

CAPITULO IV

MODELO DE PREDICION DE INTENSIDADES SISMICAS

En este capítulo se trata de aplicar a la realidad sismotectónica de Costa Rica y particularmente al área de estudio el, modelo de predicción de intensidades y de otros parámetros sísmicos y de daño desarrollado por Jack Evernden (1981, 1985, 1988). Dicho modelo consiste en un método por computadora para calcular patrones de intensidad para un terremoto dado. Este modelo ha sido

"probado extensamente comparando las predicciones con patrones de intensidad observados para numerosos terremotos históricos en Estados Unidos y el Este de Asia y ha sido usado por agencias federales y de Estado para estimar planes de preparación para emergencias y niveles de intensidad de sacudidas de varios sismos potenciales" (Evernden, J. 1985).

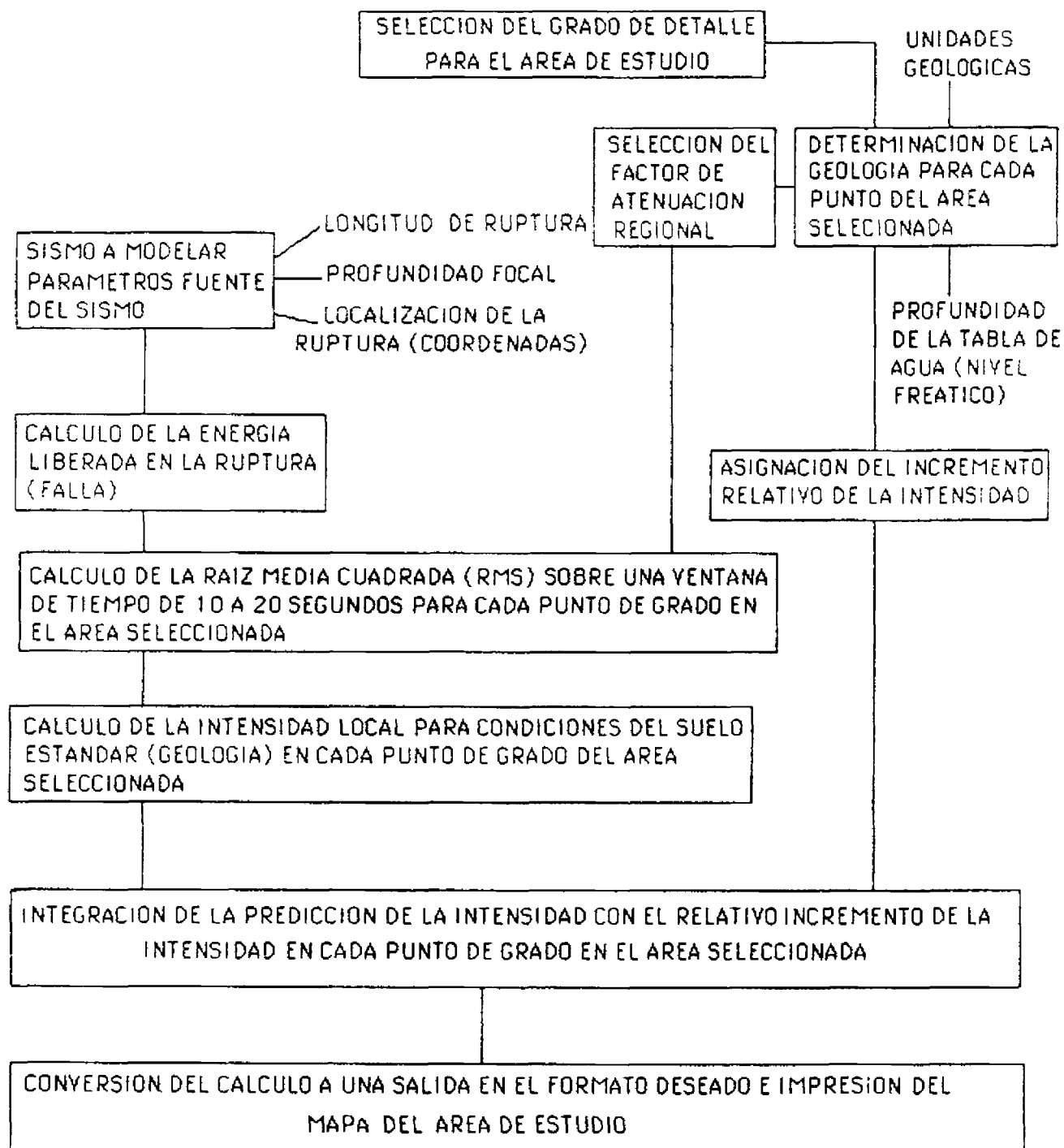
El diagrama de flujo de la figura 4-1 muestra las variables y el procedimiento usado en este programa, así como el procedimiento de cálculo matemático (ver copia de escala de intensidades en apéndice IV).

