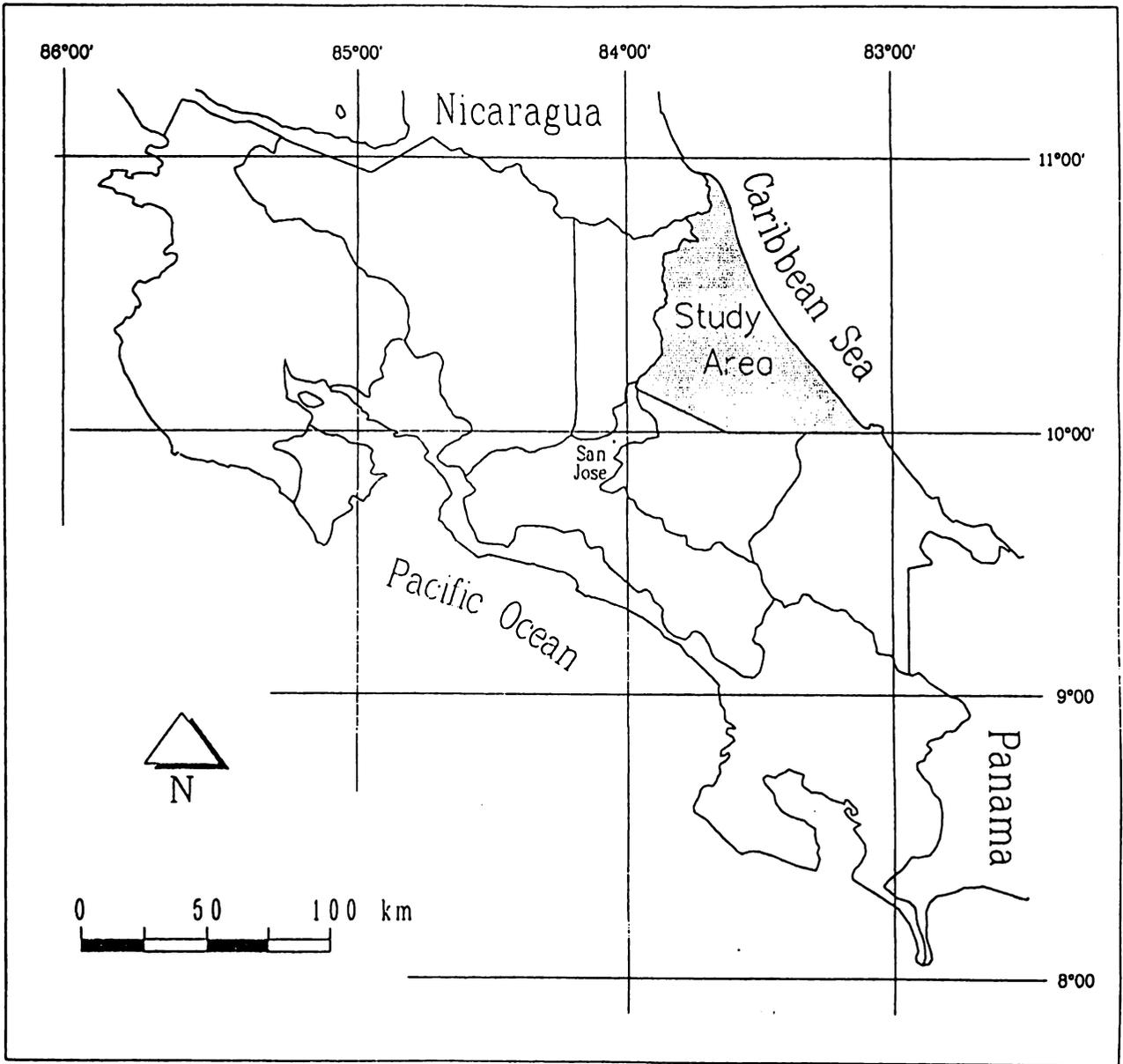
✓  
**Olga Matamoros V.**

**Enero 1994**

**CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE  
INVESTIGACION Y ENSEÑANZA - CATIE**

**AGRICULTURAL UNIVERSITY  
WAGENINGEN - AUW**

**MINISTERIO DE AGRICULTURA Y  
GANADERIA DE COSTA RICA - MAG**



## PREFACE

### General description of the research programme on sustainable Landuse.

The research programme is based on the document "elaboration of the VF research programme in Costa Rica" prepared by the Working Group Costa Rica (WCR) in 1990. The document can be summarized as follows:

To develop a methodology to analyze ecologically sustainable and economically feasible land use, three hierarchical levels of analysis can be distinguished.

1. The Land Use System (LUS) analyses the relations between soil type and crops as well as technology and yield.
2. The Farm System (FS) analyses the decisions made at the farm household regarding the generation of income and on farm activities.
3. The Regional System (RS) analyses the agroecological and socio-economic boundary conditions and the incentives presented by development oriented activities.

Ecological aspects of the analysis comprise comparison of the effects of different crops and production techniques on the soil as ecological resource. For this comparison the chemical and physical qualities of the soil are examined as well as the pollution by agrochemicals. Evaluation of the groundwater condition is included in the ecological approach. Criteria for sustainability have a relative character. The question of what is in time a more sustainable land use will be answered on the three different levels for three major soil groups and nine important land use types.

#### Combinations of crops and soils

	Maiz	Yuca	Platano	Piña	Palmito	Pasto	Forestal		
							I	II	III
Soil I	x	x	x		x	x			x
Soil II						x			x
Soil III	x			x	x	x			x

As landuse is realized in the socio-economic context of the farm or region, feasibility criteria at corresponding levels are to be taken in consideration. MGP models on farm scale and regional scale are developed to evaluate the different ecological criteria in economical terms or visa-versa.

Different scenarios will be tested in close cooperation with the counter parts.

The Atlantic Zone Programme (CATIE-AUW-MAG) is the result of an agreement for technical cooperation between the Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), the Agricultural University Wageningen (AUW). The Netherlands and the Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) of Costa Rica. The Programme, that was started in April 1986, has a long-term objective multidisciplinary research aimed at rational use of the natural resources in the Atlantic Zone of Costa Rica with emphasis on the small landowner.

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
FACULTAD DE TIERRA Y MAR  
ESCUELA DE CIENCIAS GEOGRAFICAS**

**ANALISIS DE LA AMENAZA DE LICUEFACCION, LAVAS, LAHARES  
Y CAIDA DE CENIZAS VOLCANICAS EN LA REGION  
CARIBE NORTE DE COSTA RICA**

**TESIS DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE  
LICENCIADA EN GEOGRAFIA FISICA**

**OLGA MATAMOROS VEGA**

**HEREDIA, COSTA RICA**

**1993**

**TRIBUNAL EXAMINADOR**

-----  
**Dr. Jorge Camacho Sandoval.**

**Decano Facultad de Ciencias de la Tierra y Mar.**

  
-----

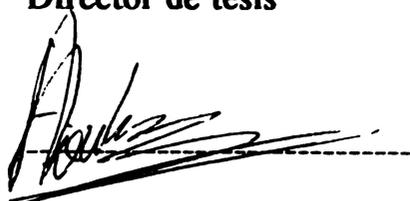
**M.A. Omar Arrieta Chavarría.**

**Director Escuela de Ciencias Geográficas.**

  
-----

**Dr. Eduardo Malavassi Rojas.**

**Director de tesis**

  
-----

**Msc. Andrés Nieuwenhuyse.**

**Lector de tesis**

  
-----

**Dr. Wilhelm Günther Vahrson**

**Lector de tesis**

**DEDICATORIA.**

**A MIS PADRES Y FAMILIA**

**QUIENES ME BRINDARON**

**TODO EL APOYO.**

## **AGRADECIMIENTOS**

**Mi más sincero agradecimiento al Dr. Eduardo Malavassi Rojas, por su dirección y asesoramiento durante la elaboración de la presente investigación.**

**Al Msc. Andrés Nieuwenhuys, lector de tesis, por sus invaluable consejos, sugerencias y apoyo en la realización de esta investigación.**

**Al Dr. Wilhelm-Günther Vahrson, lector de tesis, por las oportunas sugerencias en el manuscrito.**

**Al Dr. Sergio Mora Castro, por sus invaluable consejos, apoyo, sugerencias y contribución en esta investigación.**

**Al Msc. Jetse Stoorvogel y Lic. Amalia Ruiz, por la elaboración de la cartografía.**

**Al programa Zona Atlántica, Convenio CATIE-UAW-MAG, por el apoyo logístico, informativo y económico que me brindaron, en especial a Luis G. Quirós, Edgar E. Alfaro y a Don Mario, por su valiosa colaboración en la realización del trabajo de campo.**

**A todas aquellas personas que de una u otra forma me ayudaron en la realización de esta investigación.**

## **INDICE.**

**DEDICATORIA.**

**AGRADECIMIENTOS.**

**CAPITULO I. INTRODUCCION Y JUSTIFICACION. 1-3**

**CAPITULO II. OBJETIVOS.**

**2.1. Objetivo general. 4**

**2.2. Objetivos específicos. 4-5**

**CAPITULO III. CARACTERISTICAS GENERALES DEL AREA DE ESTUDIO.**

**3.1. Localización del área de estudio. 6**

**3.2. Geología. 6-7**

**3.3. Geomorfología. 8-9**

**CAPITULO IV. SISMICIDAD EN LA REGION CARIBE. 10-11**

**4.1. Sismicidad histórica en la Región Caribe. 12-13**

**4.2. Sismicidad reciente en la Región Caribe. 14**

**4.3. Fuentes Sísmicas en la Región Caribe. 15-16**

**CAPITULO V. EL FENOMENO DE LA LICUEFACCION.**

**5.1. Concepto. 17**

**5.2. Licuefacción. 18-20**

**5.3. Daños producidos por la licuefacción durante el sismo del  
22 de abril de 1991 en la Región Caribe Norte. 21-22**

**5.4. Observación de daños en algunas de las fincas bananeras. 23-25**

**5.5. Observaciones sobre los daños en las poblaciones afectadas por**

licuefacción.	26-31
5.6. Discusión de los datos.	32-35
<b>CAPITULO VI. METODOLOGIA.</b>	<b>36-39</b>
6.1 Metodologías para la estimación del potencial de licuefacción.	40
6.1 Método de Seed.	41-42
6.2. Método de Iwasaki.	43-44
<b>CAPITULO VII. MACRO-ZONIFICACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION.</b>	<b>45-47</b>
<b>CAPITULO VIII. EL VULCANISMO.</b>	<b>48-50</b>
8.1. El vulcanismo en la Región Caribe Norte.	51-54
8.2. Actividad volcánica del Irazú.	55
8.3. Actividad volcánica del Turrialba.	56
<b>CAPITULO IX. LAS AMENAZAS VOLCANICAS EN LA REGION CARIBE NORTE.</b>	<b>57-60</b>
	61-63
<b>CAPITULO X. CONCLUSIONES.</b>	
<b>BIBLIOGRAFIA.</b>	<b>64-69</b>
<b>ANEXOS.</b>	
ANEXO N°1.	
ANEXO N°2.	
ANEXO N°3.	
ANEXO N°4.	

## **1. INTRODUCCION Y JUSTIFICACION.**

Por su ubicación sobre la margen continental activa de Mesoamérica, lo cual también define su régimen climático, Costa Rica es un país que está expuesto a diversas amenazas naturales. Ellos pueden ser de origen geológico, como es el vulcanismo y la sismicidad (geodinámica interna) o de origen hidrometeorológico como lo son: las inundaciones y las lluvias intensas.

Costa Rica se caracteriza por presentar un alto nivel de actividad sísmica. Se producen en el tiempo miles de sismos de baja o moderada magnitud y algunos sismos de magnitud superior a 6.5. Por ejemplo y recientemente: Sámara Ms= 7.0 en 1978, Golfito Ms=7.3 en 1983, Cóbano Ms=6.5 en 1990, Nicoya Ms=7.0 y Valle de la Estrella Ms=7.5 en 1991.

Los sismos producen dos tipos de efectos, ellos son primarios o directos y secundarios o indirectos. Los primarios tienen que ver con los efectos directos sobre la infraestructura, causados por la liberación de energía sísmica durante las vibraciones y los secundarios tienen que ver con los efectos indirectos o procesos, que son consecuencia de la respuesta del terreno durante ese proceso de liberación de energía sísmica. Tal es el caso de los deslizamientos, la licuefacción y la apertura de grietas en el terreno a causa de sus deformaciones y rupturas.

Otro tipo de amenaza natural, común en las márgenes continentales activas es el vulcanismo. Las erupciones volcánicas destructivas se producen en el territorio nacional a razón de alrededor de una decena por siglo, a juzgar por su frecuencia durante los últimos 100 años.

La Universidad Agrícola Wageningen de Holanda, ha venido realizando desde Abril de 1986, un estudio en la Región Caribe de Costa Rica, el cual tiene por objetivo a largo plazo, la

**investigación multidisciplinaria aplicada al uso racional de los recursos naturales de la Región Caribe de Costa Rica, basándose además en los postulados del "Desarrollo Sostenible".**

**Un aspecto relevante de esa investigación, es la vulnerabilidad del sistema de producción agraria a causa de los eventos sísmicos y volcánicos, ya que para poder garantizar un desarrollo sostenible en una región como la Región Caribe Norte, es importante valorar los posibles efectos sobre la productividad de la futura actividad sísmica y del vulcanismo.**

**El terremoto de Telfre-Limón, del 22 de abril de 1991 ( $M_s=7.5$ ) cuyo epicentro original se encuentra alrededor de 40 kms al sur de Puerto Limón, Costa Rica (latitud de  $9^{\circ}37'$ , longitud  $83^{\circ}07'$ ) ocurrió a una profundidad focal de 17 km (Montero et al, 1991), originó grandes daños a la infraestructura regional y alrededor de 50 muertos (CNE, 1991). Este sismo indujo extensos efectos secundarios, comunes cuando ocurren grandes sismos: licuefacción del suelo, deslizamientos en alrededor de 2000 Km<sup>2</sup> (Mora y Mora, 1992), fracturamiento del suelo, así como alteraciones drásticas en el régimen hidrológico de las principales cuencas de la región, causadas por aumento en la carga de sedimentos. Esto ha producido deslizamientos, subsecuentes erosiones y una gran contaminación de las aguas de los ríos y aumentando la amenaza de inundaciones (Vahrson et al, 1992).**

**La presente investigación se ha enfocado sobre dos de los tipos de amenazas naturales de origen endógeno, la sismicidad y el vulcanismo. Al respecto de la sismicidad, se evalúa específicamente el fenómeno de la licuefacción, ocurrido durante el sismo del 22 de abril de 1991 en la Región Caribe Norte. Para ello, ha sido necesario considerar las unidades geomorfológicas, el substrato, nivel freático y la distancia al epicentro en que se encuentran las áreas afectadas. Se valoran a su vez, las fuentes sísmicas regionales y la licuefacción que podría ser inducida por**

**la sismicidad futura.**

**En relación con el vulcanismo, se ha considerado también el impacto de las emisiones de lava, ceniza y lahares, consecuencia de las erupciones de los volcanes Turrialba e Irazú. Estos han afectado sobre todo la porción oeste de la Región Caribe Norte. Ha sido tomado en cuenta también el posible impacto del vulcanismo tras-arco, dentro del área de estudio. El objetivo final de este trabajo es el de producir mapas de macro-zonificación de estos fenómenos, para que sean usados por planificadores, ingenieros y otros, para así lograr una mejor orientación en el uso futuro del suelo.**

## **2. OBJETIVOS.**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL:**

Evaluar la amenaza que representen los fenómenos asociados a la licuefacción y el impacto de las erupciones de lavas, cenizas y lahares en la Región Caribe Norte de Costa Rica.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- 1- Valorar el potencial de licuefacción y dividir por categorías las áreas expuestas a él, utilizando criterios geomórficos.
- 2- Caracterizar los suelos de las áreas afectadas por la licuefacción durante el sismo del 22 de abril de 1991.
- 3- Realizar una macro-zonificación del potencial de licuefacción, a escala 1:150000, que tome en cuenta los siguientes factores: suelo, topografía, nivel freático y sismicidad regional.
- 4- Con base en la información a disposición, caracterizar la amenaza que representan los fenómenos volcánicos (lavas, cenizas y lahares) en el piedemonte nor-oriental de la Cordillera Volcánica Central.

- 5- Elaborar un mapa, a escala 1:150000, en el que se presenten las coladas de lava, lahares y cenizas en la Región Caribe Norte.**

### **3. CARACTERISTICAS GENERALES DEL AREA DE ESTUDIO.**

#### **3.1. LOCALIZACION:**

El área estudiada cubre parte de la Región Caribe Norte de Costa Rica. Se encuentra localizada aproximadamente entre las coordenadas planas 220-320 y 540-640 de las hojas topográficas 1:50000 y las coordenadas geográficas 10° 00' y 10° 55' de latitud norte y 83° 00' y 84° 00' longitud oeste (ver mapa N°1).

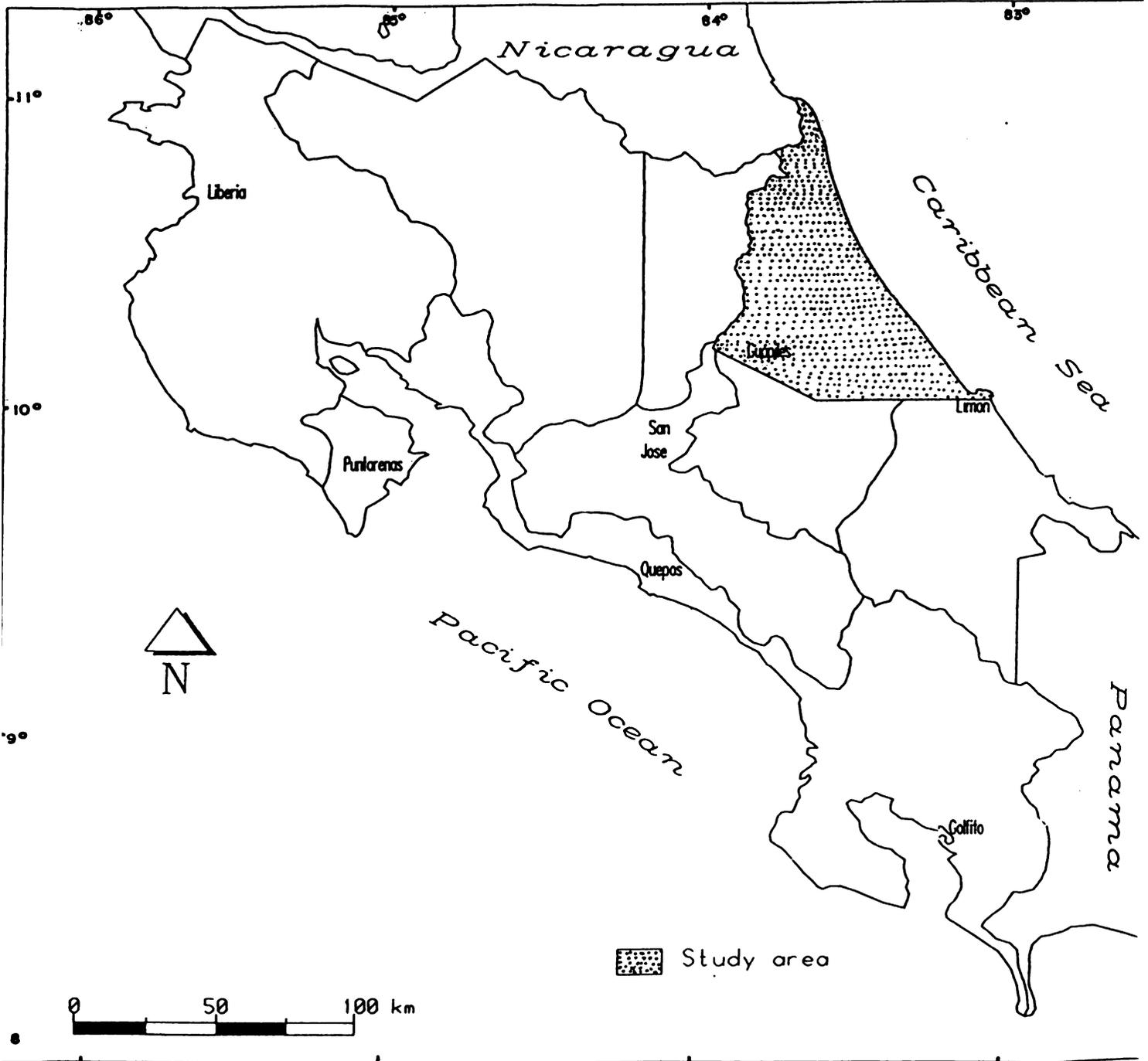
La Región Caribe Norte, para efectos de esta investigación, comprende el piedemonte de las Cordilleras Volcánica Central y de Talamanca hasta los 1000 metros de elevación y las llanuras del Caribe, ubicadas al Norte y Nor-oeste de Puerto Limón.

#### **3.2. GEOLOGIA:**

La cuenca de Limón se ha rellenado con varios miles de metros de espesor de rocas sedimentarias y sedimentos del Terciario Superior y Cuaternario (Weyl, 1980). Es normal encontrar que la secuencia sedimentaria presenta una gran variación de facies locales, tanto horizontal como verticalmente, o sea en el espacio y en el tiempo, conformando en conjunto una cuenca en estado de colmatación (Cervantes, 1988, Rivier, 1988).

Según Dengo (1968), la Cuenca de Limón se formó por sedimentación marina durante el Terciario en la fase orogénica que se inicia durante la última parte del Cretácico y que tuvo clímax durante el Eoceno. La sedimentación durante el Eoceno estuvo acompañada de actividad volcánica, lo cual es evidente principalmente en las rocas expuestas del lado Atlántico de Costa Rica y Panamá, donde la formación Tuis presenta numerosas intercalaciones de Andesita, Basalto

MAPA #1  
LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO



y capas tobáceas. Las rocas del Oligoceno Superior y Mioceno Inferior (Formación Uscari) no presentan indicios de actividad volcánica concomitante y por otra parte, se componen de sedimentos clásticos finos, marcando un lapso de relativa quietud tectónica, la que se rompe con los sedimentos clásticos de la Formación Gatún (Mioceno-Medio-Superior), que corresponden con un levantamiento acelerado de la Cordillera de Talamanca.

Durante el levantamiento de la Cordillera de Talamanca, al final del Mioceno, la cobertura sedimentaria del flanco noreste se despegó y deslizó por gravedad hacia las partes bajas de la cuenca, resultando un estilo tectónico de compresión hacia el noreste, definido por fallas inversas y sobrecorrimientos (Rivier, 1985).

En el presente, el choque de las placas del Coco, Caribe y la subducción de la corteza oceánica en el sureste de Costa Rica, hacen que esta región se caracterice por un estilo tectónico compresivo, el cual induce al fallamiento inverso.

El mapa geológico de Costa Rica, escala 1:200000 (1982), muestra que la mayoría de los sedimentos que actualmente se depositan en el área de estudio, son derivados de la erosión paulatina de las Cordilleras Volcánica Central y de Talamanca.

Al noreste de la Región Caribe Norte se encuentran algunos pequeños edificios volcánicos meteorizados y disectados, cuya edad corresponde con el Plio-Pleistoceno. Estos edificios parecen ser el producto de erupciones fisurales y son constituidos por basaltos olivínicos (Tournon, 1983).

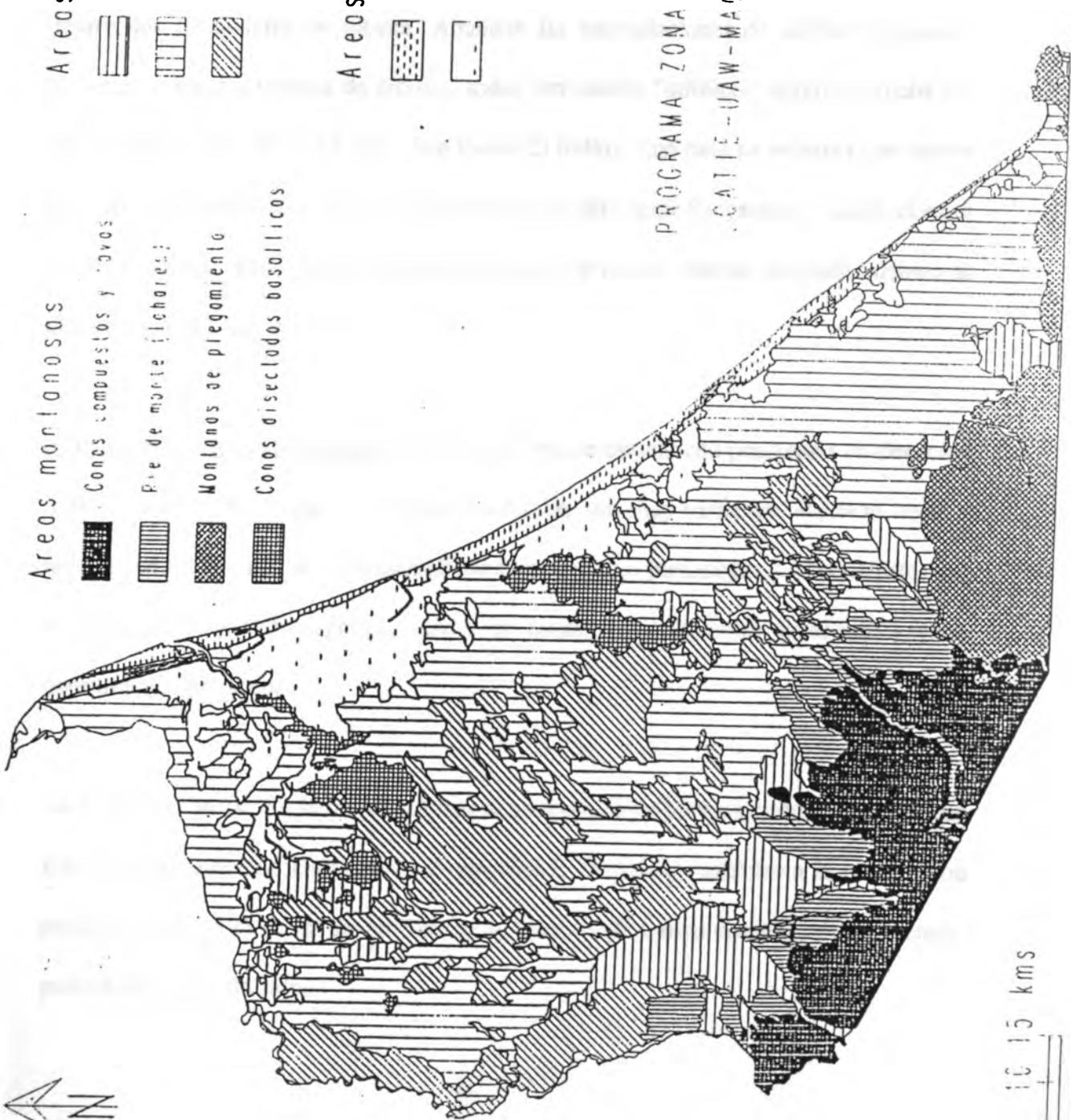
### **3.3. GEOMORFOLOGIA:**

Según Kroonenberg y Nieuwenhuys (1993), en la Región Caribe se presentan 5 unidades geomorfológicas (ver mapa N°2):

- 1: La Cordillera de Talamanca y la Península de Limón.** En el límite sureste de la zona estudiada se encuentran las estribaciones de la cordillera de Talamanca. Estas montañas están formadas por sedimentos marinos terciarios plegados del Oligoceno, Mioceno y Plioceno, que Coates et al (1992) denominan Limón Group, y por rocas sedimentarias continentales plio-cuaternarias de la Formación Suretka.
  
- 2: Conos volcánicos alcalino-basálticos antiguos.** Con altura de 20 hasta 310 m.s.n.m., abarcan restos de los volcanes pequeños del Terciario tardío y Cuaternario temprano. En su mayor parte, están fuertemente disectados y se caracterizan por pendientes escarpadas.
  
- 3: La Cordillera Central.** Abarca la laderas orientales de los volcanes activos Irazú y Turrialba, cubiertas por cenizas, coladas de lava y lahares. Los ríos principales que desaguan este sector son: Reventazón, Parismina, Toro Amarillo y Sucio. Estos ríos presentan abanicos aluviales extensos y una morfología de drenaje trezada en la llanura aluvial, sobre el abanico.

# MAPA GEOMORFOLÓGICO

Mapa #2



## Áreas montañosas

-  Conos compuestos y domos
-  Pico de monte (lechores)
-  Montañas de plegamiento
-  Conos disecados basálticos

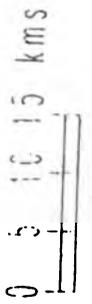
## Áreas fluviales

-  Abanicos aluviales
-  Abanico fluvial reciente
-  Llanura fluvial Pleistocénica disecada

## Áreas litorales

-  Borros costeros
-  Pantanos (turberos)

PROGRAMA ZONA ATLANTICA  
C.A.T.I.E.-U.A.W.-M.A.C.



**4: Las llanuras aluviales. Se distinguen tres sub-unidades:**

**a: Terrazas antiguas disectadas.** Se encuentran pequeñas terrazas que sobresalen de la llanura circundante por unos 2 hasta 15 metros. Estas lomas son terrazas pleistocénicas, formadas por depósitos fluviales y fluvio-volcánicos. En algunas partes presentan secuencias fluviales "fining upwards", ahora profundamente meteorizados, con frecuentes desarrollos de nódulos de gipsita. Abundan las intercalaciones de arcillas orgánicas, turberas antiguas y troncos de árboles, todas con edades "infinitas" según la prueba del  $^{14}\text{C}$  (> 50000 años BP, La Lucha, San Pedro-El Indio). Con base en su altura, se supone que fueron depositadas en épocas interglaciales (posiblemente Sangamon), cuando el nivel del mar era más alto. Durante la última glacial (Wiscon), fueron disectadas debido al descenso en el nivel del mar.

**b: La llanura fluvial Holocénica.** Atraviesa el área de estudio con pendientes en dirección norte o noreste. El drenaje y la textura del suelo son muy variables. Hacia el norte y noreste, en las llanuras se han desarrollado extensas áreas pantanosas. Las pendientes son menores del 1% y hay grandes áreas en donde los sedimentos arcillosos y poco consolidados predominan.

**5: La llanura costera.** En la llanura costera se encuentran las barras costeras arenosas, que son depósitos marinos Holocénicos desarrollados en franjas paralelas a la costa y con pantanos (estuarios) detrás de las barras. A menudo las barras costeras, tierra adentro, poseen depósitos de turba.

#### **4. SISMICIDAD EN LA REGION CARIBE.**

La sismicidad de Costa Rica es originada por la interacción de dos placas tectónicas, la del Coco que se subduce bajo la placa Caribe, a lo largo de la Fosa Mesoamericana y de cuya colisión resultan grandes liberaciones de energía y otros procesos tectónicos como el levantamiento de montañas.

La subducción, que causa la colisión de las placas, origina una zona de cizalla que da lugar a focos (hipocentros) de temblores de interplaca. También crea dislocaciones en las fallas regionales y locales que ocasionan los temblores de intraplaca de la placa del Caribe.

Como resultado de esta interacción se origina una zona sísmica inclinada hacia el noreste y se encuentra segmentada en el extremo sur (Güendel et al, 1993), por lo cual cambia su perfil sísmico al pasar de la región noroeste del país (donde los temblores alcanzan hasta 200 km de profundidad), a la región sureste, donde las profundidades son generalmente menores de 120 km (Burbach y otros, 1984, Güendel, 1986).

Según Güendel (1986) en Costa Rica existen tres tipos de sismos:

- 1- Sismos de interplaca o sea ubicados en la zona de rozamiento entre la placa del Coco y del Caribe. Tienen magnitudes máximas  $M_s=7.7$ , pero profundidad de foco mayor de 25 km. Por esta razón, a pesar de su elevada magnitud máxima, no son tan destructivos.
  
- 2- Sismos de intraplaca o sea producidos por deformación interna de la placa del Coco. Tienen poca importancia debido a que ocurren a gran distancia (corta afuera) o a gran profundidad por debajo de la placa del Caribe. Ellos ocasionalmente pueden producir

sismos de magnitud máxima cercana a 7.0, cerca del plano de subducción, pero en general son muy profundos ( $> 50$  km) y por ello poco destructivos.

- 3- Los sismos de intraplaca que tienen origen en la placa del Caribe, tienen magnitudes máximas que oscilan entre moderadas a grandes, según sea su ubicación geográfica, en tanto se caracterizan por tener una profundidad de foco menor que 25 km (Güendel, 1986). En el Valle Central las magnitudes máximas son 5.8, por ejemplo, sismo del 22 de diciembre de 1990, o típicamente alrededor de 5.5. En la región sureste del Caribe, las magnitudes máximas alcanzan 7.5. Los sismos de intraplaca que tienen origen en la región sureste del Caribe, son los que tienen el mayor potencial destructivo en Costa Rica por tener las más altas magnitudes registradas y ser muy superficiales.

La Región del Caribe había sido estimada como una área de bajo potencial sísmico o de potencial sísmico desconocido (Güendel, 1986), sin embargo históricamente, esta región fue afectada por sismos de gran magnitud, como se verá en el próximo capítulo.

#### **4.1. SISMICIDAD HISTORICA EN LA REGION CARIBE.**

La Región del Caribe de Costa Rica históricamente ha sido afectada por grandes sismos. La recopilación del Lic. Cleto González Víquez (1910) menciona 3 grandes sismos para la región de Limón, ocurridos en 1798, 1822 y 1916, siendo en todos los casos el sector de Matina el más afectado. Hay que tomar en cuenta, sin embargo, que en esta época esta parte de nuestro territorio era muy poco poblado y por lo tanto, no se encuentran datos de daños en los diversos centros poblados, con lo cual deducir una localización, al menos general, de la fuente sísmica generadora de las intensidades, magnitudes y el desarrollo de fenómenos secundarios (licuefacción, deslizamientos).

El 21 de Febrero de 1798 ocurrió un temblor en Matina. El mismo se sintió fuerte y ocasionó daños. Lo único que se conoce es que fue sentido con gran intensidad en Matina, lo que hace pensar que el epicentro se localiza, como máximo, a varias decenas de kilómetros de Matina.

Montero (1986) propone que se trata de un sismo originado por el proceso de convergencia de las placas del Coco y Caribe, (de interplaca) en los alrededores de la zona sísmica de Osa, localizada en el extremo sureste de la Fosa Mesoamericana.

El 7 de mayo de 1822 se originó el terremoto denominado como de San Estanislao. El mismo se sintió fuerte en Matina y produjo grietas en el suelo de gran profundidad. De las grietas salía agua salitrosa y arenillas negras (licuefacción), los ríos y bahías crecieron y ocasionaron inundaciones, también este sismo fue sentido en Panamá (González, 1910).

El 26 de abril de 1916, ocurrió un temblor cerca de Bocas del Toro, Almirante de

Panamá y Sixaola en Costa Rica (Miyamura, 1980). Es el evento más importante que se ha asociado al Cinturón Deformado del Norte de Panamá. El mismo causó severos daños en Almirante y Bocas del Toro, con intensidad (MM) entre VIII y XI (Boschini, 1989).

El periódico "El Imparcial" del 28 de abril de 1916, citado por Feldman (1984), informa que en Bocas del Toro, en varias calles, se abrieron grietas enormes y salía en algunas de ellas un riachuelo de agua dulce. En Matina, este sismo se sintió fuerte, produjo rajaduras en el suelo y salía agua con arena, a pesar de estar ubicado a más de 90 km del epicentro estimado.

El 7 de enero de 1953 hubo un temblor que afectó la ciudad de Limón. Según los datos proporcionados por los periódicos de la época, fue el temblor más fuerte que se haya sentido en muchos años, no hubo pérdidas humanas, pero sí materiales. Varios edificios fueron destruidos y hubo licuefacción entre Limón y Matina (Feldman, 1984).

El periódico "La Hora" del 8 de enero de 1953 citado por Feldman (1984) dice: "45 casas y comercios sufrieron daños en Limón, las pérdidas económicas son fuertes". La Prensa Libre del 7 de enero del mismo año, citado por Feldman (1984), relata que el violento temblor produjo un saldo de pérdidas por más de un millón de colones, es decir \$178571.43 ya que el tipo de cambio en aquella época era de \$5.60 (BCCR, 1986). Numerosos edificios fueron dañados, un puente en cercanías de Moín y otro en el ramal de Búfalo resultaron dañados.

Este sismo fue sentido en casi todo el país, lo mismo que en Panamá y Nicaragua. Algunos daños que produjo este sismo podrían estar relacionados con el fenómeno de licuefacción.

El epicentro no ha podido ser localizado con precisión, pero se cree que estuvo cerca de Puerto Limón y se podría asociar a un fallamiento local (Rojas, 1991).

## **4.2. SISMICIDAD RECIENTE EN LA REGION CARIBE.**

Hasta 1991 la Región Caribe de Costa Rica se consideraba como una área de bajo potencial sísmico. No obstante, los estudios realizados por geólogos y oceanógrafos de universidades norteamericanas, reconocía la existencia del Panamá Thrust Belt, como un sistema activo de fallas inversas (Silver et al, 1990).

Entre abril de 1984 y marzo de 1989, se localizaron un total de 125 sismos en toda la Región Caribe (Brenes, 1989), sin embargo estos sismos no producían daños considerables en la región por su moderada magnitud.

El 22 de abril de 1991 se produjo un terremoto en los alrededores del Valle de la Estrella con  $M_s=7.5$ , siendo el evento de intraplaca de mayor magnitud que se conoce en la historia sísmica de nuestro país y que reafirmó la existencia de fuentes sísmicas activas en la Región Caribe. Este sismo produjo graves daños en toda la Región Caribe. Entre ellos, la licuefacción estuvo relacionada con muchos de los daños, al igual que en otros sismos históricos.

Según los primeros trabajos publicados después del terremoto del Valle de la Estrella (Denyer et al, 1991., Rojas, 1991), en los sedimentos que cubren la planicie caribeña, el fenómeno de licuefacción se presentó desde el oeste de Matina hasta Bocas del Toro (Panamá). Sin embargo este fenómeno fue más representativo en las áreas costeras.

En los sectores de Matina y Changuinola los daños más importantes fueron causados por la licuefacción, al igual que en: Zent, Bataán, Estrada, 28-23-24 Millas, Bristol, Davao y Boston. La mayoría de los daños fue en viviendas, puentes y carreteras. Este sismo también ocasionó una subsidencia en los alrededores de Boca Matina (De Obaldía et al, 1991).

### **4.3. FUENTES SISMICAS DE LA REGION CARIBE.**

Se pueden distinguir tres fuentes sísmicas regionales (ver mapa N°3).

La primera fuente es la del sureste del litoral Caribe, que es la fuente sísmica causante del sismo del 22 de abril de 1991. Antes de este evento, esta fuente sísmica había producido numerosos eventos de magnitud  $<3.3$  según el catálogo del OVSICORI (De Obaldía et al, 1991), el cual abarca información a partir de 1984. Esta fuente sísmica está asociada al sistema de fallas inversas del norte de Panamá y a la prolongación del mismo hacia tierra adentro (oeste), a lo largo de la falla de desplazamiento lateral izquierda de Moravia de Chirripó (Montero et al, 1991).

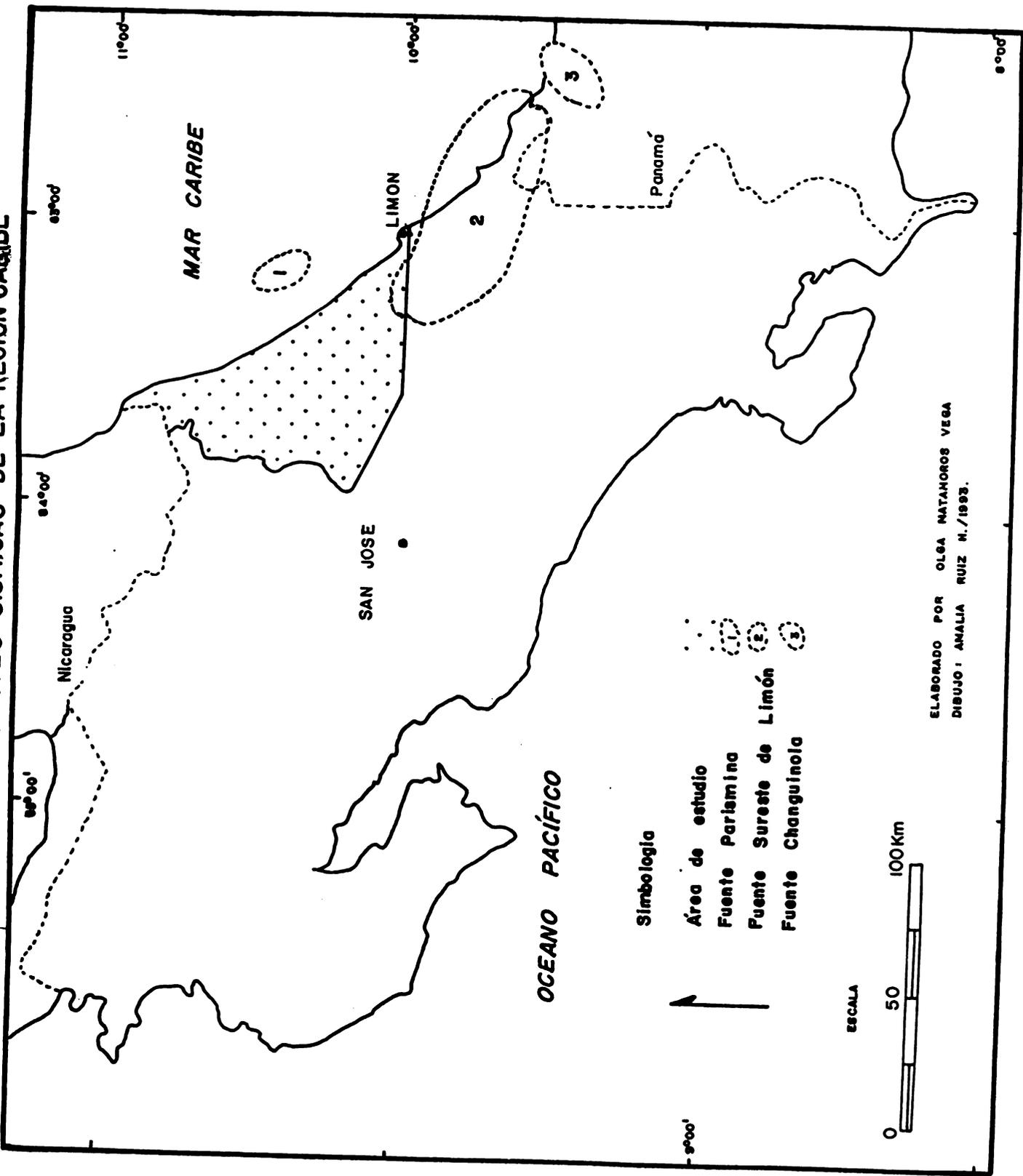
La segunda es la fuente de Parismina, que se caracteriza por tener hasta la fecha una sismicidad menor que la primera y con magnitudes inferiores a 3.1 durante un período 1984-1989 (Brenes, 1989).

Existe una tercera fuente, en el territorio panameño, con varicentro en el sector de Changuinola, la cual que es poco conocida y que presenta mecanismos focales de fallamiento normal (Montero et al, 1991).

Los grandes sismos en la región de Limón, han ocurrido en los años 1798, 1822, 1916, 1953 y 1991. La magnitud del sismo de 1916 fue de  $M_s=7.4$  y la de 1953  $M_s=5.3$  (Güendel, 1986). La magnitud del sismo de 1991 fue de  $M_s=7.5$ . Se desconoce la magnitud de los sismos ocurridos en 1798 y 1822.

En los sismos de 1822, 1916, 1953 y 1991 aconteció en mayor o menor grado el fenómeno de licuefacción en la vecindad de Matina. Según la información histórica de los daños

# MAPA No.3 FUENTES SISMICAS DE LA REGION CARIBE



ELABORADO POR OLGA NATAHOROS VEGA  
DIBUJO: ANALIA RUIZ M./1993.

en relación a su amplitud y distribución, lo cual conlleva a considerar de que es posible, que hayan sido generados por la misma fuente regional, es decir, en el sureste del litoral Caribe. Las rupturas en ella pueden ocurrir en episodios, en los cuales diversos segmentos de una falla o de fallas distintas pertenecientes al mismo sistema de fallas inversas liberan toda o parte de su energía acumulada. Por ejemplo, el sismo de 1916 no es igual al de 1991 pues la infraestructura ferroviaria bananera de Limón a Siquirres no sufrió daños en 1916 y ya estaba construida, entonces por ello es posible que se trate de un sismo de la misma fuente, pero en distinta falla o con una área de ruptura diferente.

En el caso de la fuente de Parismina hasta la fecha, no se han dado sismos históricos de gran magnitud que pudieran ocasionar el fenómeno de licuefacción.

Con respecto a otras fuentes como las fallas transcurrentes de Moravia de Chirripó que se movieron con la fuente del Sur de Limón, no tienen magnitudes adecuadas para que se produzca licuefacción; además la distancia al epicentro posiblemente va a ser mayor y estarían un poco más alejadas de la zona con substratos apropiados.

Finalmente los sismos de interplaca tienen grandes distancias epicentrales (> de 150 km), por lo que es razonable que no presenten licuefacción.

De acuerdo con el tiempo transcurrido entre los grandes sismos históricos conocidos, se puede deducir que el período de recurrencia de los grandes sismos para toda la región podría ser de 24 a 94 años (Montero et al, 1991), con un promedio de 38 años.

El sismo del 4 de mayo de 1991, generado en la fuente de Changuinola, no produjo licuefacción en la vecindad de Puerto Limón, sino tan solo en Bocas del Toro, Panamá.

## **5. EL FENOMENO DE LA LICUEFACCION.**

### **5.1. CONCEPTO:**

La licuefacción es originada por el reacomodamiento de las partículas sólidas (granos) como resultado de las vibraciones producidas por un sismo. Al reducirse los espacios intergranulares se incrementa la presión de poros, por lo que la presión de contacto entre los granos disminuye, al igual que la resistencia del suelo. Como consecuencia, el suelo se comporta como un líquido denso y en algunos casos, las estructuras enterradas pueden llegar a flotar. Por otro lado, el agua es desplazada hacia la superficie y arrastra partículas de suelo que se acumulan en forma de pequeños volcanes de arena. Esta es una de las más típicas y claras evidencias superficiales de la licuefacción. Sin embargo, hay otras evidencias como son: agrietamientos del suelo, asentamientos diferenciales y desplazamientos laterales del suelo. La licuefacción trae como consecuencia que las obras de ingeniería ubicadas sobre ellos como los rellenos compactados de carreteras se fracturen y cedan, ocasionando rupturas y grandes grietas (CNUAH, 1991).

## **5.2. LICUEFACCION:**

La licuefacción es causada por temblores con magnitudes superiores a 5.5 en la escala de Richter y dentro de un radio de hasta cientos de kilómetros del epicentro, dependiendo de la magnitud y de las condiciones del sustrato. (Leeder, 1982).

Los granos suspendidos por el violento escape del agua pueden ser transportados hasta la superficie, formando de volcanes de arena con diámetros y altura hasta de 1 m y conos de un ángulo ascendente a  $16^\circ$  (Gill y Keunen, 1958).

Los resultados de numerosos estudios, resumidos por Mulilis (1977), confirman que el inicio de la licuefacción es precedido de la saturación de las arenas. El desarrollo de este fenómeno depende sobre todo del tipo de suelo, porosidad, el efecto inicial de la presión, la intensidad, duración y magnitud de un temblor. Según estos estudios, para que la licuefacción se manifieste en la superficie, el ambiente físico tiene que cumplir varias condiciones. Una de ellas es que la profundidad de las capas de arena sea menor de 20 metros. La profundidad del nivel freático, es otra condición de gran importancia, es la base para que las arenas se saturen y puedan alcanzar la superficie. La profundidad del nivel freático debe ser menor a 5 metros. Entre menor cantidad de arcilla, es mayor la probabilidad de la existencia de licuefacción. El contenido de las partículas de arcilla debe ser inferior al 10% (Jennings, 1978).

Investigaciones realizadas por Wong, Seed y Chan (1975) en pruebas de laboratorio y por Finn, Yong y Lee (1978) en estudios de campo, se concluye que las gravas finas también podrían estar sujetas a la licuefacción y que el grado de licuefacción.

Según Kuribayashi y Tatsuoka (1975), las evidencias de licuefacción en el sustrato aparecen como:

- **Chorros de agua con arena o lodo en flujos a través de grietas en el suelo.**
- **Expulsiones de arena que se acumulan en "volcanes".**
- **Hace flotar los pilotes de madera y en las construcciones que se encuentran en los cauces de los ríos.**

**También, estos autores en estudios realizados en los terremotos ocurridos en el Japón, han establecido una relación entre la magnitud y la distancia máxima del epicentro en sitios licuados. Concluyen que para una magnitud superior a 7.0, la licuefacción puede ocurrir a una distancia de más de 60 km del epicentro.**

**Sauter (1989), menciona que en ensayos de laboratorio y experimentos de campo han demostrado que el estado de licuefacción se presenta únicamente en suelos saturados y poco densos. Las arenas y las arenas limosas sin consolidar tienen la mayor probabilidad de producir el fenómeno de licuefacción. Los principales factores que influyen en el potencial de licuefacción de un suelo son:**

- **Las características y composición granulométrica de la arena.**
- **La densidad relativa y la resistencia a la penetración.**
- **La profundidad del nivel freático y presión de confinamiento.**
- **Las características del movimiento del terreno (contenido de frecuencias, intensidad y duración de la sacudida).**

**Las arcillas por ser plásticas, son menos propensas a la licuefacción; sin embargo existen arcillas sensibles en las cuales un estado de alta presión de poros debido a cargas repetidas o**

**cíclicas causa una pérdida de resistencia y grandes deformaciones, por lo que también se habla de licuefacción. En pruebas con resistencia a la penetración (SPT) en Nigata, Japón, se determinó que los suelos con resistencia menor de 15 golpes son susceptibles a la licuefacción, en cambio en suelos con resistencia superior a 20 golpes no están propensos a sufrir licuefacción.**

### **5.3. DAÑOS PRODUCIDOS POR LA LICUEFACCION DURANTE EL SISMO DEL 22 DE ABRIL DE 1991 EN LA REGION CARIBE NORTE.**

En esta sección se presenta una breve relación de los daños ocurridos por el sismo, según los informes de la Comisión Nacional de Emergencia.

El sistema de acueductos y alcantarillados sufrió daños en las estructuras y tuberías ubicadas entre Siquirres y Limón, además de 28 Millas, Matina, Estrada, Zent y Bataán.

Los centros educativos de las localidades de Bataán, Siquirres, Matina, Bristol, Estrada, 28 Millas, Baltimore y Limón, sufrieron daños.

Gran cantidad de viviendas fueron afectadas, como se observa a continuación:

#### **VIVIENDA.**

<b>LUGAR</b>	<b>TOTAL</b>	<b>N.RECUPERABLE</b>	<b>DAÑOS MAY.</b>	<b>DAÑOS MENORES</b>
Bataán	761	304	273	184
Matina	1035	702	225	108
Cariari	30	5	15	10
Liverpool	239	61	97	81
Siquirres	227	65	115	47
Limón Centro	298	68	155	80

Fuente: Comisión Nacional de Emergencia, 1991. Plan regulador para la emergencia de

**la Zona Atlántica.**

**En el sector agropecuario, y en especial las fincas bananeras sufrieron grandes pérdidas en su infraestructura, con un costo de \$29.4 millones. Además, deben agregarse \$28.6 millones de pérdidas originadas por la incapacidad de transportar a los puertos de embarque del banano, durante un período variable entre 1 y 10 semanas (CNE, 1991).**

#### **5.4. OBSERVACION DE DAÑOS EN ALGUNAS DE LAS FINCAS BANANERAS.**

A continuación se hace referencia a los daños sufridos por compañías bananeras afectadas durante el terremoto, según la información ofrecida por los gerentes de dichas compañías. Esta información fue facilitada por medio de entrevistas abiertas realizadas por la autora.