Los elementos que requiere esta técnica de modelado son:

1. Una ley que expresa la razón de atenuación de la intensidad relacionada con las ondas sísmicas en la región a ser investigada;
2. Una correlación entre la condición geológica del suelo y la intensidad

FIGURA 4-1

DIAGRAMA DE FLUJO CON LAS VARIABLES UTILIZADAS EN EL MODELO DE PREDICCIÓN DE INTENSIDADES



FUENTE: Traducido de Evernden, J (1985)

- relativa esperada (la saturación del aluvión es usada como referencia a las condiciones del suelo);
3. Un mapa dando las diversas condiciones sísmicas del suelo de la región a investigar; y
 4. Un modelo matemático de la fuente del sismo (incluyendo localización, longitud de ruptura y profundidad focal), un esquema de cálculo que conceptualmente irradia energía desde cada segmento de la falla, atenuando cada incremento de acuerdo al punto 1, cálculo de una cantidad deseada para simular la raíz media cuadrada (RMS) de la aceleración sobre una ventana de tiempo de 10 a 20 segundos (materna de elección) centrado en la sacudida más fuerte (esto es, desde el punto más cercano de la falla), convertido en RMS de la aceleración dentro de una predicción de intensidad en aluvión saturado, y luego, usando datos de los elementos 2 y 3, calcula la predicción de intensidad para las condiciones del suelo del sitio. Este programa puede proveer intensidades tanto en la escala de intensidades de Mercalli Modificada como en la escala "Rossi Forel" (Traducción de Everden, J. y Thonson, J. 1985).

Como se dijo antes, este modelo ha sido aplicado por los autores en los Estados Unidos y China. Aquí se intenta la aplicación del mismo al área de estudio, con la salvedad de que la aplicación del mismo para éste caso se encuentra en una fase experimental.

La aplicación de este método al área de estudio, llevó como primer paso crear una matriz con la geología del área en las coordenadas comprendidas entre $9^{\circ} 40' 00''$ y $10^{\circ} 00' 00''$ de latitud norte y $83^{\circ} 45' 00''$ y $84^{\circ} 15' 00''$ de longitud oeste, en rejillas de medio por medio minuto de grado (aproximadamente 1 Km. por 1 Km) del mapa geológico de Costa Rica escala 1:200.000 (Dirección de Geología, Minas y Petróleo, 1969). El mapa 4-1* muestra las ciudades más importantes en el área de estudio.

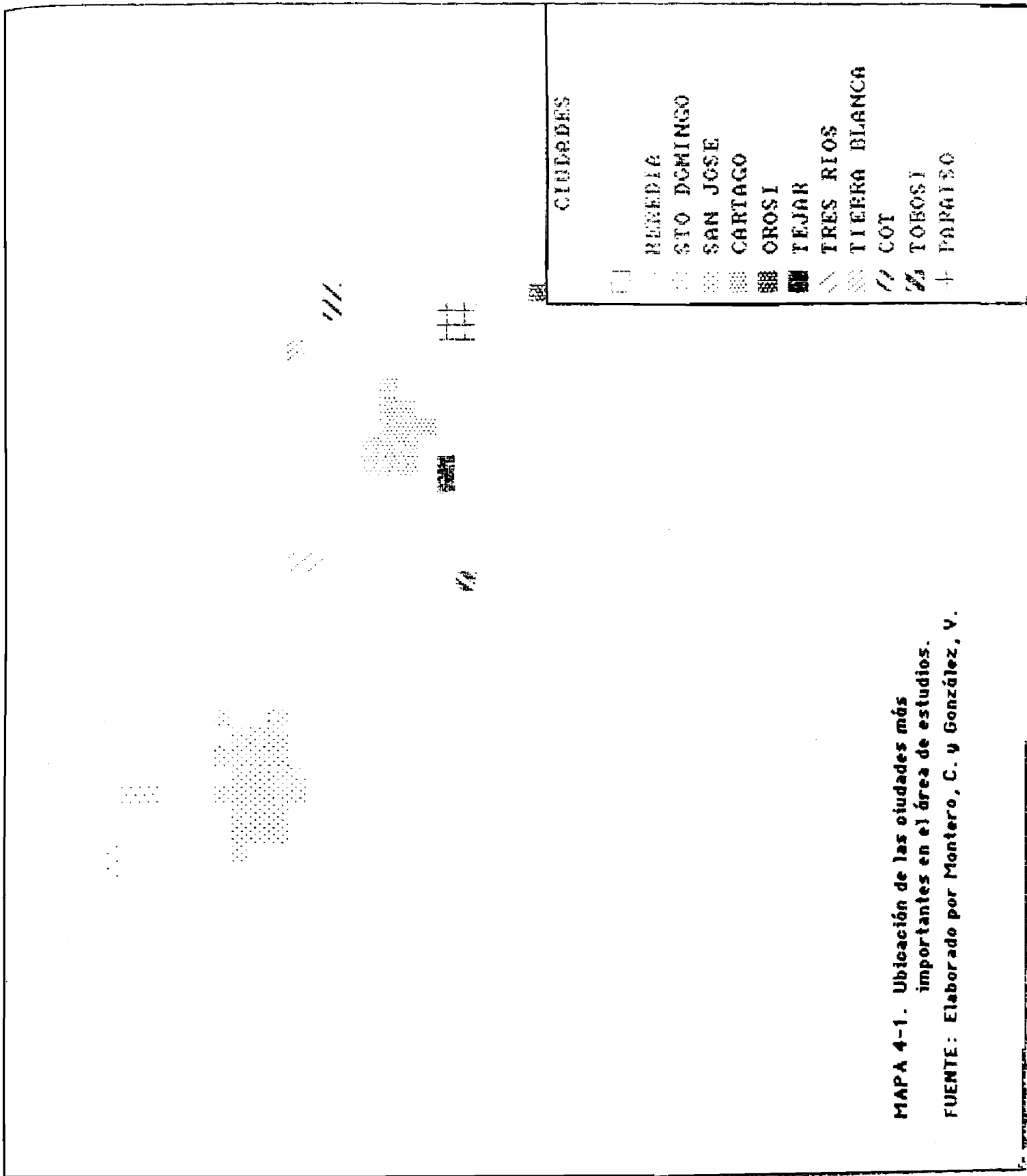
Se utilizó la clasificación de las unidades geológicas del mapa geológico de California, que muestra a grandes rasgos una diversidad geológica y formaciones bastante similares a las de nuestro país. Por lo tanto, dicha clasificación puede ser utilizada para nuestro caso de estudio. En el cuadro 4-1 aparece la traducción de la tabla presentada por Evernden y Thonson con las diferentes unidades del mapa geológico de California 1:250 000 y la clasificación de las unidades de condición del suelo para la construcción de la matriz de información geológica, que es la primera entrada de datos del programa.

En el cuadro 4-2, traducido aquí de la fuente citada, se presentan las intensidades esperadas de acuerdo a las unidades de condiciones del suelo comparadas con el aluvión saturado, dadas en el cuadro anterior.

Con la información del cuadro 4-1 se correlaciona la geología del área de estudio con base en el mapa geológico 1:200.000 de Costa Rica (hoja San José). El cuadro 4-3 muestra los resultados obtenidos.

El mapa 4-2 muestra la salida de los datos para las condiciones del suelo en el área de estudio, obtenidos del mapa geológico de Costa Rica procesado

* Nota: En el apéndice V, el lector encontrará una plantilla con las ciudades más importantes, segmentos de falla utilizados, escala y referencias geográficas para los mapas con éste formato.



CIDADES

- REEBEDIA
- STO DOMINGO
- SAN JOSE
- ▣ CARTAGO
- ▤ OROSI
- ▥ TEJAR
- ▧ TRES RIOS
- ▨ TIERRA BLANCA
- ▩ COY
- TOBOSI
- ⊕ PAPAISO

MAPA 4-1. Ubicación de las ciudades más importantes en el área de estudios.
 FUENTE: Elaborado por Montero, C. y González, V.

Cuadro 4-1.

**Correlación de las unidades geológicas del
mapa de California escala 1:250.000 con las
unidades de condición del suelo.**

Unidades del mapa geológico	Unidades de condiciones del suelo
Rocas graníticas y metamórficas (Kfv, gr, bi, ub, JTrv, m, mV, PpV, PmV,.....	A
Cu, Du, pS, pSv, pCc, PCgr, pC, epC, Tl)	
Rocas sedimentarias del Paleozoico.....	B
(Ms, PP, Pm, C, CP, CM, D, S, pSs, O, E)	
Rocas sedimentarias del Mesozoico temprano.....	C
(Jk, Ju, JmE, Tr, Kjf)	
Rocas sedimentarias del Cretácico al Eoceno.....	D
(Ec, E, Epc, Ep, K, Ku, KE)	
Rocas sedimentarias del Terciario.....	E
(QTC, TC, TE, Tm)	
Rocas sedimentarias del Oligoceno hasta el Plioceno Medio.....	F
(PmEc, PmE. Mc, Muc, Mu, Mmc, ME, de, d)	
Rocas sedimentarias del "Plioceno-Pleistoceno"*.....	G
(Qc, OP, Pc, Puc, Pu)	
Rocas volcánicas del Terciario.....	H
(Pv, Mu, Oliv, Eu, QTv, Tu)	
Rocas volcánicas del Cuaternario.....	I
(Qrv, Qpv)	
Depósitos sedimentarios del Cuaternario.....	J
(Qs, QaE, Qsc, Qf, Qb, Qst, QE, Qp, Qt, Qm)	

* entrecomillado en el cuadro original.

(Fuente: Evernden, J. y Thonson, J. 1985. Traducido por Montero, C y González, Y.)