##### **FINCA KOPEMAZ:**

Se localiza en Zent y cubre una superficie de 230 ha. Sufrió grandes daños en la producción, con aproximadamente €50 millones de pérdidas. En esta compañía, de 75 casas fueron afectadas 40 con rajaduras en el repello; en algunas, el piso se hundió. El drenaje subterráneo y superficial fue afectado, las mangueras se desnivelaron. Más de 150 cajas/ha se perdieron por un período de 28 días. Además de 7 a 9 libras/racimo se perdieron, es decir, más o menos el 50% de la fruta se malogró. Entre 150 y 200 plantas se cayeron. Ello es atribuido, según el entrevistado, a que disminuyó la capacidad del suelo de retener nutrientes; debido a que las raíces se reventaron produciendo heridas en la planta y a la vez su descomposición.

En relación con el peso de la fruta antes del sismo, la relación del número de cajas/racimo era de 1.45 (caja y media); actualmente es de 1.24 (caja y cuarto), es decir, el rendimiento de la producción es un 25% más bajo.

En las plantaciones, por todas partes salía agua con arena, formándose "volcanes". En todas las bananeras se presentó este problema. Los trabajadores fueron afectados psicológicamente, lo que afectó las labores agrícolas durante 3 meses (Ing. Arturo Zúñiga Ross, gerente y propietario; 1992, comunicación oral).

### **FINCA LA LUISA (AGROPECUARIA MATINA):**

Ubicada en Matina con una superficie de 162 ha. Tuvo una pérdida de €60 millones en la producción. Fueron dañados 24 puentes, 1920 cajas se perdieron y 24 casas caídas. El cable vía se desalineó y los cable vías secundarios fueron dañados. El dique se destruyó, pues se formaron grandes rajaduras y hundimientos en 3 tramos con un total de 2933 metros. Los drenajes, en algunas secciones, se sedimentaron con arenas muy finas que emergieron del fondo, con un total sedimentado de 47100 m<sup>3</sup> que debieron ser dragados posteriormente. En relación a las viviendas, de las 26 casas, una casa se cayó, 10 se dañaron y en 15 se tuvo que cambiar las bases. La red de tuberías se dañó considerablemente (Ing. Walter Herrera, 1992, comunicación oral).

### **FINCA LOS LAGARTOS (AGROPECUARIA MATINA):**

Se localiza en Matina y posee una extensión de 290 ha. Tuvo una pérdida de 2947 cajas, lo que representó una pérdida de €2127696.

Alrededor de 600 m del canal secundario fueron sedimentados con arena muy fina, que emergía del fondo del canal (Ing. Walter Herrera, 1992, conversación personal).

### **FINCA BANASOL:**

Se localiza en Estrada y su superficie es de 78.69 ha. Fue afectada prácticamente en su totalidad. La planta empacadora tuvo que reconstruirse. Los canales, gavetas y diques tuvieron que ser reconstruidos (Cristian Vargas, 1992, conversación personal).

## **FINCA CARRANDI II:**

Se encuentra en Matina, con una extensión de 444 ha. Tuvo una gran pérdida en la productividad y en la fruta. La carretera interna se destruyó en un trayecto de 500 m. El drenaje subterráneo se dañó en unas 230 ha y el drenaje abierto fue afectado. Las viviendas presentaron considerables daños estructurales y en algunos casos se hundieron hasta 50 cm. El 50% de los cable-vías fueron afectados y el 100% del cable aéreo. En la finca la licuefacción fue importante y se formaron huecos de 50 cm de profundidad y salía arena y limo ( Luis Chantón, 1992 Conv.pers.).

## **5.5. OBSERVACIONES SOBRE LOS DAÑOS EN LAS POBLACIONES AFECTADAS POR LICUEFACCION.**

Según la información del Regidor Municipal Rolando Geayle Thompson hubo licuefacción en: Estrada, Cuba, Bataán, Boston, Matina, 27-28-23-24 Millas y Zent. Se observaron volcanes de arena que en algunos casos alcanzaron hasta 1.5 m de altura. Además se grietaron las carreteras y viviendas.

### **MATINA:**

Ubicada a 54 km del epicentro, varias edificaciones de madera colapsaron, algunos de los puentes y carreteras fueron dañados seriamente. Se formaron grietas en el suelo y hubo licuefacción por todas partes; incluso hubo deformación horizontal en las tierras llanas. Las plantaciones bananeras fueron afectadas, con grandes pérdidas económicas.

### **BATAAN:**

A una distancia de 57 km del epicentro. La licuefacción fue moderada, las calles se grietaron y salía agua con arena, obstruyendo incluso los canales de las bananeras. Las viviendas de cemento tuvieron daños severos y varias casas se cayeron.

### **ESTRADA**

Se localiza a 52 km del epicentro. La licuefacción fue moderada, se produjeron eyecciones de agua con arena en algunas partes, causó daños en carreteras que se fracturaron y en viviendas.

**En las plantaciones bananeras hubo pérdidas en la producción, plantas caídas y en algunos casos putrefacción.**

#### **ZENT:**

**Se ubica a 48 km de distancia del epicentro. La licuefacción que apareció fue importante. Se formaron grietas en el suelo y carreteras. Hubo eyecciones de agua y arena que formaron volcanes. Varias construcciones de madera sufrieron colapso total, las bases de los puentes fueron levantadas y desplazadas del sitio original. Las tuberías y acueductos fueron dañados. En las plantaciones bananeras hubo pérdidas en la producción, plantas caídas y putrefacción de las matas.**

#### **28 MILLAS:**

**Se encuentra a 59 km del epicentro. Se formaron grietas en el suelo y en algunas partes salía agua con arena. Las viviendas sufrieron daños, con agrietamiento en las paredes y piso. Además, las carreteras se fracturaron con grandes grietas, los acueductos fueron afectados.**

#### **BARBILLA:**

**A 57 km de distancia del epicentro. Hubo daños en las carreteras, líneas férreas y acueductos. Se dieron eyecciones de arena y barro y aparecieron cráteres de arena. También ocurrieron algunos daños en viviendas mal construidas.**

**BOSTON:**

Se encuentra a 46 km del epicentro. Las construcciones de madera sufrieron graves daños hasta colapso total; algunas viviendas se hundieron y otras se cayeron, las tuberías y acueductos se dañaron, se formaron grietas en el suelo (algunas de 0.5 m de ancho), eyecciones de arena y la formación de volcanes, incluso dentro de las plantaciones de banano, lo que conllevó a la obstrucción de los canales.

**BOCA DEL RIO MATINA:**

Se ubica a 55 km del epicentro. La licuefacción fue importante. Las emanaciones de agua a presión alcanzaron alturas de más o menos 1.5 m. Se formaron grandes grietas en la carretera y el suelo; algunos árboles perdieron la verticalidad. Las viviendas se destruyeron y los habitantes tuvieron que desalojar el área, en parte porque fue afectada por inundaciones.

**BRISTOL:**

Se encuentra a 49 km del epicentro. La licuefacción en el lugar fue escasa y ocurrió en forma local y solo en algunas partes hubo volcanes de arena.

**SANTA MARTA:**

Se encuentra a 59 km del epicentro. La licuefacción fue escasa.

**DAMASCO:**

Se localiza a 60 km del epicentro. La licuefacción escasa y localizada.

**BERTA:**

A una distancia de 60 km del epicentro. La licuefacción fue escasa.

**SAHARA:**

Se encuentra a 62 km del epicentro. Hubo licuefacción escasa y localizada.

**FREEMAN:**

Hubo licuefacción, aparecieron grietas pequeñas y volcanes de arena. En las bananeras los canales se obstruyeron y unas dos casas se cayeron. En la plaza apareció mucha licuefacción.

**LA LUISA:**

A una distancia de 54 km del epicentro. La licuefacción fue escasa.

**BARMOUTH:**

Se encuentra a 58 km del epicentro. La licuefacción existente fue moderada; se formaron volcanes de arena y grietas.

**BALTIMORE:**

Se localiza a 48 km del epicentro. Hubo licuefacción en forma local, pues apareció solo en algunos lugares.

## **LUZON:**

Se encuentra a 58 km del epicentro. La licuefacción fue escasa, solamente en algunos lugares.

### **Otros lugares:**

Finalmente, se puede decir que los daños ocasionados por el sismo al noroeste del Río Reventazón/Parismina fueron mínimos.

En otras poblaciones de la costa del Caribe Norte, como Barra del Colorado a 132 km del epicentro y Tortuguero a 110 km del epicentro, las viviendas mostraban mucho menos daños que en Parismina y otras áreas más cercanas al epicentro. No pudieron ser localizados indicios claros de licuefacción.

### **Otras observaciones:**

Se pudo comprobar un hundimiento por licuefacción en los alrededores de Boca Matina, el cual alcanzó alrededor de 0.5 m. Se considera que está relacionado con fenómenos de licuefacción y asentamientos diferenciales durante el sismo (Denyer y Arias, 1991).

En los canales de drenaje y lagunas naturales se presentaron algunos problemas, ya que la licuefacción indujo flujos de arena, como es el caso de los canales de Tortuguero, que quedaron obstruidos cerca del Río Matina.

Según datos de nivelación sugieren la existencia de un complejo patrón de levantamiento continental de alrededor de 1.5m en la vecindad de Puerto Limón entre el muelle de Moín y la playa Portete y un mínimo de 0.36 m ubicado al oeste del cementerio de Limón. Los cambios

**de pendiente como resultado del levantamiento co-sísmico de esta área no son uniformes, excepto en el sector Piuta-Hospital. Por esta razón y por su magnitud, los cambios co-sísmicos inciden directamente en el régimen de drenaje y afectaron algunas obras de infraestructura en que los cambios de nivel son importantes (por ejemplo: drenajes).**

## **5.6. DISCUSION DE LOS DATOS.**

Para efectos de esta investigación se muestreo el suelo en 15 lugares: Matina, Bataán, Zent, Boston, Bristol, Davao, 23-24-28 Millas, Barbilla, Entrada a Estrada, Boca Matina, Cultivez, Siquirres y Perla (ver mapa N°4).

Las áreas que presentaron fenómenos de licuefacción se encuentran geomorfológicamente en las llanuras fluviales, llanuras de inundación y depósitos de playa (cuadro N°1). Las áreas ubicadas en depósitos de playa fueron las más afectadas. Las áreas ubicadas en las llanuras de inundación y depósitos fluviales fueron moderadamente o poco afectadas por la licuefacción, excepto en el caso de Perla y Siquirres, que se encuentra en una llanura de inundación y depósito fluvial, pero que no fueron afectados por la licuefacción.

La textura del suelo es otro de los factores que interviene en el desarrollo del fenómeno de la licuefacción. En las áreas muestreadas, el suelo varía entre arcilloso-limoso a arenoso. En algunos lugares el suelo es muy heterogéneo, los suelos predominantes son arenosos y limosos, de poca cohesión, son los licuables. En el anexo N°2 se observa la textura para cada uno de los sitios muestreados.

En el caso de Siquirres, con una textura arenosa, no presentó licuefacción. Esto puede ser debido a la profundidad del nivel freático (> 5m) y a la distancia al epicentro (> 68 km).

La profundidad del nivel freático es importante para el inicio de la licuefacción. En los sitios muestreados, las áreas que presentan una capa freática inferior a 0.5 m son las más fuertemente afectadas, mientras que las menos afectadas lo tenían a una profundidad mayor de 3.5 m. En las áreas con un nivel freático más profundo que 5 m no hubo licuefacción, como es

el caso de Perla y Siquirres. En el caso de Barbilla hubo poca licuefacción, pero lo que pudo haber influido es la distancia al epicentro y la textura que presenta.

Especialmente a una distancia epicentral superior de 67 km no ocurrió licuefacción, como es el caso de Siquirres y Perla, allí no existen condiciones de granulometría y nivel freático adecuados.

Referente a la granulometría de las arenas, el tamaño de las partículas varían de grano fino a grano grueso, diámetro  $< 2000\mu\text{m}$  (ver anexo N°3). Las arenas presentan una buena selección y la forma que tienen son subredondeadas.

Según las observaciones de campo, en los 15 sitios muestreados la licuefacción ocurrida puede categorizarse en: Intensa: Boca Matina y Matina. Moderada: Zent, Bataán, Estrada y Boston. Leve: Bristol, 23-24-28 Millas, Davao, Barbilla y Cultivez. Nada: Siquirres y Perla.

En relación con el número de golpes obtenidos por el SPT, se ha podido determinar que cuanto menor sea la cantidad de golpes que se requieran para la penetración del barreno, menos consistente y resistente y más propensos a la existencia de licuefacción es el suelo.

Como se observa en el cuadro N°2, Boca Matina es el lugar en donde menor cantidad de golpes fue registrada. En este caso la cantidad de golpes fue inferior a 10 golpes. Por el contrario, el mayor número fue registrado en Bristol, con un máximo de 40 golpes.

En el caso de Barbilla, también se necesitaron cerca de 40 golpes, debido a la existencia de capas con gravas que obstruyen la penetración del barreno.

Como se observa en el cuadro N°2, el método de Iwasaki predice que para un valor de la aceleración de 0.25g en el terreno, imprimida por las ondas sísmicas, existen 6 lugares que poseen un bajo potencial de licuefacción. Para una aceleración de 0.40g, este método predice que

todos los lugares excepto dos no son licuables. A mayor aceleración producida por un sismo, es pues, más probable que ocurra la licuefacción.

Desafortunadamente, la aceleración del sismo del 22 de abril no fue medida en esta región por la falta de acelerógrafos. Los valores de 0.25g y 0.40g fueron escogidos por cuanto se supone que representan valores razonables en el área de estudio. Dado que las predicciones del método de Iwasaki, utilizando valores de 0.40g, concuerdan mejor con la licuefacción observada para 7 lugares estudiados, se considera que este valor es el más cercano al valor real que alcanzó la aceleración durante el sismo.

El método de Seed predice la licuefacción para todos los lugares a ciertas profundidades y también coincide con el método de Iwasaki en que a mayor aceleración, más probable es que se produzca la licuefacción.

Según ambos métodos, en Boca Matina aparece la licuefacción con cualquiera de las dos aceleraciones, por ser un suelo poco denso, arenosos y con un nivel freático alto.

Con el método de Iwasaki, se considera que en Perla y Bristol, para ambas aceleraciones, el suelo no es licuable mientras que con el método de Seed solamente a ciertas profundidades, debido a que el nivel freático es profundo, 5m y 3.5m respectivamente. El método de Iwasaki pronostica mejor la ausencia de licuefacción en Perla y la licuefacción leve en Bristol, de acuerdo con lo observado en el campo.

Con respecto al potencial de licuefacción, según se relaciona con el tamaño de las partículas (mm) de arena, en el cuadro N°2 se observa que los sitios muestreados Boca Matina, Zent, Bataán y Barbilla poseen un elevado potencial de licuefacción. Los suelos de los sitios 23 Millas, Bristol, Boston, Entrada a Estrada y Perla presentan un potencial de licuefacción leve, lo cual

coincide con la información obtenida durante el trabajo de campo, en relación con el desarrollo de fenómenos de licuefacción, excepto en el caso de Perla que no presentó licuefacción en la realidad.

Los gráficos obtenidos con el método SPT, los cálculos del factor de seguridad con los dos métodos Iwasaki y Seed y el potencial de licuefacción se encuentran descritos en el anexo N°4.

De acuerdo con la tabla de datos obtenida, cada lugar tiene sus condiciones propias que lo hacen susceptible al desarrollo de la licuefacción. En algunos lugares influyen más que otros los siguientes factores: la textura, el nivel freático, la distancia al epicentro, la densidad y compactación del suelo, plasticidad y tamaño de las partículas. En algunos sitios intervienen todos los factores.

CUADRO N° 1

LOGAR	DISTANCIA EPICENTRO	NIVEL FREATICO	TEXTURA	GRANULOMETRIA PREDOMINANTE	UNIDAD GEOCORPOLOGICA	DAÑOS POR LICUEFACCION
MATINA	54 km	1.5 m	FA-FL	<25µm	Llanuras fluviales	casas afectadas y caídas, puentes y carreteras fracturados, bananeras afectadas, alcantarillados afectados
BATAAN	57 km	2.5 m	FA-Pa	<425µm	Llanuras fluviales	grietas en el suelo, calles agrietadas, casas caídas
B. MATINA	55 km	0.5m	a	<425µm	Depósitos de playa	destrucción total
BOSTON	46 km	2.5m	AL-P	<212µm	Llanuras fluviales	daños en carreteras y viviendas, acueductos y tuberías dañados, obstrucción en canales de bananeras
BRISTOL	49 km	3.5m	P-Pa	<425µm	Llanuras fluviales	daños menores en viviendas y carreteras
E. ESTRADA	52 km	3m	Pa-a	<425µm	Llanura fluvial	casas dañadas y caídas, grietas en el suelo, bananeras afectadas
STIGURES	68 km	>5m	a	>1000µm	Llanuras fluviales	no hubo daños
PEKLA	68 km	>5m	AL-FL	<425µm	Llanuras fluviales	no hubo daños
23 HILLAS	55 km	1m	FA-Pa	<212µm	Llanuras fluviales	pocos daños en viviendas y carreteras
28 HILLAS	59 km	1.5m	P-Pa	>1000µm	Llanuras fluviales	casas derrumbadas y caídas, daños en carreteras y acueductos
24 HILLAS	57 km	1.5m	FL	---	Llanuras fluviales	algunos daños en viviendas y carreteras
CULTIVEZ	67 km	4.5m	FA-FL	<425µm	Llanuras fluviales	no hubo grandes daños, las bananeras fueron afectadas
BARBILLA	57 km	>5m	a	<1000µm	Llanuras fluviales	daños en viviendas y carreteras
DAVAO	54 km	1.5m	FA-FL	>2000µm	Llanuras fluviales	pocos daños en viviendas
ZENT	48 km	2.5m	FL-a	>2000µm	Llanuras fluviales	daños en viviendas y carreteras, acueductos dañados

CUADRO N<sup>o</sup> 2

LUGARES	SPT* (golpes) N	FACTOR DE SEGURIDAD				POTENCIAL DE LICUEFACCION
		Metodo de Iwasaki		Metodo de Seed		
		0.40g	0.25g	0.40g	0.25g	
23 MILLAS	< 30	1.25-7m	no	0-4.45m	0-2.65m	Poco licuable
BOCA MATINA	< 10	0-7m	0.65-7m	0-7m	0-7m	Muy licuable
ZENT	< 31	1.25-7m	4.85-7m	0-2.65 y 3.45-4.05m	0-1.25m	Muy licuable
E. ESTRADA	< 20	2.25-5.85m	no	0-5.85m	0-2.45m	Poco licuable
PERLA	< 21	no	no	0-6.85m	0-5.05m	Poco licuable
BATAN	< 25	3.05-7.0m	no	0-4.05m	0-1.05m	Muy licuable
BRISTOL	< 40	no	no	0-3.65m	0-0.85m	Poco licuable
BOSTON	< 25	2.65-7.0m	no	0-5.85m	0-4.45m	Poco licuable
BARBILLA	< 40	0-3.25m	0-2.05m	0-2.05m	0-2.05m	Muy licuable

\* N spt proviene de su correlación con N dpl.

## **6. METODOLOGIA.**

La metodología usada en este trabajo consiste de 6 pasos:

- 1- Recolección de datos bibliográficos sobre sismicidad y erupciones volcánicas.
- 2- Utilización del mapa geomorfológico de la Región Caribe, elaborado por el Programa Zona Atlántica (Convenio CATIE-UAW-MAG), con el fin de identificar las unidades geomorfológicas existentes en el área de estudio.
- 3- El trabajo de campo se realizó con el fin de identificar todas las áreas en donde se presentaron fenómenos de licuefacción, para compararlas con aquellas en que no se presentaron. Esto con el propósito de diferenciarlas y determinar sus características propias.

Dicho trabajo se realizó de la siguiente manera:

- a- Se muestrearon 15 lugares representativos dentro del área en que presentó la licuefacción durante el sismo de 1991. Estos sitios seleccionados comparten una misma unidad geomorfológica, lo que implica un mismo origen y por ello algunos de los suelos son parecidos.

- b-** Se realizaron entrevistas a los habitantes de los diferentes sectores afectados por el sismo del 22 de abril de 1991. Las preguntas realizadas fueron las siguientes:
- ¿Ubicación de la persona durante el sismo?.
  - ¿Daños ocasionados por el sismo?.
  - ¿Se formaron volcanes de arena en el suelo y fracturas en las carreteras y viviendas?.
  - ¿Altura alcanzada por el agua con arena que salía del suelo?.
- c-** Entrevistas a gerentes de algunas compañías bananeras para conocer la magnitud de los daños causados en las plantaciones.
- d-** En cada uno de los lugares muestreados se determinó la profundidad del nivel freático. Dicha medición se realizó durante el período seco, por lo que los valores representan su nivel de máxima profundidad.
- e-** Por medio de un barreno se obtuvieron muestras a diferentes profundidades, mientras fuera posible. No se pudieron muestrear suelos muy compactados. Las muestras fueron analizadas según los métodos utilizados en el laboratorio de suelos del MAG para determinar la textura con el método de Boyoucos (Schweitzer et al, 1980). Se trabajó con las siguientes definiciones en cuanto a tamaño del grano se refiere:

- Arcilla, cuando el tamaño del grano es inferior a  $2\mu\text{m}$ .
- Limo, cuando las dimensiones varían entre 2 y  $53\mu\text{m}$ .
- Arena, cuando las dimensiones varían entre 53 y  $2000\mu\text{m}$ .
- La grava es mayor de  $2000\mu\text{m}$ .

En el caso de las muestras arenosas se les determinó la granulometría con mallas de diferentes tamaños,  $>2000$ ,  $2000-1000$ ,  $425-1000$ ,  $212-425$  y  $53-212\mu\text{m}$ , y finalmente la humedad natural.

- f-** El límite líquido de cada muestra fue medido con la Taza de Casagrande (metodología de Atterberg), los resultados obtenidos se encuentran en el anexo N°1.
- g-** Utilización de las metodologías instrumento DPL y SPT, que pueden determinar el grado de compactación y resistencia del suelo. Estos métodos consisten en aplicar un cierto número de golpes para forzar la penetración del barreno en el suelo en 30 cm. Para este caso se logró penetrar hasta 7 m de profundidad en todos los lugares muestreados: Barbilla, Boston, Zent, 23 Millas, Perla, Boca Matina, Bristol, Entrada a Estrada y Bataán. Para cada uno de los lugares se determinó el factor de seguridad con que se relaciona la resistencia del suelo a la licuefacción tomando en cuenta dos tipos de aceleraciones (0.40g y 0.25g), y aplicando los criterios de Iwasaki y Seed.

**Cuando el factor de seguridad, a cierta profundidad es inferior a 1.0, significa que el suelo es licuable. Por lo contrario sí es superior a 1.0 no es licuable.**

**Otro criterio adicional, para determinar el potencial de licuefacción del suelo, se fundamenta en la proporción del material con diámetros correspondientes a los tamaños de las arenas. Ello es posible mediante el análisis granulométrico y la obtención de las curvas respectivas.**

## **6.1. METODOLOGIAS PARA LA ESTIMACION DEL POTENCIAL DE**

### **LICUEFACCION**

Existen 2 métodos para determinar la licuabilidad de un suelo: el de Seed y el de Iwasaki (Iwasaki et al, 1978).

Los métodos de Seed y el de Iwasaki, utilizan "La prueba de penetración estándar" (SPT), lo que permite determinar la resistencia del suelo y su grado de compactación, entre otras cosas.

El ensayo de SPT, consiste en contar el número de golpes (N) necesarios para que la fonda se introduzca 30 cm dentro del suelo ( $N_{30}$ ).

Otro método, usado durante la investigación fue el DPL (ver figura N°1), es decir, "Penetrómetro Liviano Alemán", el cuál es una modificación del SPT, en la cual se utiliza el mismo número de valores, variando tan sólo el número de golpes, además de que el instrumento es prácticamente manual. En este caso se mide el número de golpes para una penetración de 10 cm ( $N_{10}$ ).

Existen fórmulas empíricas de correlación entre ambos métodos. Por ejemplo:

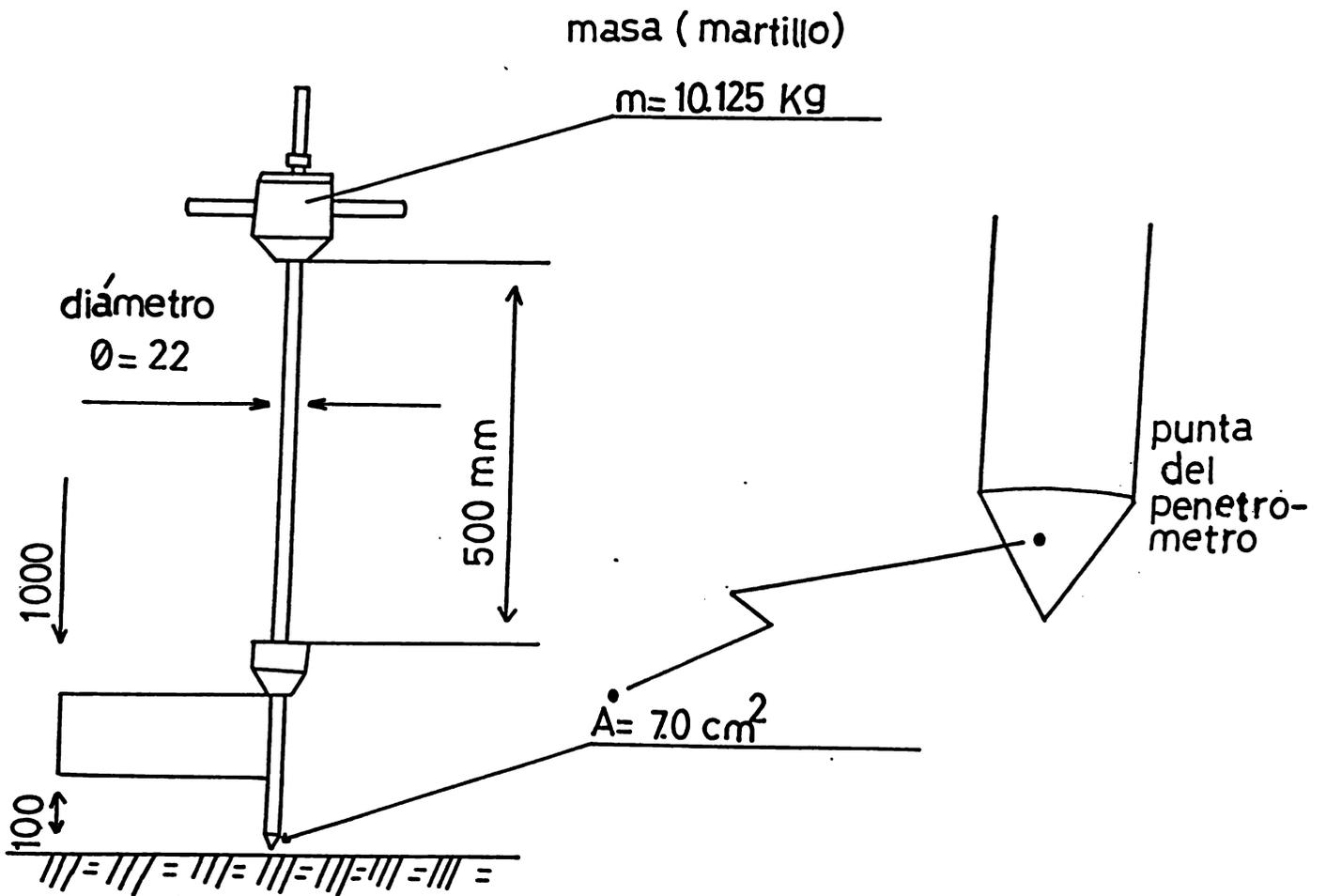
En arcilla:  $N_{30} = 0.6 * N_{10}$ , arriba el nivel freático cuando  $2 \leq N_{10} \leq 30$ .

En arena "pura":  $N_{10} = 0.34 * N_{30}$ , arriba el nivel freático cuando  $3 \leq N_{10}$ , DPL  $\leq 50$ .

En SPT en arena pura:  $N_{30} = 1.4 * N_{10}$ , DPL, arriba el nivel freático cuando  $3 \leq N_{10}$ , DPL  $\leq 50$ .

FIGURA N°1

ESQUEMA DEL DPL ( PENETROMETRO  
ALEMAN LIVIANO)



### 6.1.1. METODO DE SEED.

Es un método simplificado cuyo objetivo es el de determinar el potencial de licuefacción en los suelos. Los factores que intervienen son:

$G$  = El nivel freático.

$S_s$  = La densidad del suelo.

$a$  = La aceleración horizontal con respecto a la gravedad en el nivel de la superficie imprimida por el sismo.

$g$  =  $9.82 \text{ m/s}^2$ .

$ER_m$  = La energía sobre el equipo SPT,  $ER_m$ .

Para calcular el factor de seguridad en cada uno de los niveles es necesario tener:

$Z$  = La profundidad bajo la superficie.

$N_m$  = La cantidad de golpes obtenidos con el instrumento SPT.

$FC$  = El contenido de material fino (porcentaje pasando la malla #200).

$S_s$  = La densidad del suelo.

Los cálculos para cada profundidad son los siguientes:

- El peso dinámico,  $\tau_{sw}/\sigma_v$ .

$\tau_{sw}/\sigma_v = (0.65) * (a/g) * (\sigma_v/\sigma_v) * rd$ , donde:

$$\sigma_v = g * S_s * Z$$

$$\sigma_v = \sigma_v - g * 1 (Z-G)$$

$$rd = 1 - 0.015 * Z$$

- El factor de resistencia, CRS.

$$(N_1)_{60} = C_n * (ER_m/60) * N_m; \text{ donde}$$

$$C_n = (1/\sqrt{\sigma_v}) * (tsf)$$

$$tsf = (nPa)/100$$

ERm = Energía estimada en el SPT.

- Corrección para la fuerza vertical en la resistencia al peso.

$$(N_1)_{60} = (N_1)_{60} * K_s, \text{ donde:}$$

$$K_s = 1,600 - 0,007637 * \sigma_v + 0,000017687 * \sigma_v^2 - 0,000000013 * \sigma_v^3.$$

- Corrección para materiales finos.

$$(N_1)'_{60} = \text{sí FC} < 10\% \text{ entonces } (N_1)'_{60}$$

$$\text{sí } 10 \leq \text{FC} < 25 \text{ entonces } (N_1)'_{60} + 1$$

$$\text{sí } 25 \leq \text{FC} < 50 \text{ entonces } (N_1)'_{60} + 2$$

$$\text{sí } 50 \leq \text{FC} < 75 \text{ entonces } (N_1)'_{60} + 4$$

$$\text{sí FC} \geq 75\% \text{ entonces } (N_1)'_{60} + 5$$

$$- \text{CRS} = 0,028234 * (N_1)'_{60} - 0,001724 * (N_1)'_{60}^2 + 0,000042 * (N_1)'_{60}^3.$$

- Factor de seguridad, F.

$$F = \text{CRS} / \tau_{av} / \sigma_v$$

### 6.1.2. METODO DE IWASAKI.

Este método también permite determinar el potencial de licuefacción de los suelos (Iwasaki et al, 1978). Los factores que intervienen son:

G= Nivel freático.

Ss= La densidad del suelo.

a= La aceleración horizontal en el nivel de la superficie.

Z= Profundidad final.

Para calcular el factor de seguridad en el caso de licuefacción, en cada profundidad se requiere de los siguientes parámetros:

Z= La profundidad inferior de la superficie.

Nm= El número de golpes con el SPT.

D<sub>50</sub>= El diámetro del grano medio.

Fc= El contenido de material fino.

Los cálculos para cada profundidad son los siguientes:

- El peso dinámico,  $L = (a/9,81) * (\sigma_v/\sigma_v) * rd$ , donde:

$$\sigma_v = 9,81 * Ss * Z.$$

$$\sigma_v = \sigma_v - 9,81 * 1,0 * (Z - G).$$

$$rd = 1 - 0,015 * Z.$$

- El factor de resistencia,  $R_t$ :

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 \text{ donde:}$$

$$R_1 = (0,0882 * \sqrt{Nm}) / (\sigma_v + 0,7)$$

$$R_2 = 0,19 \text{ sí } 0,02 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0,05$$

$$(0,225 \log(0,35)) / D_{50} \text{ sí } 0,05 \leq D_{50} \leq 0,6$$

$$- 0,05 \text{ sí } 0,6 \leq D_{50} \leq 2,0$$

$$R_3 = 0,0 \text{ sí } 0\% < F_c < 40$$

$$0,04 * F_c - 0,16 \text{ sí } 40 < F_c < 100.$$

- El factor de seguridad,  $FL$ :

$$FL = R_t / L \text{ en cada profundidad.}$$

La diferencia principal entre ambos métodos es que para determinar el factor de seguridad, en el método de Seed se utiliza la densidad del suelo y en el método de Iwasaki, el diámetro del grano medio  $D_{50}$ .

## **7. MACRO-ZONIFICACION DEL POTENCIAL DE LICUEFACCION.**

Un sismo superficial con una magnitud superior a 5.5 y una profundidad < 25 km puede producir licuefacción, siempre y cuando se presenten las condiciones propias de textura, profundidad del nivel freático, estructura de los granos, magnitud del sismo, resistencia a la penetración, distancia al epicentro, etc. (Sauter, 1989).

El mapa del potencial de licuefacción que aquí se presenta, fue realizado asumiendo que los sismos futuros podrían originarse en la fuente del Sur de Puerto Limón, como aparentemente ha sido el caso de la mayoría de los sismos históricos dañinos que han ocurrido en la región.

El mapa de potencial de licuefacción ha sido elaborado tomando como variables:

- 1- Las diferentes unidades geomorfológicas cartografiadas y disponibles en el banco de datos a escala 1:150000 del Programa Zona Atlántica y sintetizado en el mapa N°2. Estos sitios según el muestreo practicado tienen una misma génesis común, por lo que deben de tener un substrato similar en algunos lugares.
- 2- Entrevistas a los habitantes de la región sobre el desarrollo de fenómenos visibles de licuefacción, observados durante el sismo del 22 de abril de 1991.
- 3- Textura de los primeros 9.5 mts del suelo.
- 4- Profundidad del nivel freático.

- 5- **La distancia al epicentro.**
  
- 6- **Estimaciones de la densidad media, resistencia y grado de compactación del suelo.**

Estos son los aspectos que intervienen mayormente en la determinación de las áreas con elevado potencial de licuefacción.

En dicha zonificación se establecen 5 clases:

**a- Las áreas no licuables:**

Cuando el nivel freático se ubica a más de 5 m de profundidad, con suelos de textura arcillosa, granosa o también rocas.

**b- Areas poco a moderadamente licuables:**

Cuando se componen de depósitos fluviales, con texturas Franco-limoso a Franco-arenoso y el nivel freático está ubicado a más de 2.5 m de profundidad. Según las entrevistas su licuabilidad fue escasa. Se presenta en los lugares: Cultivez, Barbilla, Berta, 28-23-24 Millas, Perla, Bristol y Boston.

**c- Moderadamente a muy licuables:**

Se trata de depósitos fluviales, de textura franco-arenosa, con un nivel freático ubicado a menos de 2.5 m de profundidad. Se encuentran a una distancia al epicentro menor de 58 km. En esta categoría se encuentran: Zent, Bataán, Matina, Freeman y Barmouth.

**d- Las áreas muy licuables:**

Son las áreas costeras, con suelos de textura arenosa y un nivel freático menor de 0.5 m. Es el caso de Boca Matina, Cocal, Nueve Millas y Boca del Pantano, se encuentran relativamente cerca del epicentro.

**e- Las áreas con licuefacción desconocida:**

Por ejemplo las turberas en donde el nivel freático está por encima de la superficie al menos parte del año. No se dispone de datos directos sobre la licuabilidad en esta unidad, pero se supone que algún estrato arenoso subyacente dentro de la turba es licuable, incluso la vegetación existente se voltea por efecto del sismo (conv.pers. Dr. Sergio Mora y Lic. Luis Malavassi). El perfil típico de las turberas es materia orgánica descompuesta y el nivel freático está a 0.5-0.8 m sobre la superficie.(ver mapa N°5).

Hay que tomar en cuenta que la escala y el nivel de detalle del mapa N°5 no son suficientes como para determinar la licuabilidad de cada lugar específico. El mapa ofrece una macrozonificación a nivel regional de las áreas expuestas a la licuefacción.

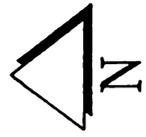
# POTENCIAL DE QUE OCURRA LICUEFACCION EN CASO DE UN TEMBLOR FUERTE

en la parte central de la provincia de Limon

-  Muy licuable
-  De moderadamente a muy licuable
-  De poco a moderadamente licuable
-  No licuable
-  Licuefacción desconocida

Boca Parismina

Elaboró : Olga Matamoros Vega  
 SIG : J.J. Stoorvogel  
 Fuente de los datos geomorfológicos:  
 Programa Zona Atlántica

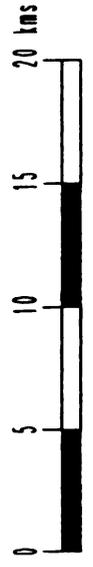


Boca Pacuare

Siquirres

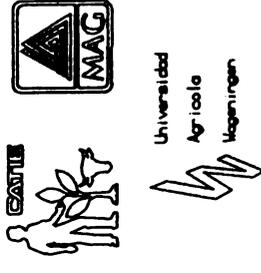
Boca Matina

10°00'



Escala original 1:150.000

Cooperación Programa Zona Atlántica - UNA



## **8. VULCANISMO.**

El vulcanismo en Costa Rica está asociado a la margen continental activa de Mesoamérica, producida por la colisión de las placas del Coco y Caribe. La fusión parcial de los materiales del manto y en ocasiones de la placa subducida, produce el magma que al ascender causa en la superficie las erupciones volcánicas (lávicas o piroclásticas). La actividad volcánica comprende los fenómenos por los cuales el magma y sus componentes llegan a la superficie.

Los volcanes desde el punto de vista de los peligros que presentan pueden causar o producir daños por coladas de lava, erupciones de ceniza y flujos piroclásticos, lahares o corrientes de barro y lluvia ácida.

### **LAVAS:**

Las lavas fluyen de los cráteres y se derraman sobre la superficie formando coladas. El flujo de las lavas depende de la viscosidad, volumen, temperatura y de su composición, así como de la topografía que condiciona la dirección de la colada, aunque este condicionamiento topográfico es relativo. Si la lava no es muy fluida, excava su propio cauce (Araña, 1974).

La velocidad de una colada de lava varía mucho, según la viscosidad y la pendiente, la velocidad puede ser escasamente hasta 30 m por día. Las lavas poco viscosas avanzan con gran rapidez incluso pueden llegar a tener una velocidad de salida superior a los 100 km/h que decrece rápidamente al iniciarse el enfriamiento. Algunas lavas muy fluidas alcanzan una longitud superior a centenas de kilómetros, mientras que las lavas muy viscosas viajan distancias cortas y son potentes, es decir tienden a acumularse sobre las bocas de salida (Mora y Valverde, 1990).

Hay dos tipos de lavas: básicas y ácidas.

- 1- **Las lavas básicas:** Por lo general, son más calientes, pero además a igual temperatura son más fluidas que las lavas ácidas.
- 2- **Las lavas ácidas::** Son más viscosas y por lo general forman coladas irregulares, con bloques aislados (Bellair, 1968).

### **LAHARES:**

Consisten en un flujo rápido (avalancha), compuesto por fragmentos de rocas y sedimentos finos (lodo), que contienen suficiente agua como para que su velocidad sea rápida.

Las corrientes de barro volcánico o lahares pueden ser producidas por fuertes lluvias, deslizamientos, erosión o desborde de lagos volcánicos cuspidales. Tales flujos pueden ocurrir repentinamente viajando a velocidades de 30-60 km/h y pueden alcanzar temporalmente espesores de más de 100 m, mientras fluyen pendiente abajo dentro de estrechos valles. Los depósitos que se presentan después del paso de una corriente de barro son usualmente menores que 10 m de espesor (Araña, 1974).

Los lahares están en su mayor parte, en los piedemontes de los valles y en casos extraordinarios ellos pueden alcanzar distancias de varios cientos de kilómetros, afectando todas las cosas que se encuentran a su paso.

Las corrientes de lodo son muy peligrosas, ya que escurren a una gran velocidad debido a su fluidez. Los lahares corren por los cauces de los ríos, se acumulan en los terrenos llanos, sus dimensiones pueden tener varios kilómetros y con frecuencia originan más destrozos y daños que las lavas y la caída de cenizas mismas (Cornelius, 1960).

La capacidad destructiva y peligrosidad depende directamente de varios factores como son: volumen, pendiente, cohesión de los materiales que arrastra, energía cinética, abrasividad, cantidad de líquido presente y de los materiales que arrastra. Pueden devastar regiones relativamente alejadas de los centros eruptivos.

#### **CAIDA DE CENIZA:**

La ceniza volcánica, se origina como consecuencia de la pulverización de la lava fluida, plástica o semiconsolidada, por la violencia de la explosión volcánica, esto disminuye el magma en pequeños fragmentos y los arroja a la atmósfera (Harrington, 1948).

Los fragmentos gruesos caen rápidamente sobre los flancos del volcán pero las partículas pequeñas caen en forma lenta y pueden ser llevadas a grandes distancias por el viento.

Las partículas de ceniza, en las cabeceras de los ríos, pueden ser removidos durante la estación lluviosa o durante temporadas, originando flujos encañonados que se abren en lóbulos de deyección cercanos a importantes centros de población (Araña, 1974).

## **8.1. VULCANISMO EN LA REGION CARIBE NORTE.**

La ubicación de los edificios volcánicos (ver mapa N°6) permite reconocer dos tipos de vulcanismo que son de importancia en la Región Caribe:

### **A- El vulcanismo del área trasarco.**

Los volcanes del área trasarco en la Región Caribe están ubicados en la planicie, se caracterizan por ser edificios compuestos principalmente de lava y escorias. Tienen pendientes suaves, poco volumen. Actualmente se encuentran inactivos.

Las formas de estos volcanes (e.g.  $1.2 \pm 0.4$  millones de años de una lava del Cerro Coronel o Tortuguero); (Bellon y Tournon, 1978), indican que son volcanes monogenéticos, formados por erupciones relativamente cortas y de poco volumen, las cuales impactaron distancias reducidas. Al ser su edad muy antigua, este vulcanismo hoy en día representa un peligro difícil de valorar.

### **B- El vulcanismo del arco interno (volcánico).**

Los volcanes del arco interno están ubicados al Suroeste del área estudiada, pertenecen a la Cordillera Volcánica Central, en donde se encuentran los volcanes activos: Irazú, Turrialba y Poás y el Barva, el cual lo ha estado al menos durante el Holoceno.

Estos volcanes se caracterizan por tener un volumen mucho mayor que los volcanes monogenéticos y en sus flancos, las pendientes son fuertes.

Es importante destacar que el área de estudio está ubicada en una llanura y el piedemonte

y no en el flanco de los edificios volcánicos. Estas se ven afectadas por fenómenos tales como: Coladas de lava, cenizas y lahares.

## **1- COLADAS DE LAVA.**

La distancia hasta la cual pueden desplazarse las coladas de lava, depende de su viscosidad, de las pendientes de la ladera y del volumen del magma emitido durante una erupción. Las coladas de lava tienden a dirigirse hacia los sectores bajos y a lo largo de cauces preexistentes.

Las coladas de lava pueden fluir en sectores de topografía suave en cualquier dirección. Una colada de lava producida por los volcanes Irazú y Turrialba, podría tomar una dirección hacia el Noreste, por lo que sería afectados los valles de los Ríos Elia, Sucio, Toro Amarillo y Guácimo. En ellos se han encontrado lavas emitidas desde los edificios volcánicos hacia las llanuras del Caribe, hasta 200 m.s.n.m.

Por la edad de las lavas existentes en el área de estudio, puede decirse que se trata de un fenómeno poco frecuente.

## **2- CENIZAS Y DISPERSION DE GASES.**

En la dispersión de gases o cenizas volcánicas, intervienen 4 aspectos meteorológicos: el viento, la lluvia, la humedad y la estabilidad vertical de la atmósfera (Zárate, 1988).

Según Zárate (1977), Costa Rica se ve afectada por 3 tipos de vientos:

- 1- En la escala sinóptica, los vientos Alisios que predominan al país desde el Mar Caribe, son los más importantes por el dominio a lo largo del año.
- 2- Los vientos Monzónicos u Oestes Ecuatoriales provenientes del hemisferio sur.
- 3- Los vientos con componentes del oeste provenientes también del Pacífico y ligados a disturbios ciclónicos que se desplazan por el Mar Caribe.

Una nube de ceniza o de gases, puede ser esparcida a mayor distancia durante la época seca, que durante la época lluviosa. En la época lluviosa, la lluvia y el viento alisio más débil, actúan para que las partículas no se dispersen a mayores distancias del cráter. Para la época seca, el viento alisio débil es más fuerte, no hay lluvia y hay estabilidad vertical en la atmósfera, lo que permite una mayor difusión horizontal de los gases y cenizas (Zárate, 1988).

El espesor del flujo del suroeste alcanza desde la superficie hasta unos 7000-9000 m generalmente, en caso de una erupción volcánica, las materias transportadas por el aire se desplazarían hacia el noreste preferiblemente con respecto al cráter del volcán en erupción. Por tanto, estas corrientes sinópticas del oeste y suroeste podrían producir un impacto menor en el transporte de gases o cenizas hacia las llanuras del Norte y Vertiente del Caribe, con relación, al que produciría el viento alisio hacia el lado Pacífico (Zárate, 1988).

Si entre mayo y octubre una erupción penetra sobre los 18000m de altura, las partículas serían llevadas casi siempre hacia el oeste. Si ello sucediese en época seca, las partículas podrían ser llevadas hacia el este o hacia el oeste, según sea la fase de la oscilación cuasibienal (Zárate,

1988).

En la Región Caribe predominan los vientos del Norte, Noreste y Este (Zárate, 1978), estos generan poca precipitación de ceniza en la Vertiente Caribe. La caída de ceniza en esta región ocurriría solo cuando se producen vientos del Suroeste y Oeste.

Según Paniagua y Soto (1986), muestran que dependiendo de la época del año, diferentes localidades han resultado afectadas por los gases o cenizas, sin estar estas localidades ubicadas en la misma dirección respecto al cráter. Esto refleja que las circulaciones mesoescalares de tipo brisas, los Oestes Ecuatoriales y los Oestes sinópticos asociados a temporales, juegan un papel importante en la diseminación de emanaciones volcánicas (Zárate, 1988).

### **3- LAHARES O CORRIENTES DE LODO.**

Cuando se producen erupciones piroclásticas en períodos de lluvias, se producen excesos de carga de sedimentos en los ríos, los cuales a su vez producen erosión, deslizamientos y hasta represamientos y lahares que bajan desde la cordillera hacia la Costa Caribe o Valle Central. Esto significa que todos los pueblos ubicados en las partes bajas son vulnerables.

Las corrientes de lodo también producen cambios en la morfología de los abanicos. Tal es el caso de la cuenca del Río Sucio (Kesel, 1985).

Para el área de estudio, con una nueva erupción de los volcanes Irazú y Turrialba, todas las áreas que se encuentran en más cerca de la Cordillera Volcánica Central podrían tener una alta amenaza por avalanchas de lodo. Este es el caso de las poblaciones al oeste de Guápiles y posiblemente Guácimo.

## **8.2. ACTIVIDAD VOLCANICA DEL IRAZU.**

El volcán Irazú es un volcán activo, caracterizado por emisiones de ceniza, gases y vapores.

Las coladas de lava que se producen son del cráter principal y conos parásitos ubicados al suroeste del cono principal. Existen evidencias de grandes coladas de lava y el último episodio se presentó hace 9000 a 14000 años con la Colada de Cervantes, que alcanzó el cauce del río Reventazón en la localidad de Cachí.

Las erupciones documentadas del volcán son las de 1726, 1821, 1885, 1886, 1894, 1899, 1910 y 1954 (Montessus de Ballore, 1888, Sapper, 1925, Mooser et al, 1958, Vargas, 1967 a y b).

La erupción más reciente fue la de 1963-1965, que produjo caída de cenizas en grandes áreas, sobre todo en las partes altas del macizo y en el Valle Central. Raramente han afectado Nicoya, Limón y Guápiles.

Según Barquero (1977), para el año 1963 se observaron erupciones hacia el lado norte y que afectaron la cuenca del Río Sucio y también se informó de la caída de cenizas en el sector de Guápiles. Para el año 1964, el volcán continuó con gran actividad y el 12 de enero del mismo año, las erupciones fueron bastante intensas. Los vientos cambiaron de dirección, llevando ceniza por primera vez en el período eruptivo a la ciudad de Limón, a 90 km al este de la cima.

### **8.3. ACTIVIDAD VOLCANICA DEL TURRIALBA.**

La única erupción histórica bien documentada del volcán Turrialba, empezó entre agosto y setiembre de 1864 y continuó hasta febrero de 1866.

El volcán Turrialba ha generado erupciones explosivas en al menos 6 períodos durante aproximadamente los últimos 3.300 años. Cada una de estas erupciones produjo piroclastos que se extendieron hasta el Valle Central, además de coladas de lava y lahares que se extendieron por muchos kilómetros desde la cima (Reagan y Soto, inédito).

Si la próxima erupción del volcán Turrialba produjera piroclastos, la parte oeste de la cima y de la cuenca alta del Río Toro Amarillo pueden ser afectadas. Las áreas bajas y los valles de los ríos, son susceptibles a ser afectados por corrientes de lodo e inundaciones. Este es el caso de los ríos: Toro Amarillo, Mercedes, Elia, Roca, Guácimo, Aquiares y Guayabo. De producirse lahares voluminosos las poblaciones al oeste de Guápiles y posiblemente Guácimo son los más expuestos a los lahares.

## **9. LAS AMENAZAS VOLCÁNICAS EN LA REGIÓN CARIBE NORTE.**

El mayor peligro de una erupción volcánica radica en las coladas de lava y caída de piroclastos, por la violencia y rapidez con que se desencadenan, pudiendo impactar áreas que superan los 10 km del centro eruptivo. Los lahares aparecen asociados a estos fenómenos y constituyen un peligro de similar importancia. Sin embargo los lahares afectan áreas más lejanas al centro eruptivo.

En el área de estudio se pueden distinguir tres amenazas volcánicas originadas por los volcanes Irazú y Turrialba.

### **a- La amenaza por coladas de lava.**

El cauce del Río Sucio, por ser la depresión más relevante, controlaría la dirección del flujo de las lavas que emite el volcán Irazú sobre su flanco norte. Sin embargo, no se espera que el volcán Irazú emita coladas sobre este flanco, pues no han sido identificadas lavas en esa dirección y las lavas más recientes del Irazú van hacia el SW.

Con respecto al Volcán Turrialba, en el caso de darse una erupción, la dirección de los flujos de lava podría ser controlada por los valles de los Ríos Elia-Guácimo. Las lavas pueden fluir más de 20 km desde la cima. La probabilidad de que una colada de lava afecte la Región Caribe Norte es baja.

**b- La amenaza de corrientes de lodo (lahares).**

En el caso del Volcán Irazú, el más posible rumbo que tomaría una corriente de lodo, sería sobre el cauce del Río Sucio, que podría afectar el área de Río Frío.

Para el Volcán Turrialba, el Río Toro Amarillo es el de mayor susceptibilidad, aunque no se puede descartar que también ocurran sobre los ríos: Elia, Guácimo, Mercedes, Guayabito y Quijanes.

**c- La amenaza por caída de ceniza.**

Coen (1964), muestra para las erupciones del volcán Irazú en 1963, que las áreas más afectadas en esa ocasión fueron las ubicadas aproximadamente entre el oeste y el suroeste con respecto al volcán, aunque otras áreas alrededor del mismo, también se vieron afectadas en menor grado. La dispersión hacia el noreste, este y sureste preferiblemente, estuvo ligada a oestes ecuatoriales persistentes en algunas fechas, oestes sinópticos ligados a temporales del Pacífico y a los oestes de altura en época seca.