Cuadro 4-2.

**Intensidades relativas esperadas para las
unidades de condición del suelo.**

Unidades de condición del suelo	Intensidades relativas comparadas con el aluvión saturado (J)
A.....	-3.00
B.....	-2.60
C.....	-2.20
D.....	-1.80
E.....	-1.70
F.....	-1.50
G.....	-1.00
H.....	-2.70
I.....	-2.70
J (aluvión saturado).....	0.00
Unidades de aluvión basados en la profundidad de la tabla de agua.	
J2*.....	0.00
L3.....	-1.00
M4.....	-1.50

*2 Profundidad de 0 a menos de 30 pies

3 Profundidad de 30 a menos de 100 pies

4 Profundidad mayor de 100 pies

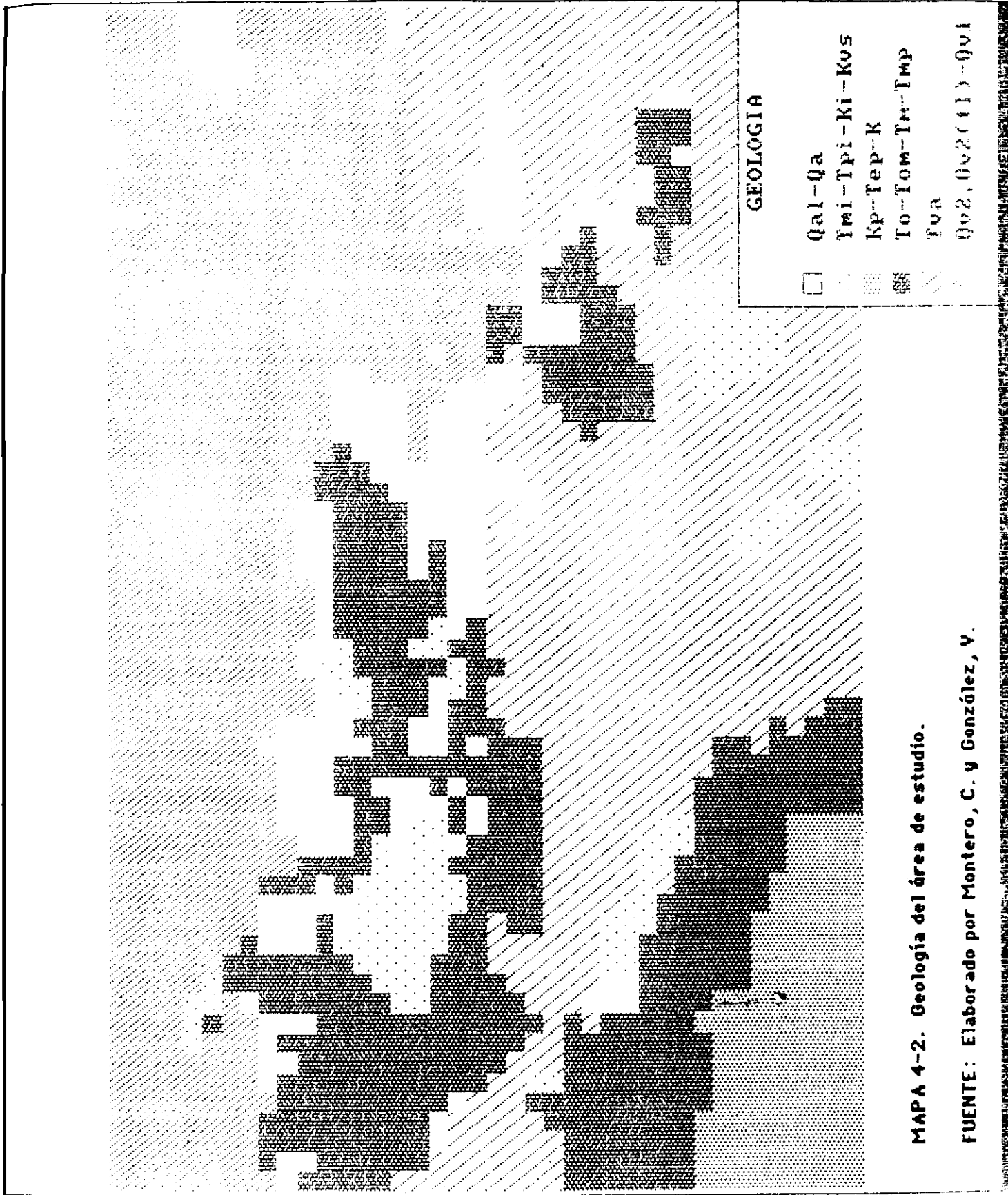
(Fuente: Evernden y Thonson, 1985. Traducido por Montero, C.
y González, Y.)

Cuadro 4-3.

Correlación de las condiciones geológicas del suelo para Costa Rica, basados en el mapa geológico de California 1:250.000 con el mapa geológico de Costa Rica 1:200.000.