En el caso del Volcán Turrialba, no se tiene información de caída de ceniza en la Región Caribe. Según Reagan (1987), en una próxima erupción del volcán, la dirección de los piroclásticos, pueden ocurrir al oeste de la cima y los depósitos de ceniza al sureste. Si la erupción es menor, probablemente producen un único depósito al este de la cima.

El Programa Zona Atlántica ha compilado un mapa geológico y datos que incluyen dataciones preliminares, mineralogía, meteorización de las rocas y el grado de desarrollo del suelo, (Wielemaker y Vogel, 1993; Nieuwenhuyse, datos sin publicar). Esta información, ha sido

utilizada para preparar un mapa temático escala 1:150000, que muestra la localización de los depósitos de lava, cenizas y lahares existentes. Con el fin de determinar las áreas de mayor amenaza por fenómenos volcánicos en la Región Caribe Norte.

Los depósitos relacionados con los peligros bajo consideración se clasificaron de la siguiente forma:

#### **LAVAS:**

- a- Lavas Recientes.** La edad oscila en menos de 10000 años.
- b- Lavas Jóvenes.** Entre 10000-30000 años.
- c- Lavas Medias.** De 30000-250000 años.
- d- Lavas Viejas.** Mayores de 250000 años (ver mapa N°7).

#### **LAHARES:**

- a- Lahares Recientes.** Su edad oscila en menos de 10000 años.
- b- Lahares Jóvenes e intermedios.** Entre 10000-250000 años.
- c- Lahares Viejos.** Mayores de 250000 años (ver mapa N°7).

Las áreas afectadas por cenizas en caso de una erupción volcánica se clasificaron en 3 categorías. Esta clasificación toma en cuenta que la probabilidad de caída de ceniza disminuye al alejarse del centro eruptivo (ver mapa N°8):

- a- Areas fuertemente afectables.**
- b- Areas poco afectables.**
- c- Areas incidentalmente afectables.**



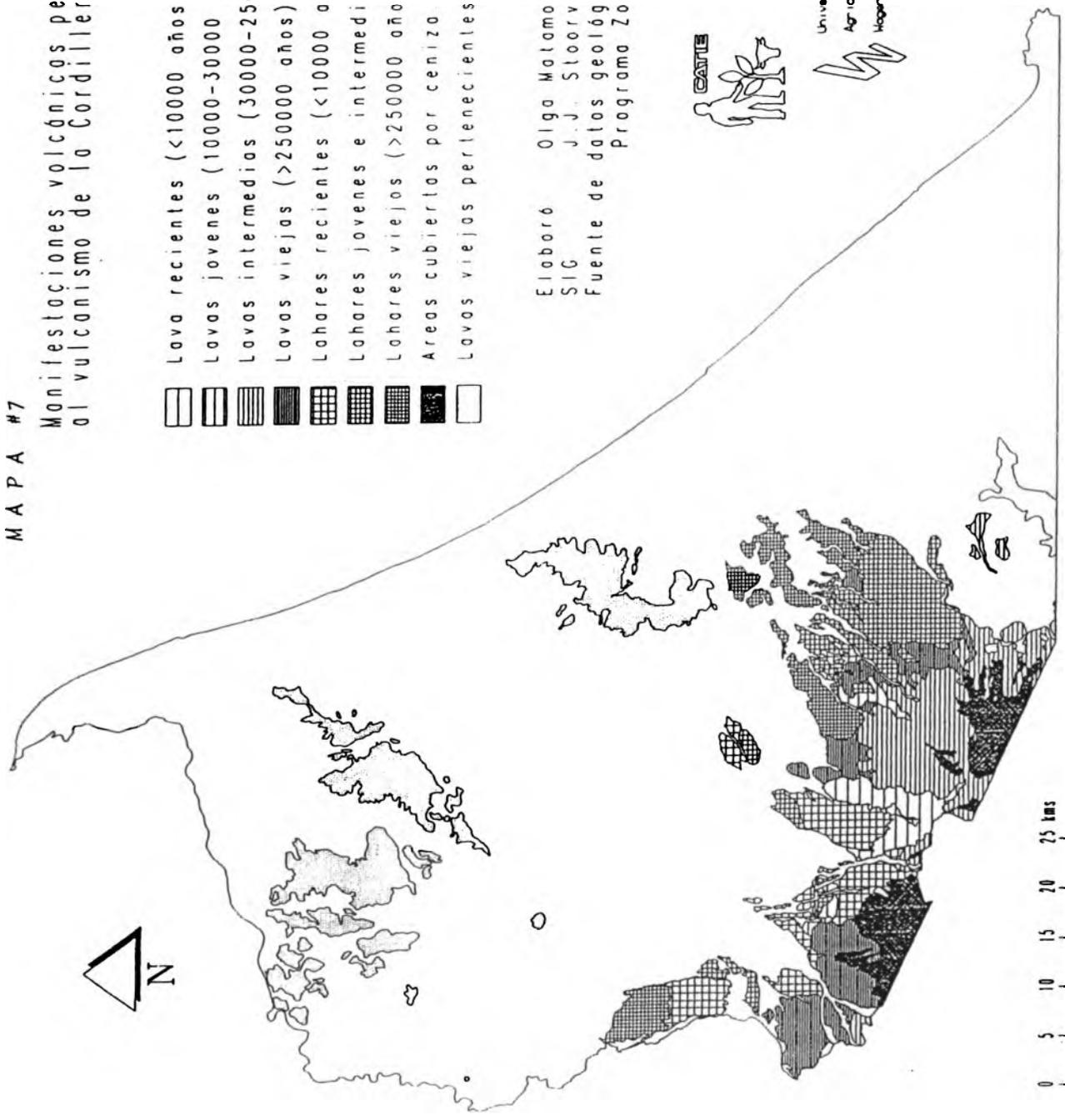
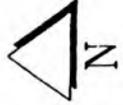
10°55'

83°00'

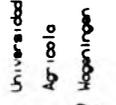
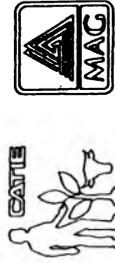
MAPA #7

Manifestaciones volcánicas pertenecientes al vulcanismo de la Cordillera Central.

-  Lavo recientes (<10000 años)
-  Lavas jóvenes (10000-30000 años)
-  Lavas intermedias (30000-250000 años)
-  Lavas viejas (>250000 años)
-  Lahares recientes (<10000 años)
-  Lahares jóvenes e intermedios (10000-250000 años)
-  Lahares viejos (>250000 años)
-  Areas cubiertas por ceniza
-  Lavas viejas pertenecientes a un vulcanismo antiguo



Elaboró Olga Matamoros Vega  
 SIG J.J. Stoorvogel  
 Fuente de datos geológicos:  
 Programa Zona Atlántica



Escala original 1:150.000

Cooperación Programa Zona Atlántica - UNA

10°00'

Como se observa en el mapa N°8, en caso de una erupción volcánica, el área más fuertemente afectable por ceniza es la Cordillera Volcánica Central, pues se alterarían las cuencas hidrográficas y ocurrirían daños en la vegetación. En las áreas poco afectable se encuentran los lugares ubicados en el piedemonte: Guápiles, Guácimo, Bonilla, Pascua, Lomas y Jiménez. El resto de la Región Caribe Norte como: Siquirres, Matina, Limón, etc; tienen una probabilidad de caída de ceniza muy baja, aunque no se descarta la probabilidad de que ocurra, como es el caso de la erupción del Volcán Irazú en 1963, llegando la ceniza hasta Puerto Limón.

De acuerdo con estudios realizados sobre la morfología de los conos en los edificios volcánicos de la Cordillera Volcánica Central, se determina que la Región Caribe, principalmente el área de Guápiles se vería afectada por una erupción volcánica solamente por los volcanes Irazú y Turrialba con menor probabilidad.

Los valles de los ríos Sucio y Toro Amarillo, son los más susceptibles a ser afectados en caso de lahares. Los valles de los ríos Sucio, Elia y Guácimo, son los más vulnerables a ser afectados en caso de lavas.

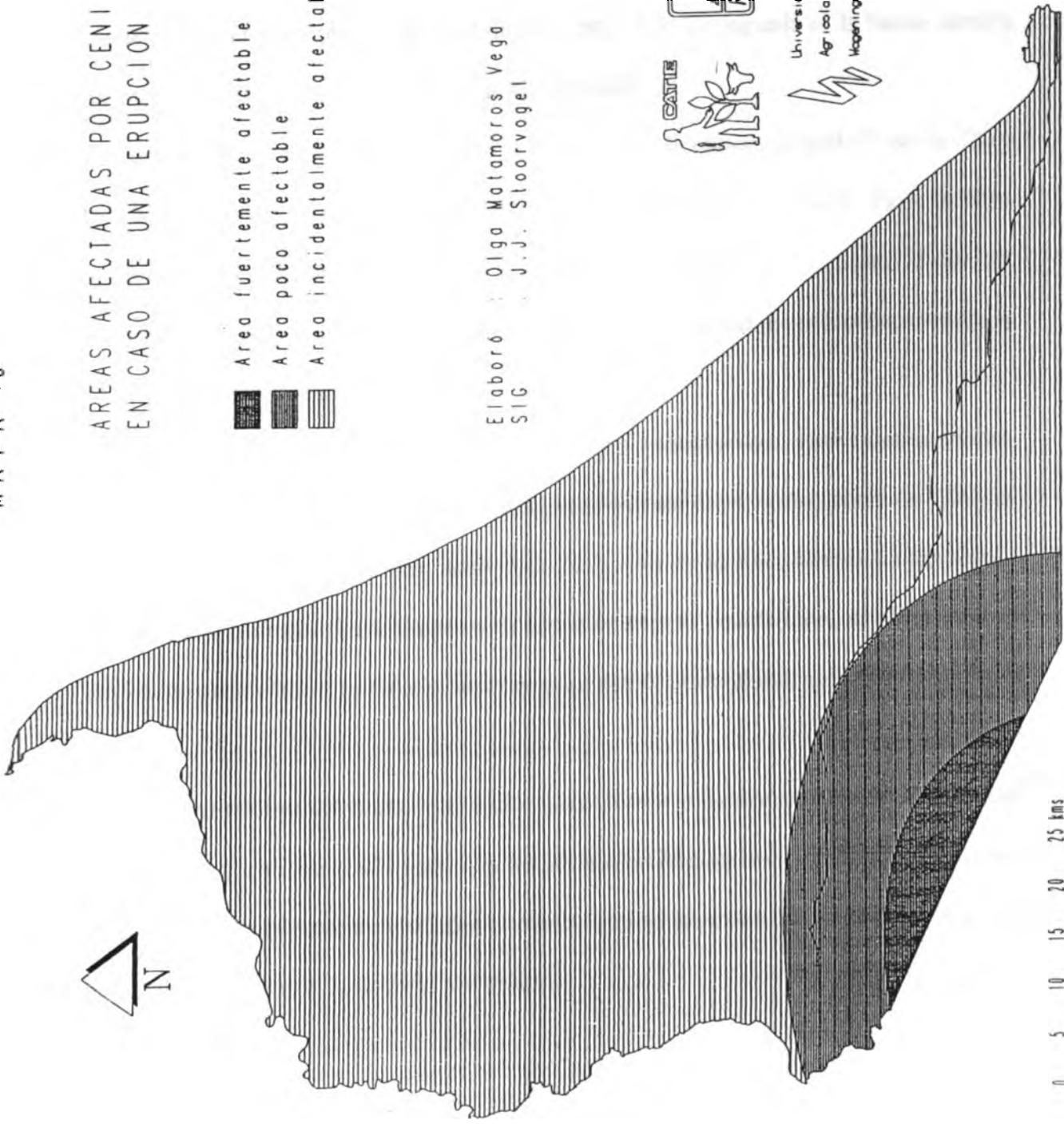
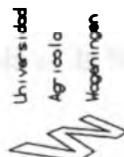
83°00'

# MAPA #8

## AREAS AFECTADAS POR CENIZAS EN CASO DE UNA ERUPCION VOLCANICA

-  Area fuertemente afectable
-  Area poco afectable
-  Area incidentalmente afectable

Elaboró : Olga Matamoros Vega  
 SIG : J.J. Stoorvogel



Escala original 1:150.000

10°55'

10°00'

## **CONCLUSIONES.**

Se deduce, a partir de esta investigación, que la Región Caribe Norte es altamente susceptible a la licuefacción y en mucho menor grado al vulcanismo.

En relación con la sismicidad, se han distinguido 3 fuentes sísmicas: al sureste del litoral Caribe, que generó el sismo del 22 de abril de 1991  $M_s=7.5$ . La segunda es la fuente sísmica de Parismina y la tercera la fuente sísmica de Changuinola.

El sismo del 22 de abril de 1991, indujo el fenómeno de licuefacción desde Bocas del Toro (Panamá) hasta el oeste de Matina, la cual afectó las poblaciones de: Bataán, Zent, Boston, Bristol, Estrada, Boca Matina, Davao, 23-24-28 Millas, Cultivez, Sahara, Berta, Barmouth, Luzón, Baltimore y Freeman. Las áreas licuadas en 1991 se encuentran en depósitos de playa, llanuras de inundación y depósitos aluviales.

En estas áreas se produjo licuefacción debido a que presentaban las condiciones necesarias:

- Distribución granulométrica, con un tamaño predominante de partículas inferior a  $2000 \mu\text{m}$ , es decir arenas limpias. Se trata, sobre todo, de suelos de textura arenosa los licuables.
- Nivel freático somero. En los lugares en donde ocurrió la licuefacción, se ubica a menos de 5 m de profundidad; cuando es superior a los 5m de profundidad no se dió licuefacción evidente.
- La densidad relativa del suelo. Los suelos poco densos y de baja resistencia, son los más susceptibles y esto fue confirmado con las pruebas realizadas con el SPT y DPL. Cuando el número de golpes requeridos para la penetración es inferior a 30 golpes, puede ocurrir la licuefacción, según la aceleración sísmica.

- Los lugares ubicados más cerca del epicentro fueron más afectados que los lugares alejados, hasta una distancia de 67 km del epicentro. Más allá no se observó licuefacción.

En el área de estudio, se realizó una macro-zonificación de las áreas afectadas por licuefacción a escala regional. La misma, pretende ser de utilidad en la planificación del desarrollo económico, específicamente, en el uso del suelo. Su carácter regional, impide que la misma pueda ser utilizada para tomar decisiones específicas, en relación, a sitios en que se vaya a construir obras de infraestructura.

La macro-zonificación consiste de 5 categorías:

- a- **Áreas no licuables.** Textura arcillosa, nivel freático superior a 5 m y se localizan lejos del epicentro.
- b- **Áreas de poco a moderadamente licuables.** Textura franco limoso a franco arenoso, capa freática superior a 2.5 m.
- c- **Áreas moderadamente a muy licuables.** Textura franco arenoso a arenoso, nivel freático inferior a 2.5 m.
- d- **Áreas muy licuables.** Textura arenosa, nivel freático inferior a 0.5 m, el suelo es poco resistente y compacto. Se encuentran cerca del epicentro.
- e- **Áreas con licuefacción desconocida (turba).**

Los sitios documentados en el campo, por medio de entrevistas, demostraron, la ocurrencia de la licuefacción en el área de estudio, con una intensidad variable.

Para la investigación, la metodología utilizada, determinó la licuefacción, se necesitó como imputo métodos geotécnicos: el de Iwasaki y el de Seed, utilizando el instrumento SPT (DPL). Ambos métodos, dan una aproximación a la realidad, en el cual ayudó para ratificar, lo analizado en el trabajo de campo.

Con relación a los edificios volcánicos de la Cordillera Volcánica Central, se determina que la Región Caribe, principalmente el área al oeste de Guápiles se vería afectada solamente por erupciones de los volcanes Irazú y Turrialba, como se ha observado en erupciones volcánicas históricas.

Los fenómenos volcánicos que está sometida la Región Caribe Norte son: Caída de ceniza, coladas de lava y corrientes de lodo o lahares.

En caso de una erupción del volcán Irazú, de magnitud y tipo apropiado, el área de Guápiles, podría ser afectada por lahares y coladas de lava, si bajan por el Río Sucio y el Toro Amarillo. En caso de caída de cenizas, podría ser poco afectada, el área más afectada podría ser el pie de monte de la Cordillera Volcánica Central.

## **BIBLIOGRAFIA.**

- Araña, V. y López, J. 1974. Volcanismo. Dinámica y petrología de sus productos. Colección Colegio Universitario. Ediciones Istmo. Madrid, España. 432 pp.
- Banco Central de Costa Rica. 1986. Estadísticas 1950-1985. División económica. San José, Costa Rica. p. 9.
- Barquero, J. 1977. El volcán Irazú y su actividad. Tesis de grado. UNA. Heredia, Costa Rica. 63 pp.
- Bellair, P. y Pomerol, CH. 1968. Tratado de Geología. Editorial Vicens-Vives, Barcelona, España. p. 441-443.
- Bellon, H. and Tournon, J. 1978. Contribution de la Geochronométrie K. Ar a L' étude du magmatisme de Costa Rica. Bull. Soc. Géol. France 7-XX (6): 955-969.
- Boschini, M. 1989. Incidencia de fuentes sísmicas en la Región Caribe de Costa Rica. Tesis de grado, U.C.R. 97 pp.
- Burbach, V., Frohlich, C. Pennington, W., Matumoto, T. 1984. Seismicity and tectonics of the subducted Coco plate. J.G.R. 81: 4885-4896.
- Brenes, J. 1989. Informe de la sismicidad de la fuente sísmica Parismina y la Costa del Caribe de Costa Rica. Setiembre 1988- Mayo 1989. Boletín de Vulcanología #20, OVSI-CORI-UNA, Heredia, Costa Rica. p. 8-10.
- Castillo, R. 1984. Geología de Costa Rica. Una sinopsis. Editorial de la U.C.R, San José, Costa Rica. 182 pp.
- Castillo, R., Morales, D., Malavassi, E. y Saénz, L. 1985. Sismos. Rev. Setiembre Científico 2. EUNED. San José, Costa Rica. 114 pp.
- Centro de las Naciones Unidas para los asentamientos Humanos (CNUAH). 1991. Observaciones y recomendaciones para la reconstrucción y desarrollo de la zona afectada por el sismo del Valle de la Estrella 22-4-91. San José, Costa Rica.
- Cervantes, J. 1988. Informe geológico-geotécnico de la zona de embalse. Estudio de prefactibilidad del P.H. Siquirres. Inf. Depto de Geología ICE.
- Coates, A., Jackson, J., Collins, L., Cronin, T., Dowsett, H., Bybell, L., Jung, P. and Obando, J. 1992. Closure of the Isthmus of Panama: the near-shore marine record of Costa Rica and western Panama. HGeol.Soc.Amer. Bull., 104:814-828.

- Coen, E. 1964. Introducción al estudio de las erupciones del Volcán Irazú. Publicaciones de la Universidad de Costa Rica. Serie Ciencias Naturales, #4. San José, Costa Rica. 78 pp.
- Comisión Nacional de Emergencia. 1991. Plan regulador para la emergencia de la Zona Atlántica. San José, Costa Rica.
- Cornelius, H. 1960. Fundamentos de Geología General. España. 393 pp.
- De la Haya, D. 1852. La actividad del Volcán Irazú en 1723. En Revista Geográfica de América Central, 4:203-210, Heredia, Costa Rica. Reproducción en 1977.
- De Obaldía, Marino, T., R. Van Der Laat, Malavassi, E., Hernández, F. 1991. Levantamiento Cosmismo Asociado al Terremoto del 22 de abril 1991, Ms:7.5 Valle de la Estrella, Limón, Costa Rica. OVSICORI-UNA, Heredia, Costa Rica. 30 pp.
- Dengo, G. 1968. Estructura geológica, historia tectónica y morfológica de América Central, ICAITI, Guatemala. Centro Regional de Ayuda Técnica, AID. vol. 1. México. 52 pp.
- Denyer, P. y Arias O. 1991. Efectos geológicos del terremoto de Limón, Costa Rica. Proyecto de investigación con apoyo de la Comisión Nacional de Emergencias. Escuela de Geología. U.C.R. Junio, 1991. 35 pp.
- Feldman, H. 1984. Catalogue of historical documents pertaining to earthquake damage in Panamá and Costa Rica. Inédito. p. 24-64-65.
- Finn, L., Yong, N. and Lee, W. 1978. Liquefaction of thawed layers in frozen soil, J. Geotech. Engineering Division. ASCE, 104 (GT10), Proc. Paper 14107, 1243-55.
- Gill, D. and Keunen H. 1958. Sand volcanoes on slumps in the carboniferous of of country Clare, Ireland. Q. J. Geol. Soc. Lond. 113, 441-60.
- González, C. 1910. Temblores, Terremotos, Inundaciones y Erupciones volcánicas en Costa Rica, 1608-1910. Tipografía Aveleno Alsina. San José, Costa Rica. 200 pp.
- Güendel, F. 1986. Seismotectonics of Costa Rica: an Analytical view of the terminus of the Middle American Trench. Ph. D. dissertation, University of California, Santa Cruz, USA. 157 pp.
- Güendel, F. y Pacheco, J. 1993. "La secuencia sísmica de 1990-1991 en la Región Central de Costa Rica. Evidencia para la existencia de una frontera de Microplaca conectando el Cinturón Deformado de Panamá y la Fosa Mesoamericana". IV Congreso Geológico Nacional. 28 junio-3 julio 1993. Colegio de Geólogos. San José, Costa Rica.

p. 26-28.

- Harrington, J. 1948. Volcanes y Terremotos. Editorial Pleamar S.R.L. Argentina. 35 pp.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K. and Yasuda, S. 1978. A practical method for assessing soil liquefaction potencial based on case studies at various sites in Japan. 2nd international conference on microzonation for safer construction research and application. p. 885-896.
- Jennings, P. 1978. Earthquake Engineering and hazards reduction in China. Committee on Scholarly communication with the people's Republic of China, CSCPRC. Report #8 National Academy of Sciences, Washington, D.C. p. 1-189.
- Kesel, H. 1985. Alluvial fan sytems in a wettropical environment, Costa Rica National geographic. Research, p. 450-469.
- Kroonenberg, S. and Nieuwenhuys, A. 1993. La geología y la fisiografía. Un sistema de información de suelos y tierras para la Zona Atlántica de Costa Rica. Editores Wielemaker, W.G. y Vogel, W. 1993. Report. #22. Programa Zona Atlántica, Guápiles, Costa Rica.
- Kuribayashi, E. and Tatsuoka, F. 1975. Brief review of Liquefaction during earthquakes in Japan. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol.15, #4. Dec. 1975.
- Leeder, R. 1982. Sedimentology. Process y product. Department of Earth Sciences, University of Leeds. Unwin Hyman Ltd., London, Inglaterra. 344 pp.
- Ministerio de Industria, Energía y Minas. 1982. Mapa Geológico de Costa Rica. Edición preliminar, esc. 1:200000. Dcción Geología, Minas y Petróleo. San José, Costa Rica.
- Miyamura, S. 1980. Sismicidad en Costa Rica. Editorial Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 190 pp.
- Montero, Segura C., Malavassi, E., Güendel, F., González, V. Fernández, E., De Obaldía, F., Rojas, D., Rodríguez, H., Mata, A. Van Der Laat, R., Balboza, V. y Marino, T. 1991. Informe preliminar Terremoto 22 de abril de 1991, Ms:7.4 Valle de la Estrella, Limón, Costa Rica. Mayo, 1991. OVSICORI-UNA, Heredia, Costa Rica. 22 pp.
- Montero, W. 1986. Período de recurrencia y tipos de secuencias sísmicas de los temblores interplaca e intraplaca en la Región de Costa Rica. Revista Geológica de América Central. #5, octubre 1986. p 35-69.

- Montessus de Ballore, F. 1888. Tremblements de terre et eruptions volcaniques du Centro-Amerique. Dijón. 293 pp.
- Mooser, F., Meyer, A., y McBirney, A. 1958. Catalogue of the activide volcanoes In the world including solfatara fields-Central America. Intern. Volcanological Assoc. 4:133-146, Nápoles, Italia.
- Mora, S. y Mora, R. 1992. Landslides triggered by the Limón-Telire, Costa Rica earthquake (22 april 1991) and comparaisón with other events. U.S. Geological Suvey Prof. Paper-In Press.
- Mora, S. y Valverde, R. 1990. La Geología y sus procesos. Editorial Tecnología de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 332 pp.
- Mulilis, P. 1975. The effects of method of sample preparation on the cyclic stress-strain behavior of sands. EERC. Report #75-18, University of California, Berkely.
- Paniagua, S. y Soto G. 1986. Reconocimiento de los riesgos volcánicos potenciales de la Cordillera Central de Costa Rica. América Central. Simposio internacional sobre neotectónica y riesgos volcánicos. En revista CIAF. Volumen 11, #1-3. Bogotá, Colombia. p. 178-198.
- Reagan, K. 1987. Turrialba Volcano, Costa Rica. Magmatism at the Southeast terminus of the Central American Arc. PhD dissertation. University of California Santa Cruz, USA. pp 216.
- Reagan, M., Hill, J., Soto, G. Inédito. An outline of the recent eruptive history of Turrialba volcano, Costa Rica. Department of Geology. University of Iowa. Iowa city. IA 52242. 20 pp.
- Rivier, F. 1985. Sección geológica del Pacífico al Atlántico a través de Costa Rica. Rev. Geol. América Central 2: 23-32. San José, Costa Rica.
- Rivier, F. 1988. Geología del sitio de presa y geología regional. Inf. de misión de Consultoría. P.H. Siquirres. Depto. Geología, ICE.
- Rojas, W. 1991. Informe preliminar de datos sismológicos. El terremoto del 22 de abril de 1991 en la Región Caribe y la sismicidad asociada en el mes de abril, 1991. Geología. Universidad de Costa Rica. 65 pp.
- Sapper, K. 1925. Los volcanes de la América Central. Max Niemayer, Halle (Saale). 144 pp.

- Sauter, F. 1989. Fundamentos de ingeniería sísmica. Introducción a la sismología. Editorial Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 271 pp.
- Schweizer, S., Coward, H. y Vásquez, M. 1980. Metodologías para análisis de suelos, plantas y aguas. Boletín técnico #68. San José, Costa Rica. 32 pp.
- Seebach, V. 1922. Karl Von Seebach y sus estudios sobre Costa Rica. Publ. Liceo de Costa Rica, 9, Imprenta Lehmann, San José, Costa Rica.
- Seed, B., Martín, P. and Lysmer, J. 1976. Pore-Water pressure changes during soil liquefaction. Proc. Am. Soc. Civic. Eng., J. Geotech. Eng. Div. 192 (GT4) 323-46.
- Silver, E., Reed, D., Tagudin, J. and Heil, D. 1990. Implications of the North and South Panama thrust belt for the origin of the Panama orocline, Tectonics, 9, 261-281.
- Tournon, J. 1983. La cadena Volcánica de Costa Rica. Composiciones químicas de las lavas. Informe Seminario IGN. Costa Rica. Julio-Diciembre. 29: 31-62.
- Vahrson, W. G., Laporte, S., Hernández, G. y Esquivel, L. 1992. Hydrological changes and floods related to the April 22, 1991, earthquake in Limón, Costa Rica. Published in US Geological survey, professional paper.
- Vargas, M. 1967 (a). Belleza y amenaza del Volcán Irazú. Efemérides costarricenses, 1. (3): 1-17.
- Vargas, M. 1976 (b). Aspectos de la actividad volcánica de Costa Rica en los últimos tiempos. Efemérides costarricenses, 1, (3):18-25.
- Weyl, R. 1980. Geology of Central América. Second edition. Bebruder Borntraeger, Berlin-Stuttgart, Alemania. 371 pp.
- Wielemaker, W. and Vogel, W. 1993. Un sistema de información de suelos y tierras para la Zona Atlántica de Costa Rica. Report. #22. Programa Zona Atlántica, Guápiles, Costa Rica. 82 pp.
- Wong, T., Seed, B. y Chan, K. 1975. Cyclic loading liquefaction of gravelly soils. J. Geotech. Engineering Division, Asce, 101 (GT6), Proc. Paper 11396, 571-83.
- Zárate, E. 1977. Principales sistemas de viento que afectan a Costa Rica y sus relaciones con la precipitación. Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Zárate, E. 1978. Comportamiento del viento en Costa Rica. IMN. San José, Costa Rica. 31 pp.

Zárate, E. 1988. Factores meteorológicos asociados a desastres causados por erupciones volcánicas en Costa Rica. En ciencia y tecnología. Revista UCR. Volumen 12. #1-2. Editorial UCR. p. 41-52.

**ANEXO N° 1.**

## **METODO TAZA DE CAZAGRANDE.**

El método de Cazagrande consiste en tomar 200 grs de muestra y mezclarla con agua destilada hasta convertirla en una masa, colocarla en un recipiente por 24 horas. Luego se toma 50 grs de muestra y se coloca en la taza del instrumento hasta que cubra el fondo, posteriormente con una herramienta en forma acanalada se divide en dos la muestra, con la manivela del martinete se da vuelta contando los golpes hasta que la abertura cierre por lo menos 13 mm. Estos pasos deben realizarse por lo menos 4 veces con la misma muestra. Luego la muestra es pesada y puesta al horno. Finalmente se vuelve a pesar para determinar el peso seco y posteriormente el porcentaje de humedad requerido.

Se calculó por extrapolación el porcentaje de humedad correspondiente a 25 golpes para todas las muestras. La extrapolación se realizó utilizando el coeficiente de regresión contenidos en la hoja de trabajo electrónica Lotus 123. La inexistencia de información puede ser resultado de que se colectara poca muestra o que la textura fuera arenosa.

Nombre	Golpes		Peso		‡	X	Y	X^2	XY		
	húmedo	seco	humedad							a=	Y25=
Boston 4 m	39	38	20	90	39	90	1521	3510	a= 101.6400	Y25= 93.69265	
	31	40	21	90.47619	31	90.47619	961	2804.761	b= -0.31789		
	20	47	24	95.83333	20	95.83333	400	1916.666			
					90	276.3095	2882	8231.428			
23 millas 1 m	35	33	21	57.14285	35	57.14285	1225	2000	a= 65.99732	Y25= 59.43143	
	24	35	22	59.09090	24	59.09090	576	1418.181	b= -0.26263		
	10	36	22	63.63636	10	63.63636	100	636.3636			
					69	179.8701	1901	4054.545			
23 millas 1.5 m	44	46	31	48.38709	44	48.38709	1936	2129.032	a= 60.80004	Y25= 54.08267	
	30	40	26	53.84615	30	53.84615	900	1615.384	b= -0.26869		
	14	36	23	56.52173	14	56.52173	196	791.3043			
					88	158.7549	3032	4535.721			
23 millas 2.5m	49	44	31	41.93548	49	41.93548	2401	2054.838	a= 99.29805	Y25= 72.25569	
	38	38	23	65.21739	38	65.21739	1444	2478.260	b= -1.08169		
	20	28	16	75	20	75	400	1500			
					107	182.1528	4245	6033.099			
23 millas 3.5m	37	46	31	48.38709	37	48.38709	1369	1790.322	a= 59.15554	Y25= 51.84466	
	25	44	29	51.72413	25	51.72413	625	1293.103	b= -0.29243		
	16	51	33	54.54545	16	54.54545	256	872.7272			
					78	154.6566	2250	3956.153			
Matina 2.5 m	34	49	37	32.43243	34	32.43243	1156	1102.702	a= 50.81081	Y25= 37.29729	
	19	52	37	40.54054	19	40.54054	361	770.2702	b= -0.54054		
					53	72.97297	1517	1872.972			
Matina 3 m	43	48	32	50	43	50	1849	2150	a= 113.6941	Y25= 74.32598	
	34	47	31	51.61290	34	51.61290	1156	1754.838	b= -1.57472		
	26	39	22	77.27272	26	77.27272	676	2009.090			
					103	178.8856	3681	5913.929			
Matina 4.5 m	47	47	34	38.23529	47	38.23529	2209	1797.058	a= 72.81908	Y25= 54.71368	
	35	49	33	48.48484	35	48.48484	1225	1696.969	b= -0.72421		
	21	44	28	57.14285	21	57.14285	441	1200			
					103	143.8629	3875	4694.028			
Perla 0.50 cm	38	31	19	63.15789	38	63.15789	1444	2400	a= 112.3886	Y25= 80	
	25	27	15	80	25	80	625	2000	b= -1.29554		
					63	143.1578	2069	4400			
Perla 5 m	30	40	28	42.85714	30	42.85714	900	1285.714	a= 49.94747	Y25= 44.03886	
	13	47	32	46.875	13	46.875	169	609.375	b= -0.23634		
					43	89.73214	1069	1895.089			
Estrada 2 m	36	36	20	80	36	80	1296	2880	a= 91.66246	Y25= 83.50230	
	25	22	12	83.33333	25	83.33333	625	2083.333	b= -0.32640		
	13	30	16	87.5	13	87.5	169	1137.5			
				74	250.8333	2090	6100.833				

Estrada 2.5 m	36	48	28	71.42857	36	71.42857	1296	2571.428	a= 95.34271	Y25= 79.92063
	25	33	18	83.33333	25	83.33333	625	2083.333	b= -0.61688	
	14	37	20	85	14	85	196	1190		
					75	239.7619	2117	5844.761		
Cultivos 4 m	45	51	34	50	45	50	2025	2250	a= 72.33466	Y25= 59.72412
	33	48	31	54.83870	33	54.83870	1089	1809.677	b= -0.50442	
	24	45	28	60.71428	24	60.71428	576	1457.142		
					102	165.5529	3690	5516.820		
E.Estrada 2m	27	30	21	42.85714	27	42.85714	729	1157.142	a= 44.85912	Y25= 43.00543
	10	49	34	44.11764	10	44.11764	100	441.1764	b= -0.07414	
					37	86.97478	829	1598.319		
E.Estrada 3m	40	42	26	61.53846	40	61.53846	1600	2461.538	a= 94.14129	Y25= 71.76366
	24	48	29	65.51724	24	65.51724	576	1572.413	b= -0.89510	
	11	32	17	88.23529	11	88.23529	121	970.5882		
					75	215.2909	2297	5004.540		
Zent2 1.50m	21	32	24	33.33333						
Zent 1m	26	43	28	53.57142	26	53.57142	676	1392.857	a= 65.47619	Y25= 54.02930
	17	41	26	57.69230	17	57.69230	289	980.7692	b= -0.45787	
					43	111.2637	965	2373.626		
Zent 50cm	25	50	36	38.88888	25	38.88888	625	972.2222	a= 89.77490	Y25= 38.88888
	17	45	29	55.17241	17	55.17241	289	937.9310	b= -2.03544	
					42	94.06130	914	1910.153		
Boston 8m	36	43	27	59.25925	36	59.25925	1296	2133.333	a= 80.27401	Y25= 66.25934
	25	47	28	67.85714	25	67.85714	625	1696.428	b= -0.56058	
	13	31	18	72.22222	13	72.22222	169	938.8888		
					74	199.3386	2090	4768.650		
28 millas 2.5m	40	30	17	76.47058	40	76.47058	1600	3058.823	a= 96.85979	Y25= 84.04436
	24	35	19	84.21052	24	84.21052	576	2021.052	b= -0.51261	
	16	34	18	88.88888	16	88.88888	256	1422.222		
					80	249.5700	2432	6502.098		
Estrada 1m	36	45	24	87.5	36	87.5	1296	3150	a= 103.6538	Y25= 92.43589
	23	29	15	93.33333	23	93.33333	529	2146.666	b= -0.44871	
					59	180.8333	1825	5296.666		
Zent2 2.50m	36	30	17	76.47058	36	76.47058	1296	2752.941	a= 105.5380	Y25= 84.92299
	25	22	12	83.33333	25	83.33333	625	2083.333	b= -0.82460	
	18	23	12	91.66666	18	91.66666	324	1650		
					79	251.4705	2245	6486.274		
Zent2 50cm	44	26	18	44.44444	44	44.44444	1936	1955.555	a= 64.82251	Y25= 53.71060
	32	38	25	52	32	52	1024	1664	b= -0.44447	
	15	52	33	57.57575	15	57.57575	225	863.6363		
					91	154.0202	3185	4483.191		

Cultiver 5m	45	50	33	51.51515	45	51.51515	2025	2318.181	a= 62.02005	Y25= 56.24239
	34	51	33	54.54545	34	54.54545	1156	1854.545	b= -0.23110	
	26	56	36	55.55555	26	55.55555	676	1444.444		
	20	52	33	57.57575	20	57.57575	400	1151.515		
					125	219.1919	4257	6768.686		
Boston 5.5m	41	46	29	58.62068	41	58.62068	1681	2403.448	a= 79.54175	Y25= 67.28964
	33	28	17	64.70588	33	64.70588	1089	2135.294	b= -0.49008	
	20	44	26	69.23076	20	69.23076	400	1384.615		
					94	192.5573	3170	5923.357		
Barbilla 2m	44	48	31	54.83870	44	54.83870	1936	2412.903	a= 68.00904	Y25= 60.37463
	29	46	29	58.62068	29	58.62068	841	1700	b= -0.30537	
	14	41	25	64	14	64	196	896		
					87	177.4593	2973	5008.903		
28 millas 50cm	47	33	21	57.14285	47	57.14285	2209	2685.714	a= 78.31525	Y25= 66.53606
	37	40	25	60	37	60	1369	2220	b= -0.47116	
	26	33	20	65	26	65	676	1690		
	15	31	18	72.22222	15	72.22222	225	1083.333		
					125	254.3650	4479	7679.047		
28 Millas 4m	46	46	29	58.62068	46	58.62068	2116	2696.551	a= 75.74633	Y25= 66.95475
	38	41	25	64	38	64	1444	2432	b= -0.35166	
	28	43	26	65.38461	28	65.38461	784	1830.769		
	22	47	28	67.85714	22	67.85714	484	1492.857		
					134	255.8624	4828	8452.178		
Batán 1m	39	42	25	68	39	68	1521	2652	a= 84.12030	Y25= 72.84210
	25	32	19	68.42105	25	68.42105	625	1710.526	b= -0.45112	
	18	34	19	78.94736	18	78.94736	324	1421.052		
					82	215.3684	2470	5783.578		
23 millas 50cm	47	35	21	66.66666	47	66.66666	2209	3133.333	a= 87.44696	Y25= 76.39898
	35	43	25	72	35	72	1225	2520	b= -0.44191	
	23	39	22	77.27272	23	77.27272	529	1777.272		
					105	215.9393	3963	7430.606		
Batán 2m	35	53	36	47.22222	35	47.22222	1225	1652.777	a= 58.67385	Y25= 50.61021
	23	47	31	51.61290	23	51.61290	529	1187.096	b= -0.32254	
	13	54	35	54.28571	13	54.28571	169	705.7142		
					71	153.1208	1923	3545.588		
23 Millas 4m	48	39	28	39.28571	48	39.28571	2304	1885.714	a= 53.05444	Y25= 45.63598
	36	41	29	41.37931	36	41.37931	1296	1489.655	b= -0.29673	
	25	38	26	46.15384	25	46.15384	625	1153.846		
					109	126.8188	4225	4529.215		
Cultiver 2.5m	38	52	31	67.74193	38	67.74193	1444	2574.193	a= 81.72278	Y25= 72.07793
	24	41	24	70.83333	24	70.83333	576	1700	b= -0.38579	
	14	39	22	77.27272	14	77.27272	196	1081.818		
					76	215.8479	2216	5356.011		

24 millas 2m	48	24	15	60	48	60	2304	2880	a= 84.47432	Y25= 70.97461
	33	26	16	62.5	33	62.5	1089	2062.5	b= -0.53998	
	25	33	19	73.68421	25	73.68421	625	1842.105		
					106	196.1842	4018	6784.605		
28 millas 5m	44	52	35	48.57142	44	48.57142	1936	2137.142	a= 65.04666	Y25= 55.28996
	31	53	35	51.42857	31	51.42857	961	1594.285	b= -0.39026	
	20	49	31	58.06451	20	58.06451	400	1161.290		
					95	158.0645	3297	4892.718		
24 Millas 1m	36	47	28	67.85714	36	67.85714	1296	2442.857	a= 82.02718	Y25= 71.68842
	21	48	28	71.42857	21	71.42857	441	1500	b= -0.41355	
	12	41	23	78.26086	12	78.26086	144	939.1304		
					69	217.5465	1881	4881.987		
24 millas 1.5m	44	53	35	51.42857	44	51.42857	1936	2262.857	a= 65.65462	Y25= 56.93053
	31	47	31	51.61290	31	51.61290	961	1600	b= -0.34896	
	24	51	32	59.375	24	59.375	576	1425		
					99	162.4164	3473	5287.857		
Matina 7m	46	41	29	41.37931	46	41.37931	2116	1903.448	a= 46.66058	Y25= 44.00748
	37	43	30	43.33333	37	43.33333	1369	1603.333	b= -0.10612	
	19	52	36	44.44444	19	44.44444	361	844.4444		
					102	129.1570	3846	4351.226		
Cultiver 1m	45	37	26	42.30769	45	42.30769	2025	1903.846	a= 51.21215	Y25= 45.12949
	32	38	27	40.74074	32	40.74074	1024	1303.703	b= -0.24330	
	24	43	30	43.33333	24	43.33333	576	1040		
	16	42	28	50	16	50	256	800		
				117	176.3817	3881	5047.549			
Boston 5m	36	51	32	59.375	36	59.375	1296	2137.5	a= 103.1978	Y25= 70.57710
	26	37	23	60.86956	26	60.86956	676	1582.608	b= -1.30482	
	20	31	17	82.35294	20	82.35294	400	1647.058		
					82	202.5975	2372	5367.167		
Cultiver 3m	32	31	19	63.15789	32	63.15789	1024	2021.052	a= 94.83796	Y25= 68.73389
	21	42	25	68	21	68	441	1428	b= -1.04416	
	15	31	17	82.35294	15	82.35294	225	1235.294		
					68	213.5108	1690	4684.346		
Boston 7m	42	30	18	66.66666	42	66.66666	1764	2800	a= 107.2841	Y25= 84.06432
	37	28	16	75	37	75	1369	2775	b= -0.92879	
	20	32	17	88.23529	20	88.23529	400	1764.705		
					99	229.9019	3533	7339.705		
Cultiver 7m	35	45	32	40.625	35	40.625	1225	1421.875	a= 73.55606	Y25= 51.63320
	26	51	33	54.54545	26	54.54545	676	1418.181	b= -0.87691	
	13	53	33	60.60606	13	60.60606	169	787.8787		
					74	155.7765	2070	3627.935		

Davao 50cm	40	41	24	70.83333	40	70.83333	1600	2833.333	a= 83.35705	Y25= 75.38426
	31	45	26	73.07692	31	73.07692	961	2265.384	b= -0.31891	
	18	48	27	77.77777	18	77.77777	324	1400		
					89	221.6880	2885	6498.717		
Davao 1m	41	54	34	58.82352	41	58.82352	1681	2411.764	a= 69.90638	Y25= 63.22607
	35	45	28	60.71428	35	60.71428	1225	2125	b= -0.26721	
	12	40	24	66.66666	12	66.66666	144	800		
					88	186.2044	3050	5336.764		
Cultivez 5.5m	30	47	30	56.66666	30	56.66666	900	1700	a= 66.48767	Y25= 57.46425
	20	55	35	57.14285	20	57.14285	400	1142.857	b= -0.36093	
	11	54	33	63.63636	11	63.63636	121	700		
					61	177.4458	1421	3542.857		
Cultivez 6m	43	57	37	54.05405	43	54.05405	1849	2324.324	a= 65.10518	Y25= 58.51995
	36	59	38	55.26315	36	55.26315	1296	1989.473	b= -0.26340	
	13	55	34	61.76470	13	61.76470	169	802.9411		
					92	171.0819	3314	5116.739		
Cultivez 6.5m	32	42	36	16.66666	32	16.66666	1024	533.3333	a= 83.08573	Y25= 31.39692
	23	34	25	36	23	36	529	828	b= -2.06755	
	12	49	31	58.06451	12	58.06451	144	696.7741		
					67	110.7311	1697	2058.107		
23 Millas 2m	31	49	30	63.33333	31	63.33333	961	1963.333	a= 73.42948	Y25= 65.30219
	21	50	30	66.66666	21	66.66666	441	1400	b= -0.32509	
	17	47	28	67.85714	17	67.85714	289	1153.571		
					69	197.8571	1691	4516.904		
28 Millas 2m	39	46	27	70.37037	39	70.37037	1521	2744.444	a= 91.56113	Y25= 77.36155
	23	44	25	76	23	76	529	1748	b= -0.56798	
	13	39	21	85.71428	13	85.71428	169	1114.285		
					75	232.0846	2219	5606.730		
Boston 2.5m	49	50	35	42.85714	49	42.85714	2401	2100	a= 49.20975	Y25= 45.79814
	29	45	31	45.16129	29	45.16129	841	1309.677	b= -0.13646	
	21	61	42	45.23809	21	45.23809	441	950		
	11	52	35	48.57142	11	48.57142	121	534.2857		
				110	181.8279	3804	4893.963			
Boston 1m	37	30	19	57.89473	37	57.89473	1369	2142.105	a= 66.86082	Y25= 60.87996
	26	37	23	60.86956	26	60.86956	676	1582.608	b= -0.23923	
	15	31	19	63.15789	15	63.15789	225	947.3684		
					78	181.9221	2270	4672.082		
Perla 2.5m	46	33	19	73.68421	46	73.68421	2116	3389.473	a= 91.43573	Y25= 81.98419
	24	33	18	83.33333	24	83.33333	576	2000	b= -0.37806	
	11	28	15	86.66666	11	86.66666	121	953.3333		
					81	243.6842	2813	6342.807		

Perla 1.5m	33	29	16	81.25	33	81.25	1089	2681.25	a= 92.15442	Y25= 84.01606
	24	48	26	84.61538	24	84.61538	576	2030.769	b= -0.32553	
	11	49	26	88.46153	11	88.46153	121	973.0769		
					68	254.3269	1786	5685.096		
Boston 1.5m	48	47	33	42.42424	48	42.42424	2304	2036.363	a= 51.54957	Y25= 46.74902
	28	51	35	45.71428	28	45.71428	784	1280	b= -0.19202	
	23	59	40	47.5	23	47.5	529	1092.5		
					99	135.6385	3617	4408.863		
Batán 50cm	48	34	23	47.82608	48	47.82608	2304	2295.652	a= 55.96942	Y25= 51.28477
	33	40	27	48.14814	33	48.14814	1089	1588.888	b= -0.18738	
	23	38	25	52	23	52	529	1196		
	12	37	24	54.16666	12	54.16666	144	650		
					116	202.1409	4066	5730.541		
Boston 50cm	45	36	24	50	45	50	2025	2250	a= 63.07028	Y25= 55.45459
	39	44	29	51.72413	39	51.72413	1521	2017.241	b= -0.30462	
	28	35	23	52.17391	28	52.17391	784	1460.869		
	14	40	25	60	14	60	196	840		
					126	213.8980	4526	6568.110		
E.Estrada 50cm	31	40	26	53.84615	31	53.84615	961	1669.230	a= 71.54310	Y25= 57.88984
	21	42	26	61.53846	21	61.53846	441	1292.307	b= -0.54613	
	10	43	26	65.38461	10	65.38461	100	653.8461		
					62	180.7692	1502	3615.384		
Kent2 2m	46	43	27	59.25925	46	59.25925	2116	2725.925	a= 69.75308	Y25= 63.96604
	30	39	24	62.5	30	62.5	900	1875	b= -0.23148	
	14	40	24	66.66666	14	66.66666	196	933.3333		
					90	188.4259	3212	5534.259		
Boston 2m	40	50	35	42.85714	40	42.85714	1600	1714.285	a= 51.32980	Y25= 46.11031
	26	57	39	46.15384	26	46.15384	676	1200	b= -0.20877	
	13	49	33	48.48484	13	48.48484	169	630.3030		
					79	137.4958	2445	3544.588		
24 Millas 1m	43	32	17	88.23529	43	88.23529	1849	3794.117	a= 100.0919	Y25= 93.19852
	23	31	16	93.75	23	93.75	529	2156.25	b= -0.27573	
					66	181.9852	2378	5950.367		
Perla 2m	42	28	17	64.70588	42	64.70588	1764	2717.647	a= 94.61306	Y25= 76.08700
	29	29	17	70.58823	29	70.58823	841	2047.058	b= -0.74104	
	17	33	18	83.33333	17	83.33333	289	1416.666		
				88	218.6274	2894	6181.372			
Matina 50cm	42	42	27	55.55555	42	55.55555	1764	2333.333	a= 73.19038	Y25= 62.15630
	33	33	21	57.14285	33	57.14285	1089	1885.714	b= -0.44136	
	19	43	26	65.38461	19	65.38461	361	1242.307		
					94	178.0830	3214	5461.355		
Boston 3m	44	39	26	50	44	50	1936	2200	a= 53.28039	Y25= 51.54259
	29	44	29	51.72413	29	51.72413	841	1500	b= -0.06951	
	15	38	25	52	15	52	225	780		
					88	153.7241	3002	4480		

Estrada 1.50m	49	33	20	65	49	65	2401	3185	a= 76.22505	Y25= 70.51069
	24	41	24	70.83333	24	70.83333	576	1700	b= -0.22857	
	15	38	22	72.72727	15	72.72727	225	1090.909		
					88	208.5606	3202	5975.909		
Estrada 3m	34	26	15	73.33333	34	73.33333	1156	2493.333	a= 76.16666	Y25= 74.08333
	14	28	16	75	14	75	196	1050	b= -0.08333	
					48	148.3333	1352	3543.333		
Matina 5m	37	25	15	66.66666	37	66.66666	1369	2466.666	a= 73.96449	Y25= 69.03353
	24	22	13	69.23076	24	69.23076	576	1661.538	b= -0.19723	
					61	135.8974	1945	4128.205		
Cultivez 4.5m	40	60	42	42.85714	40	42.85714	1600	1714.285	a= 53.36718	Y25= 47.00594
	35	55	38	44.73684	35	44.73684	1225	1565.789	b= -0.25444	
	20	55	37	48.64864	20	48.64864	400	972.9729		
	12	51	34	50	12	50	144	600		
				107	186.2426	3369	4853.048			
Cultivez 1.5m	36	65	49	32.65306	36	32.65306	1296	1175.510	a= 43.64736	Y25= 36.42895
	25	55	40	37.5	25	37.5	625	937.5	b= -0.28873	
	11	56	40	40	11	40	121	440		
				72	110.1530	2042	2553.010			

**ANEXO N° 2.**

CUADRO N°1

## TEXTURA

Muestra	% Arena	% Arcilla	% Limo	Textura
<b>MATINA 0.5m</b>	6	36	58	FAL
1	36	10	54	FL
1.5	27	15	57	FL
2	22	13	64	FL
2.5	18	17	65	FL
3	20	28	52	FA-FAL
4	4	24	72	FL
4.5	11	16	73	FL
5	9	16	75	FL
6	10	12	77	FL
6.5	26	12	62	FL
7	18	4	78	FL
<b>ZENT 0.5m</b>	26	16	58	FL
1	10	18	72	FL
1.5	98	1	1	a
2	54	21	25	F <sub>Aa</sub> -F <sub>a</sub>
2.5	100	0	0	a
3	100	0	0	a
4	100	0	0	a
4.5	100	0	0	a
5	100	0	0	a
5.5	100	0	0	a
6	100	0	0	a
7	100	0	0	a
7.5	100	0	0	a
<b>BATAN 0.5m</b>	40	19	41	F
1	32	36	32	FA
1.5	54	15	31	F <sub>a</sub>
2	66	8	26	F <sub>a</sub>
2.5	56	12	32	F <sub>a</sub>
3	69	11	20	F <sub>a</sub>
4	69	13	18	F <sub>a</sub>
5	69	11	20	F <sub>a</sub>
<b>BOSTON 0.5m</b>	30	17	53	FL
1	32	23	45	F
1.5	42	15	43	F
2	32	11	57	FL
2.5	34	11	55	FL
3	48	11	41	F
4	27	23	50	F-FL
5	23	33	44	FA
5.5	45	13	42	F
7	11	43	46	AL
8	19	41	40	A
9.5	17	40	43	FAL