Unidades de condición del suelo para California	Unidades geológicas del mapa geológico (para Costa Rica)
A.....	(Tm1, Tp1, Ki, Kvs)
B.....	
C.....	
D.....	(Kp, Tep, K)
E.....	
F.....	(To, Tom, Tm, Tmp)
G.....	(Tpq, Tp)
H.....	(Tva)
I.....	(Qv2, Qv2(t1), Qv1, Qv)
J.....	(Qa1, Qa)

(Fuente: Montero, C. y Gonzalez, Y. Basados en las fuentes citadas.)



MAPA 4-2. Geología del área de estudio.

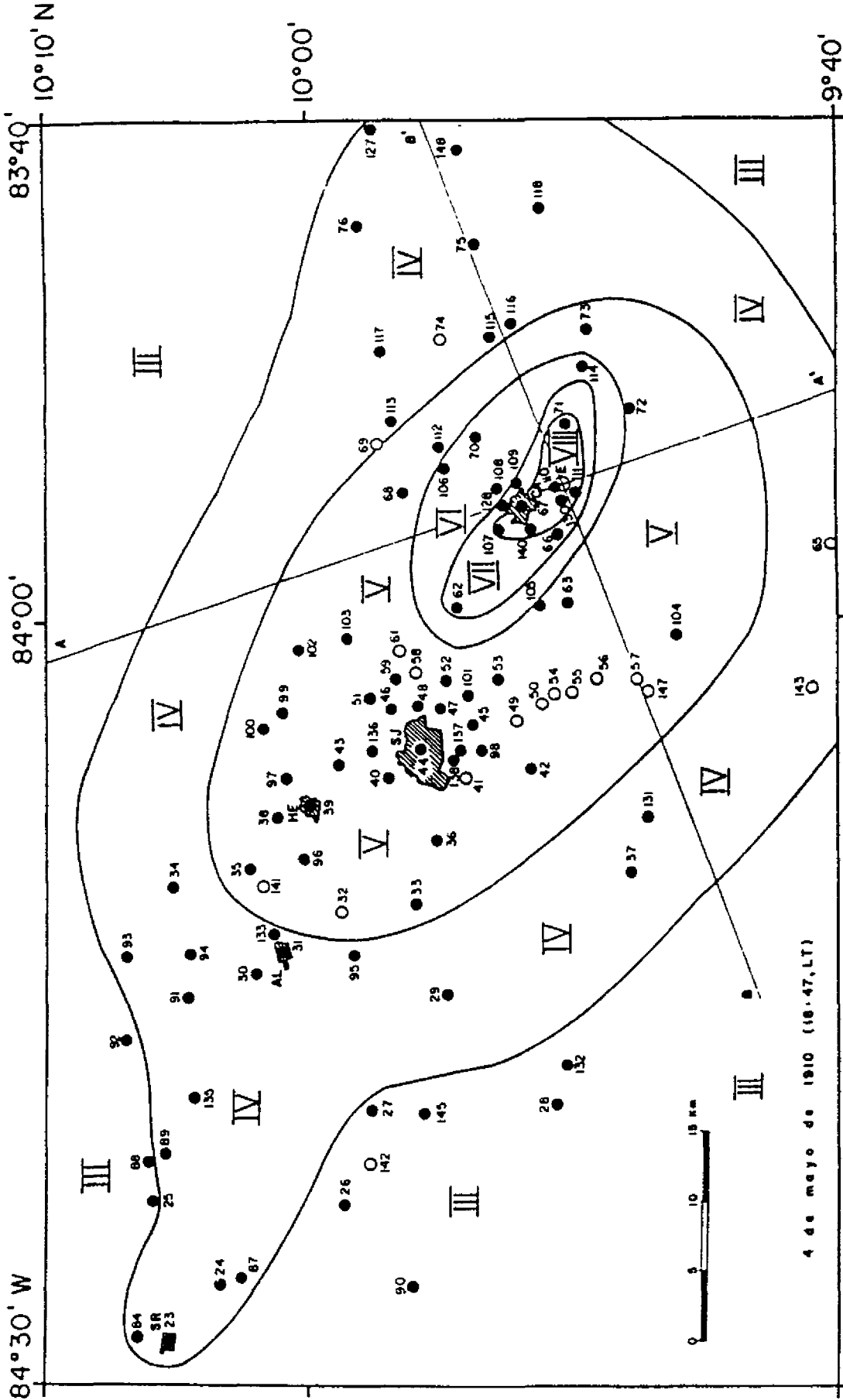
FUENTE: Elaborado por Montero, C. y González, V.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y SERVICIOS TECNOLÓGICOS

con el programa Quak2 (Evernden, J., et al 1985).