CUADRO No2

## TEXTURA

Muestra	% Arena	% Arcilla	% Limo	Textura
PERLA 0.5m	2	34	64	FAL
1	8	44	48	AL
1.5	4	28	68	FAL
2	12	46	42	AL
2.5	6	26	68	FL
3	52	16	31	F
3.5	39	13	48	F
4	51	11	38	F
4.5	39	15	46	F
5	13	33	54	FAL
E. ESTRADA 0.5m	24	30	46	FA
1	22	34	44	FA
1.5	34	32	34	FA
2	38	13	49	F
2.5	72	13	15	Fa
3	56	20	24	FaA-Fa
BARBILLA 0.5m	100	0	0	a
1	100	0	0	a
1.5	100	0	0	a
2	100	0	0	a
2.5	100	0	0	a
SIGUIRRES 0.5m	100	0	0	a
1	100	0	0	a
1.5	100	0	0	a
2	100	0	0	a
2.5	100	0	0	a
B. MATINA 0.5m	100	0	0	a
1	100	0	0	a
BRISTOL 1m	22	19	59	FL
1.5	31	15	54	FL
2	26	9	65	FL
2.5	11	11	78	FL
3	37	12	51	FL
4	100	0	0	a

CUADRO N<sup>o</sup>3

TEXTURA

Muestra	% Arena	% Arcilla	% Limo	Textura
<b>CULTIVEZ 0.5m</b>	33	20	47	F
1	55	17	28	Fa
1.5	23	16	61	F
2	16	12	72	FL
2.5	7	34	59	FA
3	15	31	54	FAL
3.5	7	14	79	FL
4	25	22	53	FL
4.5	29	18	53	FL
5	7	20	73	FL
5.5	33	16	51	FL
6	9	18	73	FL
6.5	19	24	57	FL
<b>28 MILLAS 0.5m</b>	25	25	50	F
1	61	13	26	Fa
2	23	38	39	FA
2.5	49	19	32	F
3	61	18	21	Fa
4	23	15	62	FL
4.5	45	27	28	F <sub>Aa</sub> -FA
5	30	21	49	F
<b>23 MILLAS 0.5m</b>	17	40	43	FAL
1	25	23	52	FL
1.5	49	20	31	F
2	17	30	53	FAL
2.5	19	31	50	FAL
3	61	13	26	Fa
3.5	25	35	40	FA
4	33	28	39	FA
<b>24 MILLAS 0.5m</b>	15	45	40	A-AL
1.5	23	21	56	FL
2	21	25	54	FL
<b>DAVAO 0.5m</b>	29	30	41	FA
1	23	26	51	FL
1.5	100	0	0	a

**ANEXO N° 3.**

CUADRO N°1

GRANULOMETRIA									
Muestra	Tamaño um	>2000	2000 a 1000	1000 a 425	425 a 212	212 a 53	Total de Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)
			----- % del total de la arena -----						
BATAN 0.5m	%	-	-	2.1	15.6	82.2	40	19	41
1	%	-	-	17.4	41	41.3	32	36	32
1.5	%	-	-	2.6	24.3	72.6	54	15	31
2	%	-	-	-	12.9	86.9	66	8	26
2.5	%	-	-	1.6	11.9	86.5	56	12	32
3	%	-	-	-	8.3	91.2	69	11	20
4	%	-	-	-	10.6	89.4	69	13	18
5	%	-	-	0.55	13.25	86.19	69	11	20
6	%	2.82	4.17	11.71	33.97	47.32	100		
B.MATINA 0.5m	%	0.4	2	34	59	4	100	0	0
1	%	-	1	25	66.6	6.8	100	0	0
BOSTON 0.5m	%	-	0.5	2.27	19.28	77.92	30	17	53
1	%	-	-	0.42	10.67	88.91	32	23	45
1.5	%	-	-	0.53	10.44	89.03	42	15	43
2	%	-	-	0.12	0.5	99.37	32	11	57
2.5	%	-	0.1	-	1	98.98	34	11	55
3	%	-	-	1.16	2.76	96.08	48	11	41

CUADRO N°2

GRANULOMETRIA									
Muestra	Tamaño um	>2000	2000 a 1000	1000 a 425	425 a 212	212 a 53	Total de Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)
			----- % del total de la arena -----						
BRISTOL 1m	%	-	1.3	17.7	41.1	39.8	22	19	59
1.5	%	-	1	18.6	43.7	36.9	31	15	54
2	%	-	0.5	11.2	29.17	60	26	9	65
2.5	%	-	0.5	7.5	16.7	75.3	11	11	78
3	%	8.7	2.3	19.3	43.7	25.9	37	12	51
4	%	1.2	6.1	35.1	46.7	10.9	100	0	0
PERLA 3m	%	-	-	-	5.9	94	52	16	31
4.5	%	-	-	-	0.34	99.66	39	15	46
5	%	-	-	-	0.36	99.64	13	33	54
E. ESTRADA 2m	%	-	-	0.5	11.6	88	38	13	49
2.5	%	-	-	1.4	18	81	72	13	15
3.5	%	-	-	3.2	35.1	61.5	100	0	0
4	%	-	-	9.8	52.9	37.3	100	0	0
5	%	1.2	2.8	29.5	49.3	17.2	100	0	0
5.5	%	5.5	7.5	35.7	41.6	9.7	100	0	0
SIGUIRRES 0.5m	%	1.2	2.1	10.8	28.6	57.3	100	0	0
1	%	4	1	21	47	27	100	0	0
1.5	%	1.5	8	45	32	13	100	0	0
2	%	-	0.6	12	48	39	100	0	0
2.5	%	1.6	3.9	41.5	37.7	15.3	100	0	0

CUADRO N°3

GRANULOMETRIA										
Muestra	Tamano	>2000	2000 a	1000 a	425 a	212 a	Total de	Arcilla	Limo	
			1000	425	212	53				Arena
		----- % del total de la arena -----					(%)	(%)	(%)	
Matina 1.5m	%	-	-	-	-	100	27	15	57	
2	%	-	-	-	-	100	22	13	64	
2.5	%	-	-	-	1	99	18	17	65	
4	%	-	-	-	1.04	99	4	24	72	
4.5	%	-	-	-	1.22	98.8	11	16	73	
5	%	-	-	-	5.1	94.9	9	16	75	
6	%	-	-	-	1.9	98.2	10	12	77	
6.5	%	-	-	-	0.9	99.1	26	12	62	
7	%	-	-	-	7.7	92.9	18	4	78	
ZENT 0.5m	%	-	-	0.05	8.64	91.31	26	16	58	
1.5	%	-	-	0.62	2.67	96.71	98	1	1	
2	%	-	0.16	1.11	28.82	69.9	54	21	25	
2.5	%	0.68	0.49	20.14	55.33	23.36	100	0	0	
3	%	6.44	6.13	30.82	41.5	15.11	100	0	0	
4	%	1.33	5.18	58.68	28.62	6.19	100	0	0	
4.5	%	30.4	7.62	26.53	27.52	7.93	100	0	0	
5	%	46.3	7.99	21.82	18.83	5.04	100	0	0	
5.5	%	29.8	11.44	29.65	23.93	5.15	100	0	0	
6	%	77.9	7.18	8.05	5.09	1.73	100	0	0	
7	%	49.3	14.3	21.5	12.2	2.6	100	0	0	
7.5	%	46.7	9.2	23.5	15.5	4.9	100	0	0	

CUADRO No4

GRANULOMETRIA										
Muestra	Tamano	>2000	2000 a 1000	1000 a 425	425 a 212	212 a 53	Total de Arena	Arcilla	Limo	
			----- % del total de la arena -----				(%)	(%)	(%)	
23 MILLAS	2m	%	-	-	-	2.2	87.8	17	30	53
	3	%	-	-	3.8	28.9	67.3	61	13	26
CULTIVEZ	1.5m	%	-	-	-	0.4	99.6	23	16	61
	2	%	-	-	-	1	99	16	12	72
	3.5	%	-	-	-	8.2	91.8	7	14	79
	5	%	-	-	-	10.4	89.6	7	20	73
	6	%	-	-	-	3.7	96.3	9	18	73
28 MILLAS	1m	%	1.1	-	5.7	21.6	71.6	61	13	26
	3	%	-	0.4	9.7	39.5	50.3	61	18	21
	3.5	%	-	0.7	14.3	40.8	44.1	100	0	0
BARBILLA	0.5m	%	-	1.29	10.86	46.91	40.94	100	0	0
	1	%	-	-	13.77	41.49	44.73	100	0	0
	1.5	%	-	-	9	52.66	38.33	100	0	0
	2	%	-	-	-	12.88	87.12	100	0	0
	2.5	%	-	1.3	14.6	39.48	44.62	100	0	0
DAVAO	1.5M	%	22.3	1.1	7.8	44.2	24.5	100	0	0

**ANEXO N° 4.**

## **EXPLICACION DE LOS ITEMS.**

En relación, al primer items sobre el SPT, en la columna vertical, se ubican las diferentes profundidades en que se muestreo, llegando en todos los gráficos a 7.05 m. Los valores horizontales, significan el número de golpes que requiere el suelo para la penetración del barreno, mide el grado de compactación del substrato. Entre menor cantidad de golpes, el suelo es menos compacto y resistente.

Con respecto, al items del factor de seguridad, en los métodos de Iwasaki y Seed, en la columna vertical, se localiza las diferentes profundidades y en la horizontal el factor de correlación. En ambos métodos se utilizaron dos aceleraciones:

0.40g= -----

0.25g= -----

Cuando el factor de correlación es inferior a 1, significa que el suelo es licuable, sí es superior a 1, no es licuable.

Finalmente, el último items sobre el potencial de licuefacción, existen cuatro formas de representar las curvas de la granulometría en diferentes profundidades. Las formas son:

----

—

....

....

....

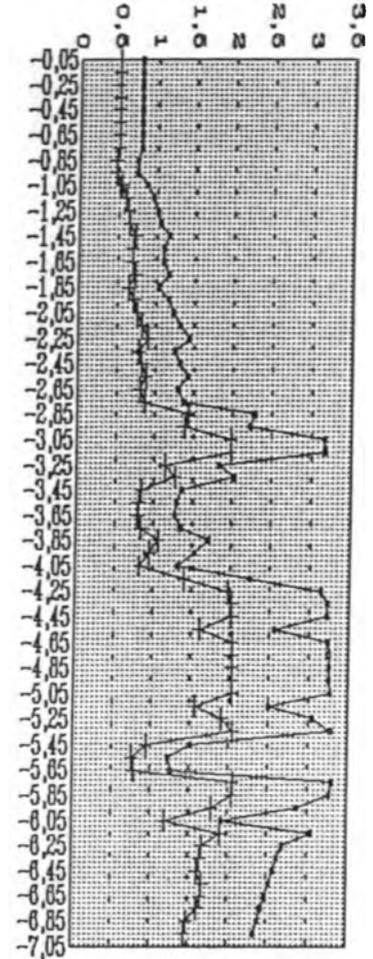
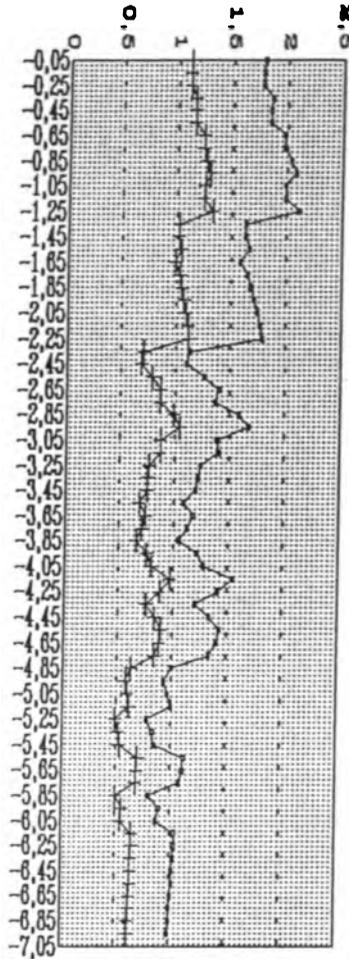
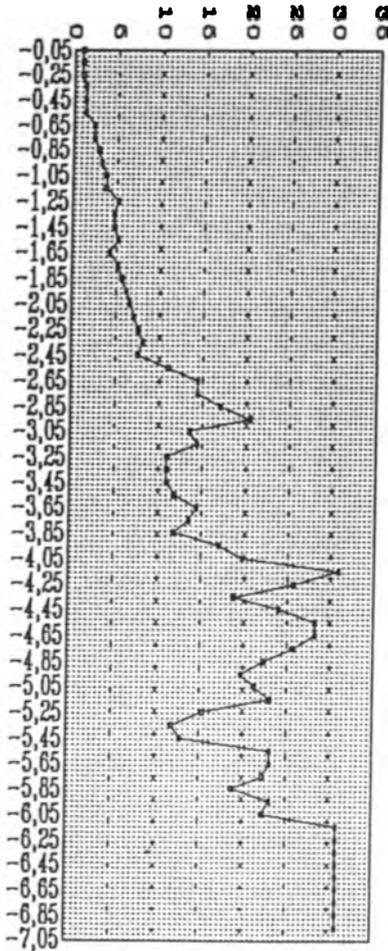
# Zent

WATER TABLE: 2.5m

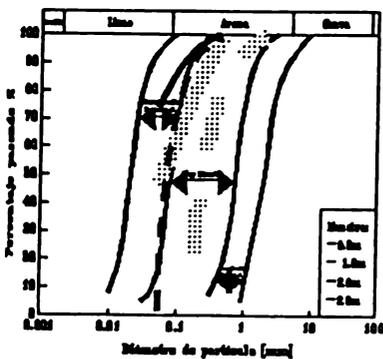
SPT\*

Factor of safety  
HASAKI METHOD

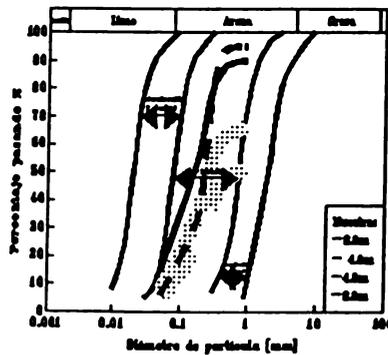
Factor of safety  
SKID METHOD



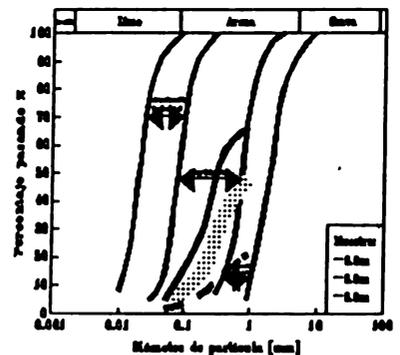
Potencial de Lixiviação  
ProyectoZent



Potencial de Lixiviação  
ProyectoZent



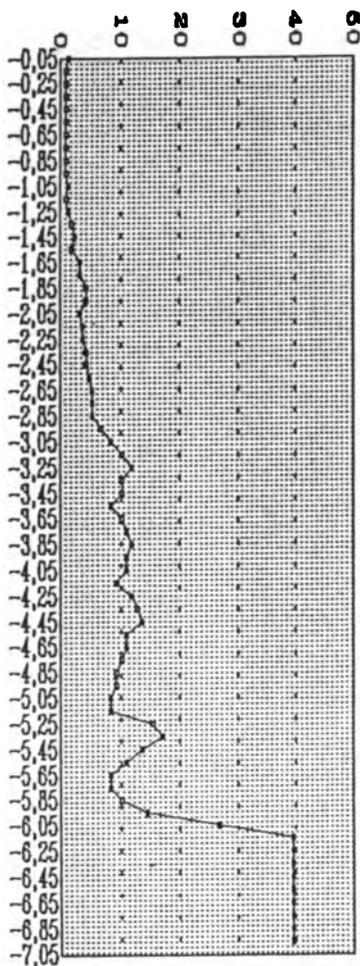
Potencial de Lixiviação  
ProyectoZent



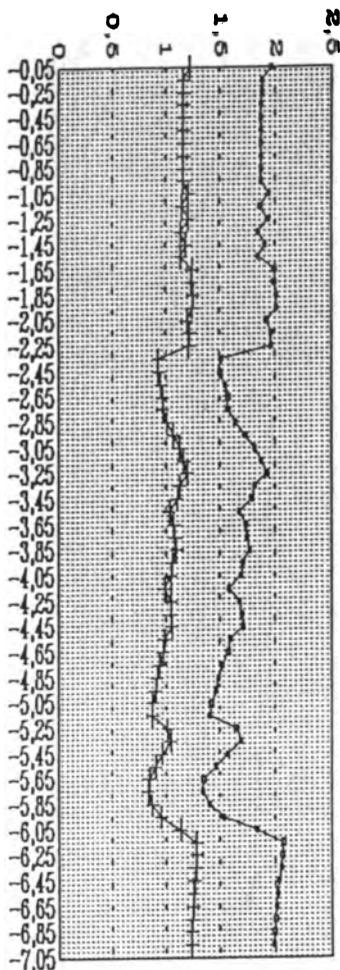
# E. Estrada

WATER TABLE: 3.0m

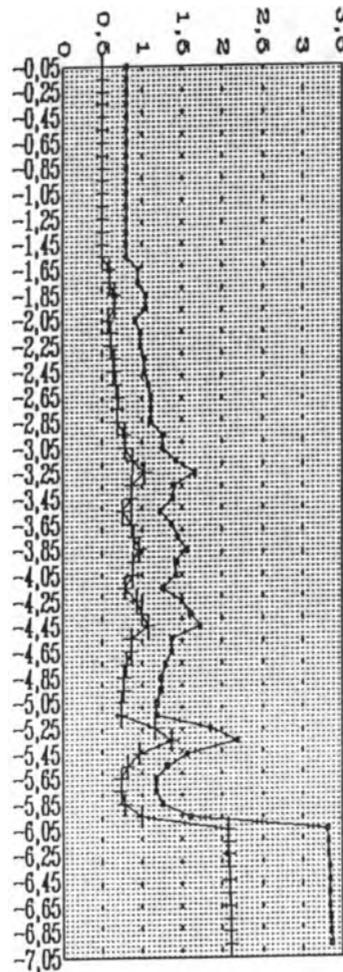
SPT\*



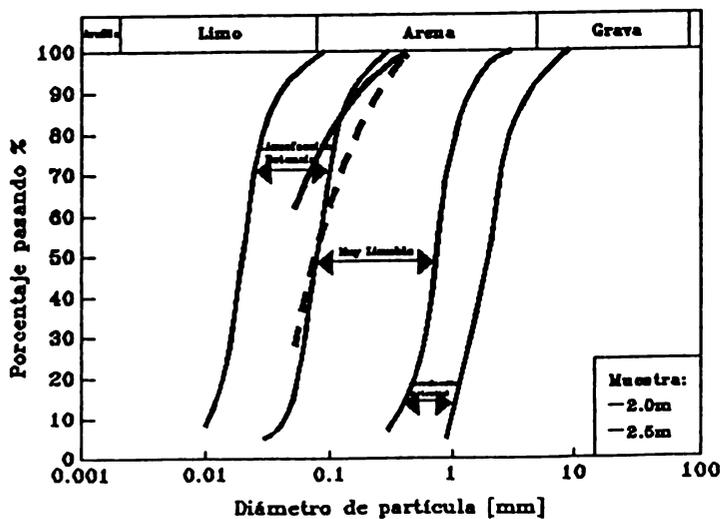
Factor of safety  
IWASAKI METHOD



Factor of safety  
SEED METHOD



Potencial de Licuefacción  
Proyecto: E. Estrada



Geotechnical Information from:  
Per Halstrom, RIT,  
Olga Matamoras V., UNA  
Jan Skogberg, RIT

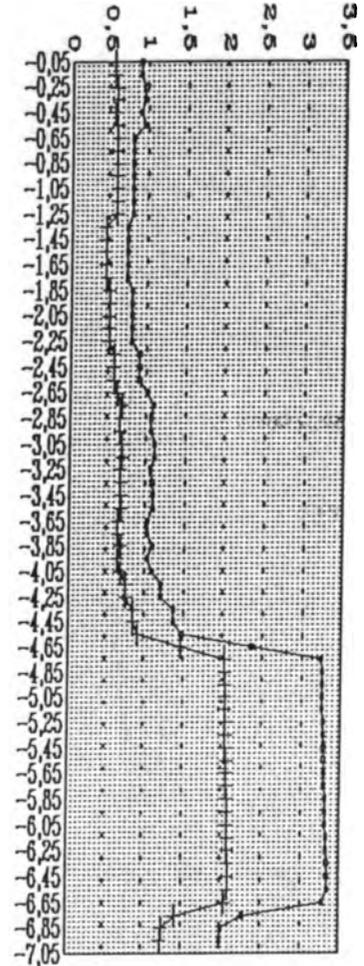
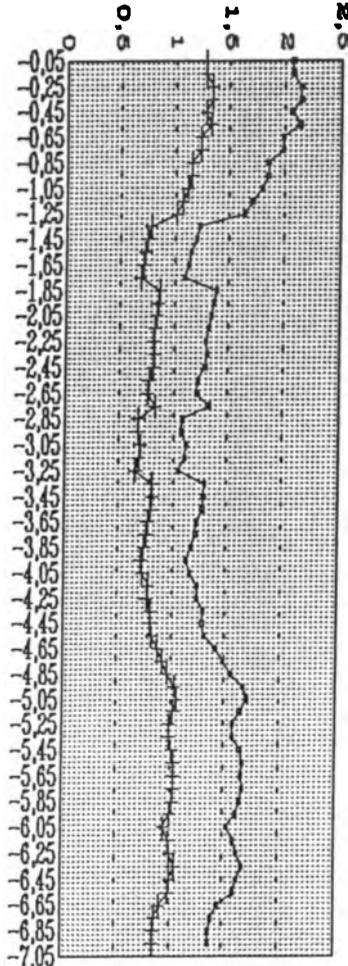
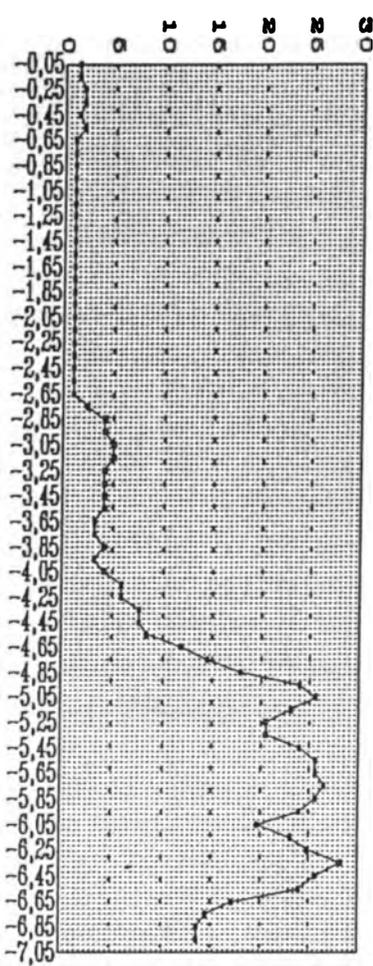
# 23 Millas

WATER TABLE: 1.0m

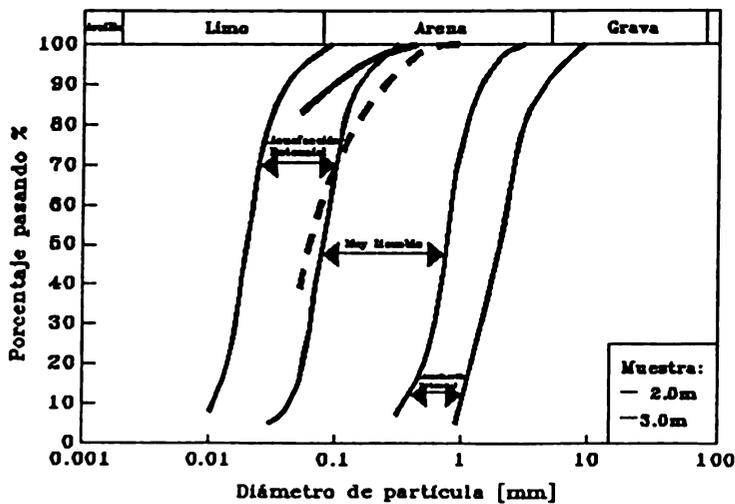
SPT#

Factor of safety  
HASAKI METHOD

Factor of safety  
SEED METHOD



Potencial de Licuefacción  
Proyecto: 23 Millas



Geotechnical Information from:  
Per Halstrom, RIT,  
Olga Matamoros V., UNA,  
Jan Skogberg, RIT