A partir de la elaboración de este cuadro se procedió a la construcción de la segunda entrada de información, consistente en la simulación de una falla hipotética. Para ello, se utilizó la información existente respecto al terremoto de 1910 en Miyamura (1980), Montero y Miyamura (1981) y Guendel (1986), en lo que se refiere a parámetros como magnitud del sismo, profundidad focal, localización geográfica del evento y por ende de la falla, intensidades alcanzadas y parámetros de atenuación, etc.; tratando de simular hipotéticamente dichos parámetros. Obviamente por la carencia de información instrumental, para la época en que ocurrió éste terremoto, dichos trabajos se basan en fuentes de información como periódicos e informes

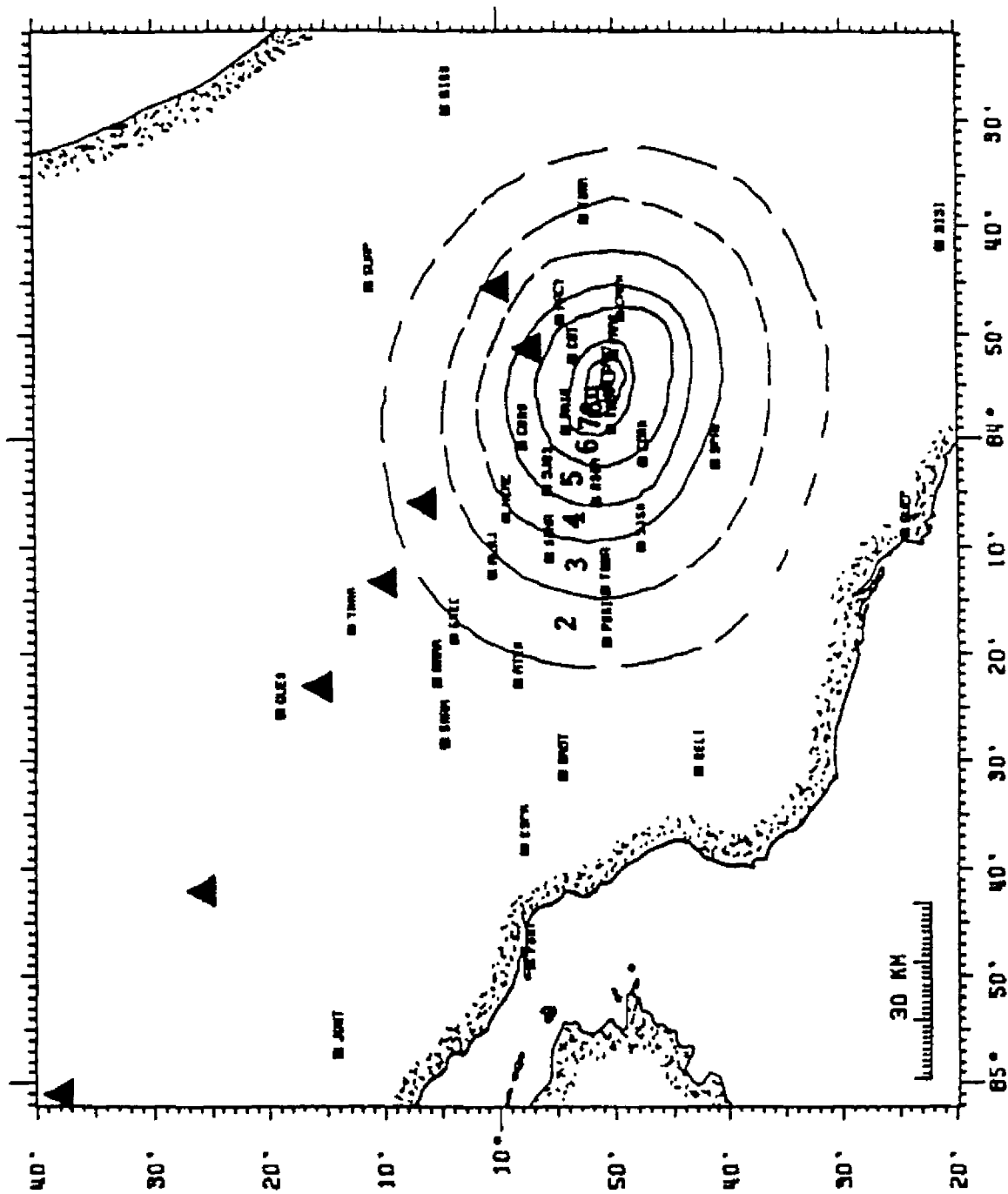
En lo que se refiere a la magnitud del sismo estiman los autores una magnitud de 5.5 a 5.6, tratándose de un evento de tipo superficial, por fallamiento local con una profundidad de 9 a 15 km. En cuanto a las intensidades generadas en el área de estudio, Montero y Miyamura (1981) definen intensidades máximas de VIII MM, ver mapa 4-3, y Guendel (1986) de IX MM ver mapa 4-4. Las intensidades mínimas para el área de estudio delimitada por nosotros son de IV MM según Montero y Miyamura (1981) y de V MM según Guendel (1986). Se han simulado intensidades máximas de VIII y IX debido a la diferencia de los dos autores citados ya que según Montero y Miyamura (1981), las intensidades máximas pudieron llegar a IX pero debido al terremoto anterior (13 de abril 1910) y sus réplicas, muchas viviendas y edificios en Cartago pudieron ser debilitadas antes del terremoto del 4 de