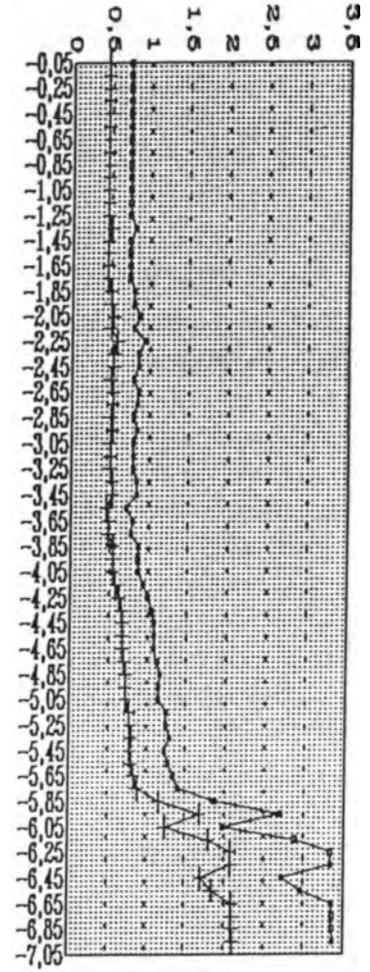
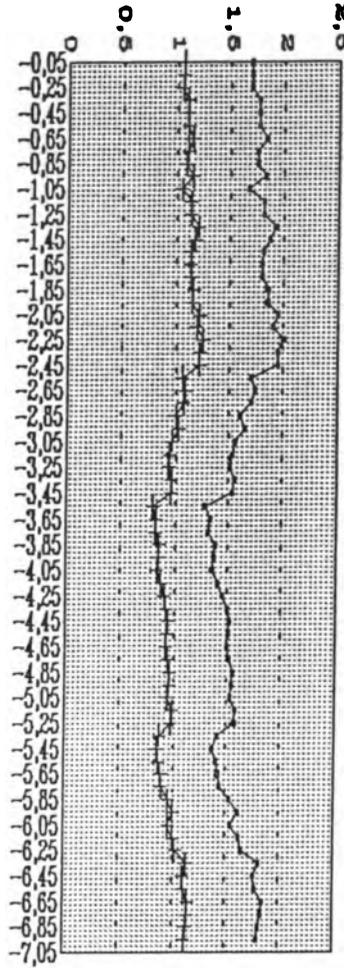
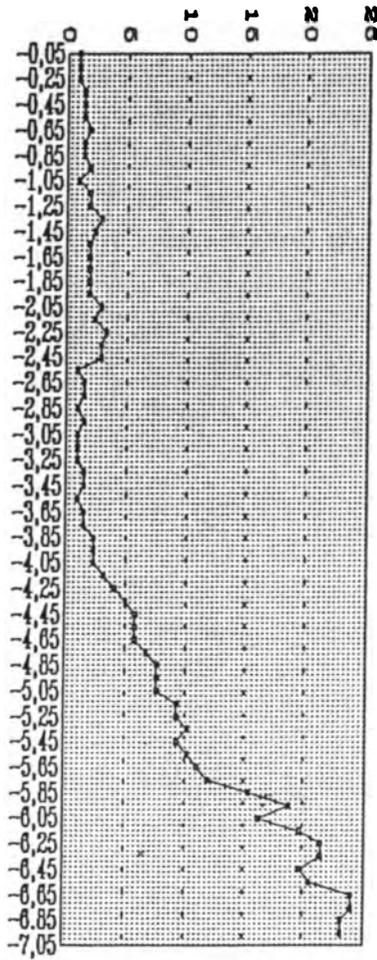
# Boston

WATER TABLE: 2.5m

SPT\*

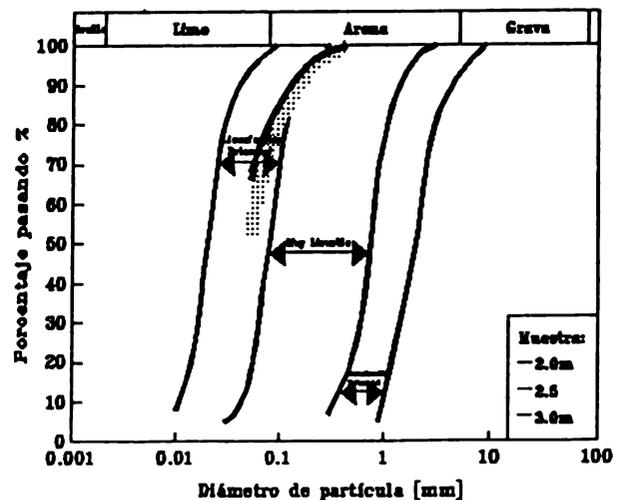
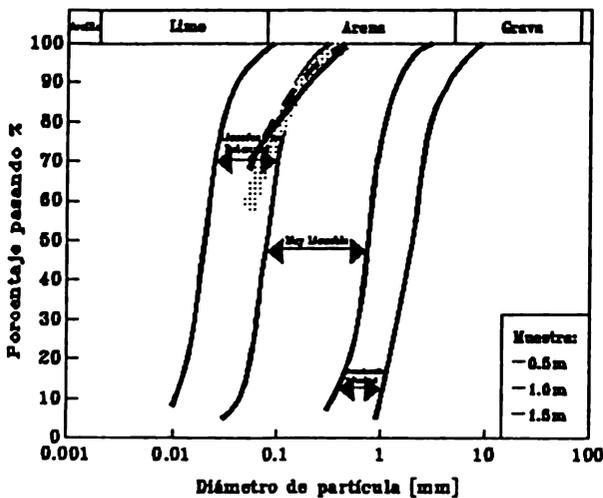
Factor of safety  
MUSKIEVICH METHOD

Factor of safety  
SEED METHOD



Potencial de Licuefacción  
Proyecto: Boston

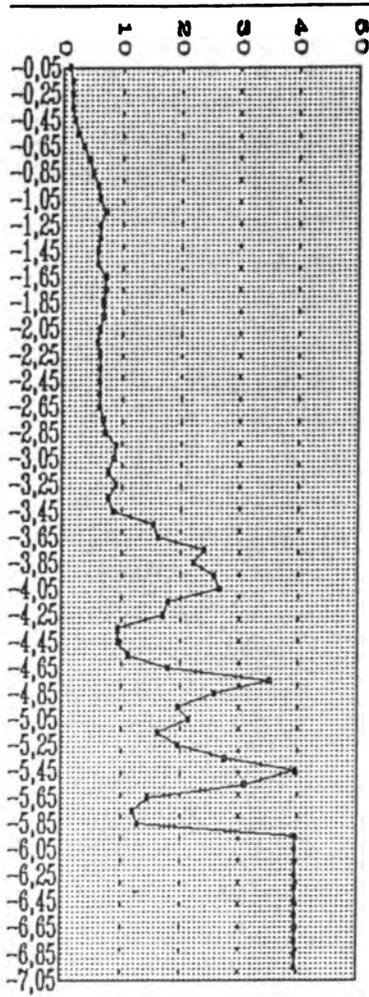
Potencial de Licuefacción  
Proyecto: Boston



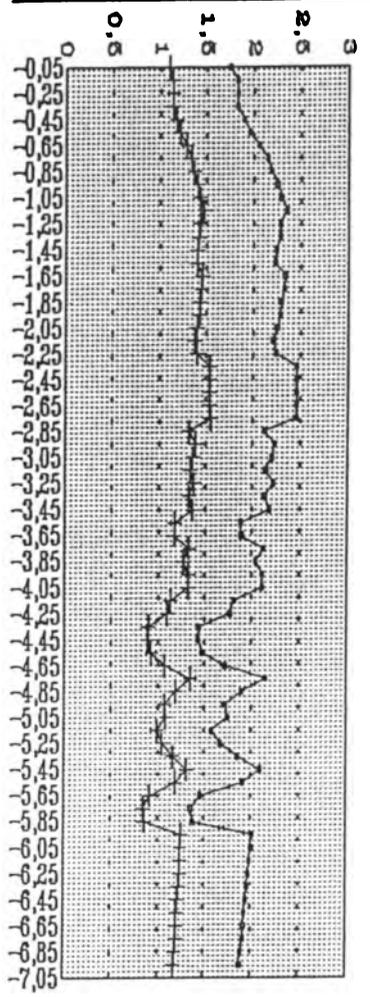
# Bristol

WATER TABLE: 3.5m

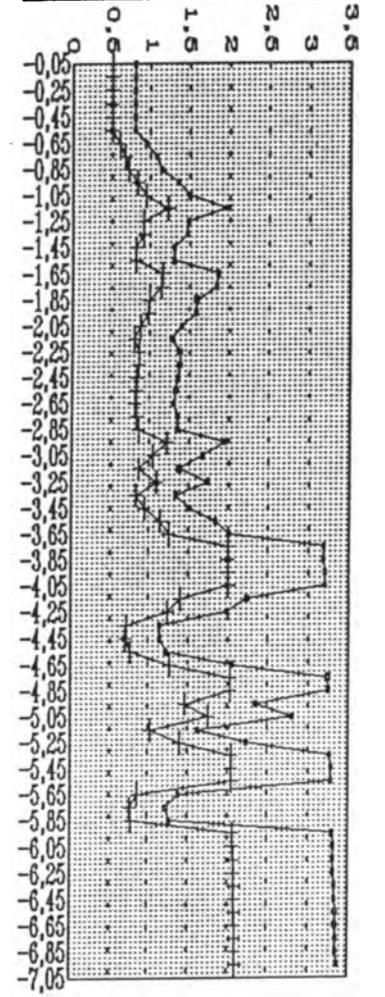
SPT\*



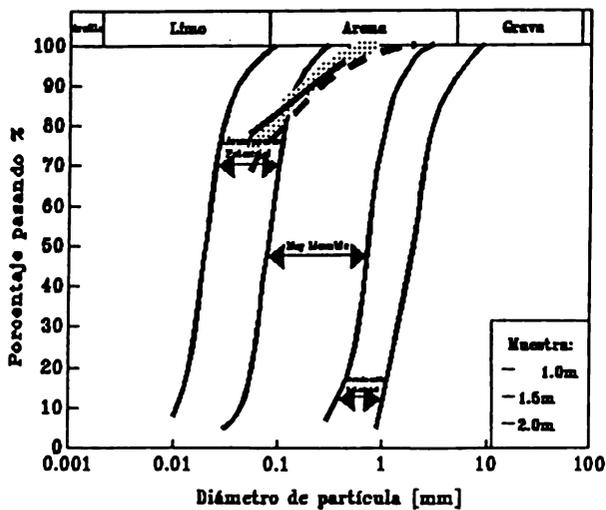
Factor of safety  
IRASAKI METHOD



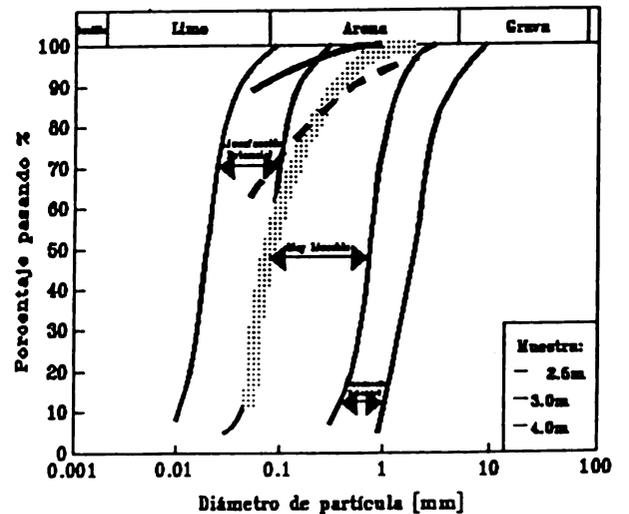
Factor of safety  
SEED METHOD



Potencial de Licuefacción  
Proyecto: Bristol



Potencial de Licuefacción  
Proyecto: Bristol



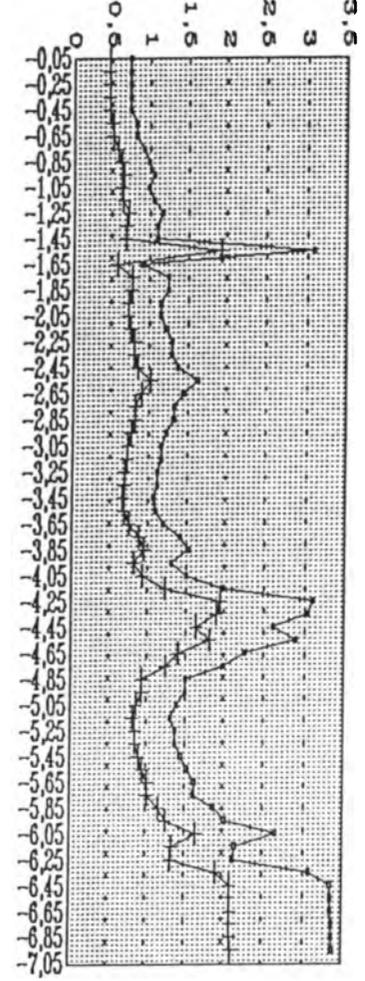
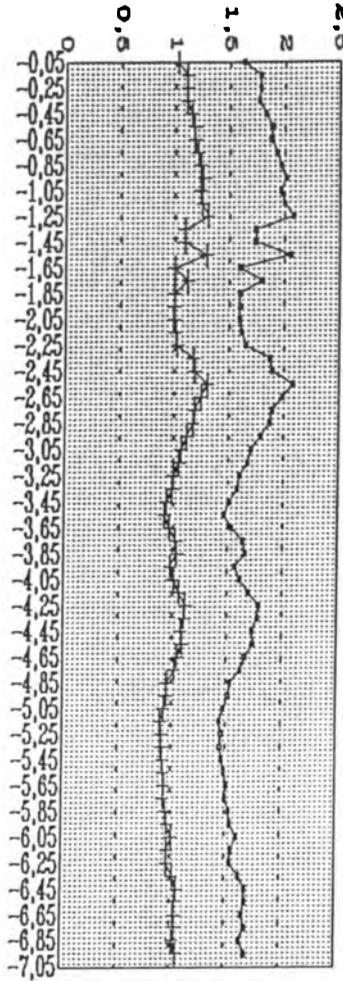
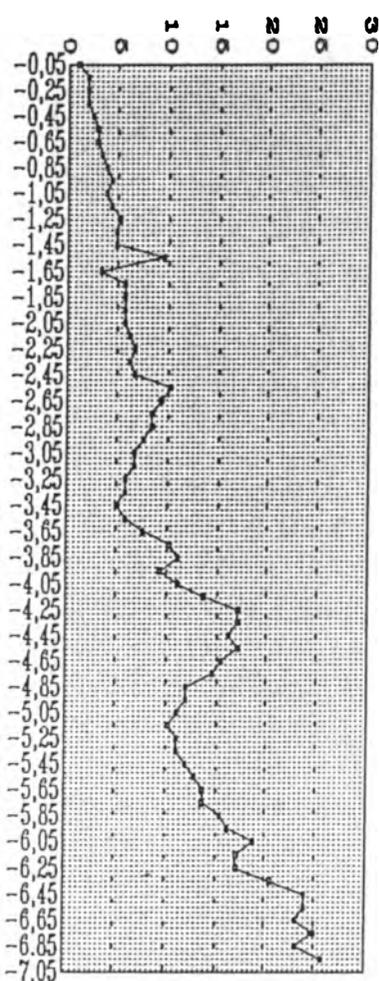
# Batan

WATER TABLE: 2.5m

SPT\*

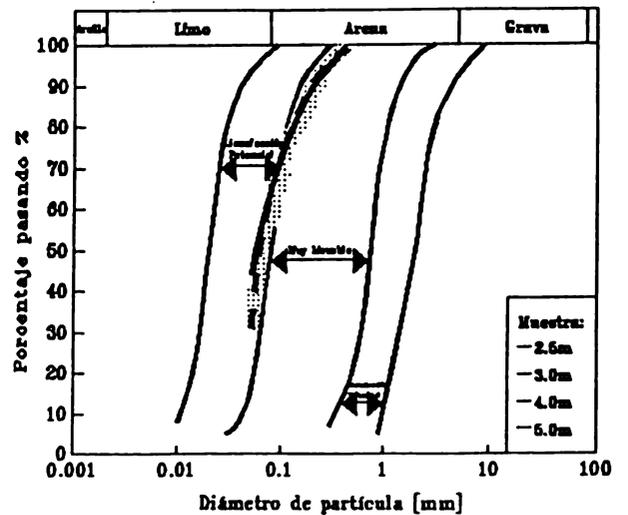
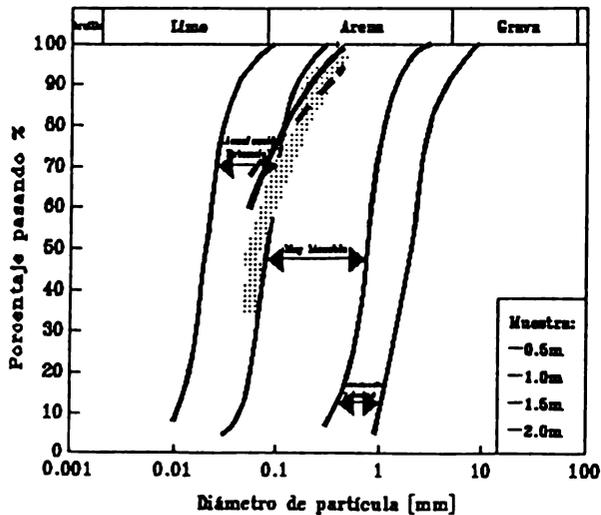
Factor of safety  
IWASAKI METHOD

Factor of safety  
SEED METHOD



Potencial de Licuefacción  
Proyecto: Batan

Potencial de Licuefacción  
Proyecto: Batan

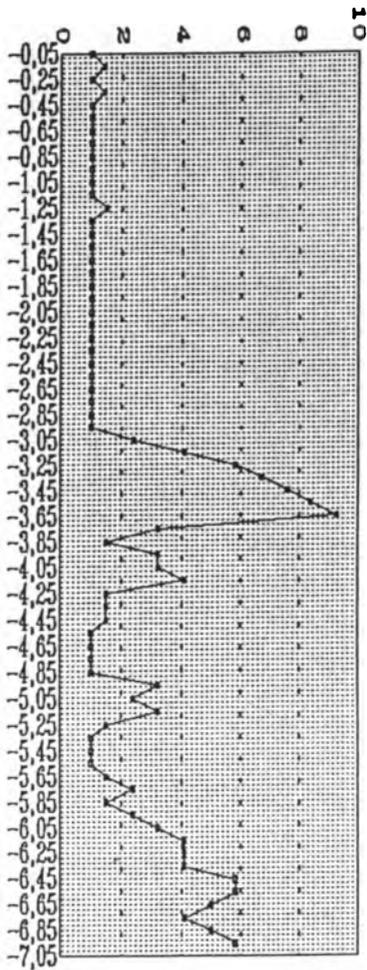




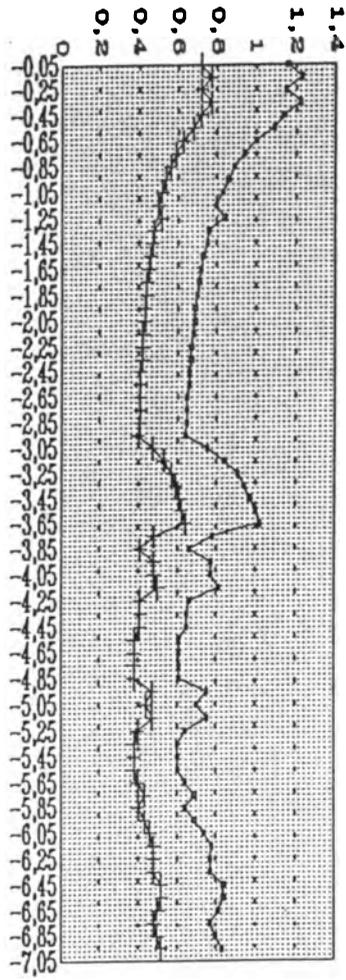
# Boca Matina

WATER TABLE: 0.5m

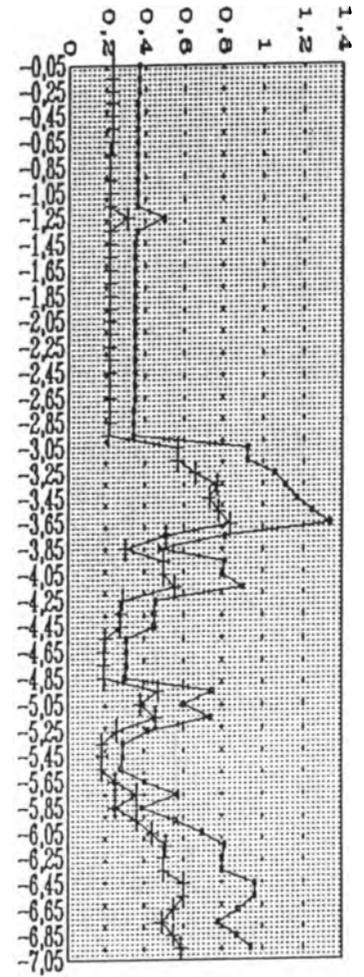
SPT\*



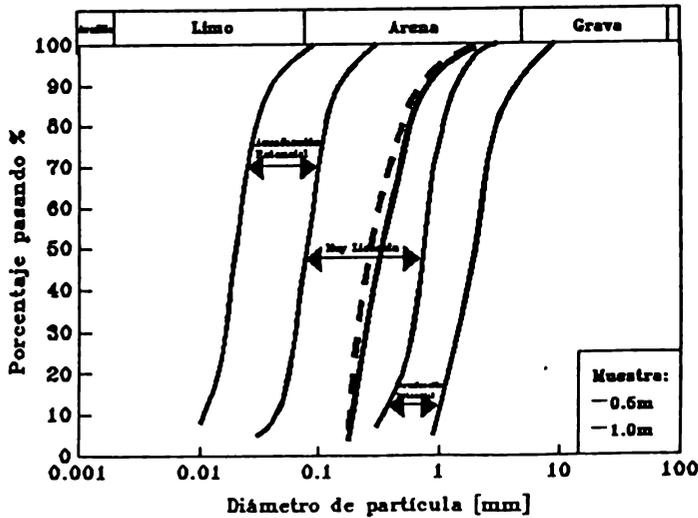
Factor of safety  
IWASAKI METHOD



Factor of safety  
SEED METHOD



Potencial de Licuación  
Proyecto: Boca Matina

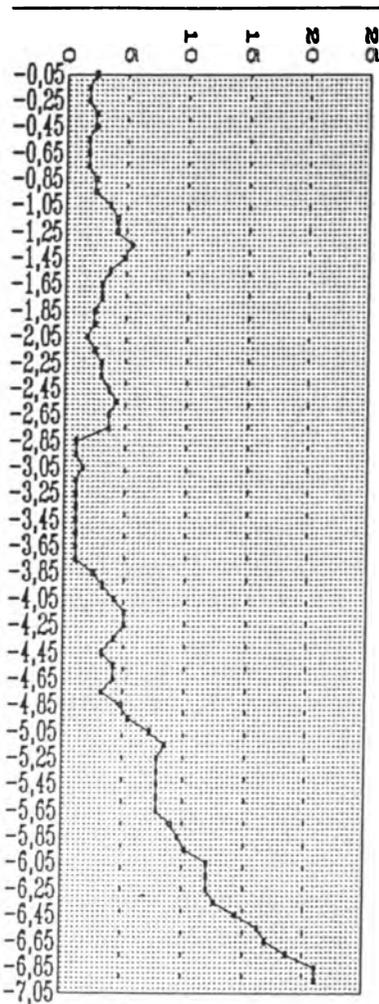


Geotechnical information from:  
Per Helstrom, RIT,  
Olga Matamoros V., UNA  
Jan Skogberg, RIT

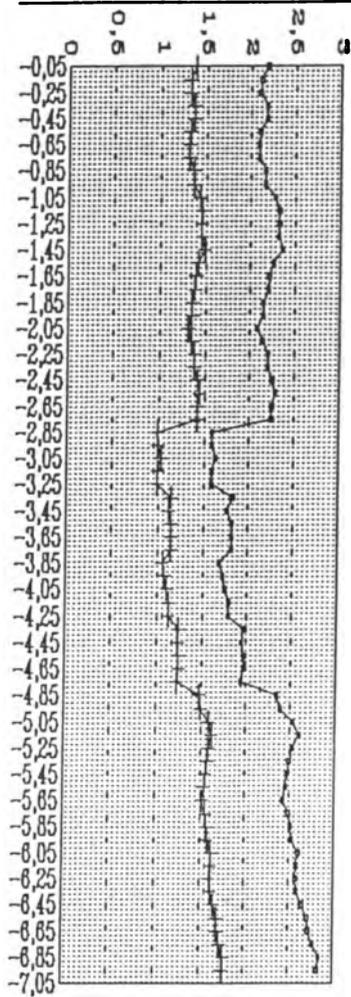
# Perla

WATER TABLE: 5.0m

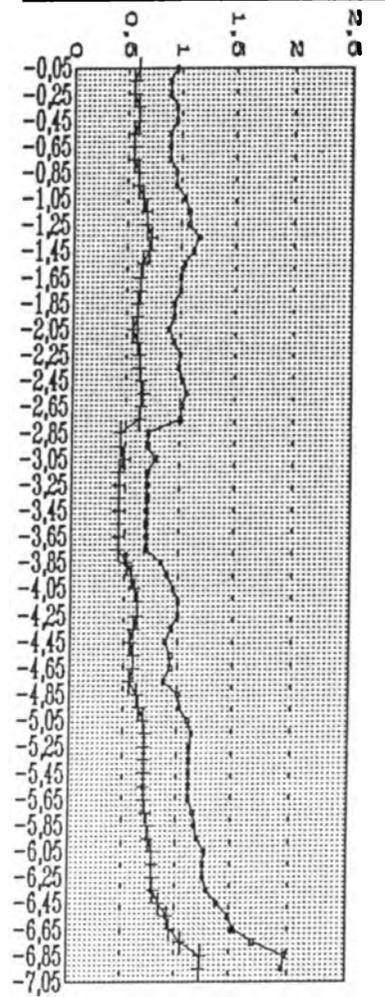
SPT#



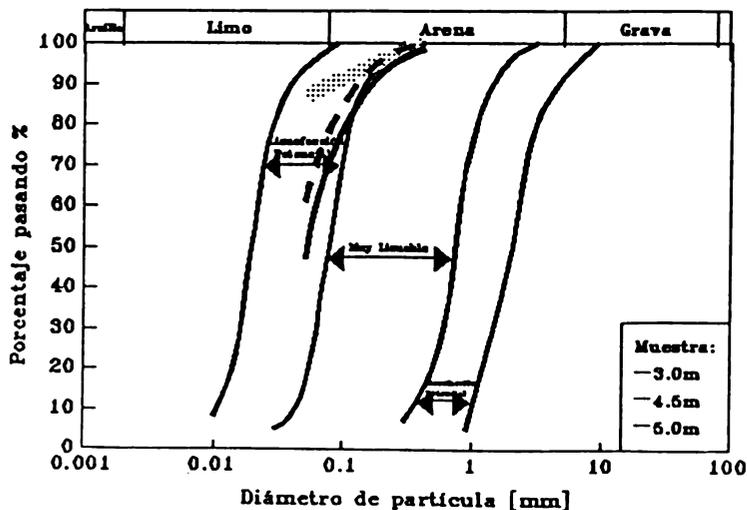
Factor of safety  
IWASAKI METHOD



Factor of safety  
SEED METHOD



Potencial de Licufacción  
Proyecto:Perla



Geotechnical information from:  
Per Halstrom, RIT,  
Olga Matamoros V., UNA,  
Jan Skogsberg, RIT