MAPA 4-3
ISOSISTAS DEL TERREMOTO DE CARTAGO
DEL 4 DE MAYO DE 1910

FUENTE: Tomado de Montero, W y Miyamura, S (1981)

4 de mayo de 1910 (10:47, LT)



MAPA 4-4
ISOSISTAS DEL TERREMOTO DE CARTAGO
DEL 4 DE MAYO DE 1910

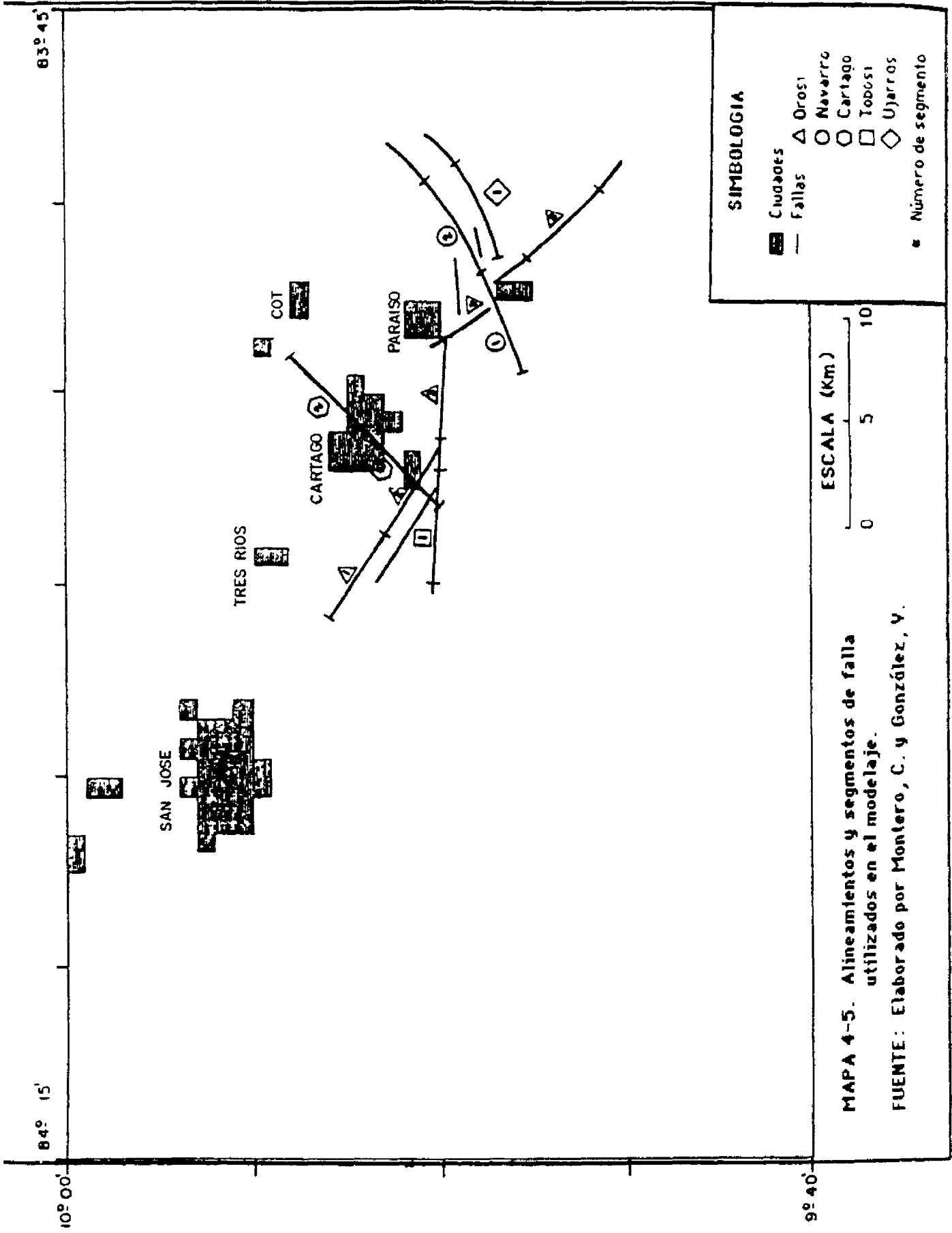
FUENTE Tomado de Guendel, F. (1986).

mayo de 1910

Además, se utilizó información del mapa Geológico (Dirección de Geología Minas y Petróleo, 1969) en lo que se refiere al mapeo de fallas en la zona e información más reciente por comprobación de campo correspondiente a una de las tareas del proyecto de Mitigación de Riesgos Volcánicos y Sísmicos (MIRVYS) realizados por consultores norteamericanos y geólogos de la Universidad de Costa Rica (en preparación) y algunos trazos de falla inferidos a partir de la información sísmica registrada por el OVSICORI-UNA en el área de estudio.

Como se ha dicho, se pretende modelar o reproducir por medio del método mencionado las intensidades generadas por el terremoto de Cartago del 4 de mayo de 1910, que destruyera dicha ciudad. El mapa 4-5, muestra los alineamientos o fallas usadas para éste estudio subdividido en segmentos con una longitud de ruptura determinada para simular un evento de $M = 5.6$ o cercano a dicha magnitud. Cada uno de estos segmentos de falla fueron utilizados para estimar intensidades hipotéticas que se semejaran a las intensidades generadas por el terremoto de 1910. En el cuadro 4-4 se listan todos los segmentos de falla utilizado con un nombre sugerido por los autores (Montero, C. y González, V.), así como la longitud de ruptura y la magnitud correspondiente

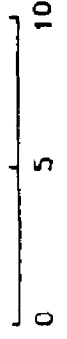
Los nombres dados por los autores de este trabajo a las fallas o segmentos de falla responden al propósito de introducir al programa dicha información en forma sistematizada tratando de modelar una longitud de ruptura capaz de generar una magnitud semejante a la del terremoto de 1910.



SIMBOLOGIA

- Ciudades
- Fallas
- △ Oroquieta
- Navarero
- Cartago
- Tobosi
- ◇ Ujarros
- * Número de segmento

ESCALA (Km)



MAPA 4-5. Alineamientos y segmentos de falla utilizados en el modelaje.

FUENTE: Elaborado por Montero, C. y González, V.

Cuadro 4-4.

**Segmentos de falla utilizados en el modelado,
longitud de ruptura y magnitud asignada.**

Nombre de la falla	longitud de ruptura en kilómetros	magnitud
Orosi1	5	5.58
Orosi2	5	5.60
Orosi3	5	5.60
Orosi4	5	5.60
Orosi5	5	5.55
Navarro1	6	5.64
Navarro2	5	5.55
Cartago1	5	5.60
Cartago2	5	5.60
Tobosi	5	5.56
Ujarrás	5	5.59

(Fuente: Elaborado por los autores basados en las referencias citadas.)

Es claro que varios de éstos segmentos de falla pueden constituir una sola falla, pero una magnitud como las señaladas en el cuadro 4-4 generaría una longitud de ruptura de aproximadamente 5 km (Evernden, J., et al, 1985).

Los siguientes son los parámetros o variables a utilizar en el modelaje: el factor de atenuación de las intensidades (K), que consiste en una función del decaimiento de la intensidad con la distancia (respecto al epicentro, que es la zona en que se generan las intensidades más altas), y la pseudo-profundidad o valor de (C), para el sismo a modelar. El o los factores

de atenuación para el caso de Costa Rica no están claramente definidos, por lo que se optó por ensayar con valores de 1.25, 1.50 y 1.75; tratando de ajustarlos a las intensidades del sismo del 4 de mayo de 1910 (Montero, W. y Miyamura, S. 1981 y en Guendel, F. 1986). Después de generar una serie de mapas probando éstos tres valores y analizando cada uno de ellos, los valores que dieron mejores resultados fueron los de 1.50 y 1.75. En definitiva, el valor que parece ajustarse mejor es el de 1.75, lo que implicaría una alta atenuación, semejante al valor utilizado por Evernden para la Costa Oeste de los Estados Unidos, donde existen ambientes geológicos bastante similares a los de nuestro país. En lo referente a la pseudo-profundidad (C), se utilizaron valores de pseudo profundidad de 25, el:

"efecto de un valores de C de 25 (profundidad focal de 10 Km. más o menos) podría ser que refleje marcadamente altas intensidades en el área epicentral en la predicción" (Evernden, J. y Thonson, J 1988).

Se utilizó también valores de C (pseudo-profundidad) de 20 y 15 Km. De acuerdo a Evernden pseudo-profundidades de 25 a 20 son apropiados para simular eventos de corrimiento lateral, tal como es caracterizado el evento de 1910 (Montero y Miyamura, 1981 y en Guendel, F. 1986).

Finalmente, otra variable importante y que se ha destacado a lo largo de lo arriba apuntado, es la característica de las zonas aluvionales y su relación con el nivel freático, ya que, éstas zonas podrían generar el efecto de amplificación de las ondas sísmicas o producir efectos de licuefacción del suelo, dando como resultado altas intensidades. Tal como lo expresa el

cuadro 4-2, las intensidades relativas esperadas para los distintos tipos de roca están referidos a la saturación del aluvión, es decir; con la tabla de agua a profundidades entre 0 y 9.1 metros.

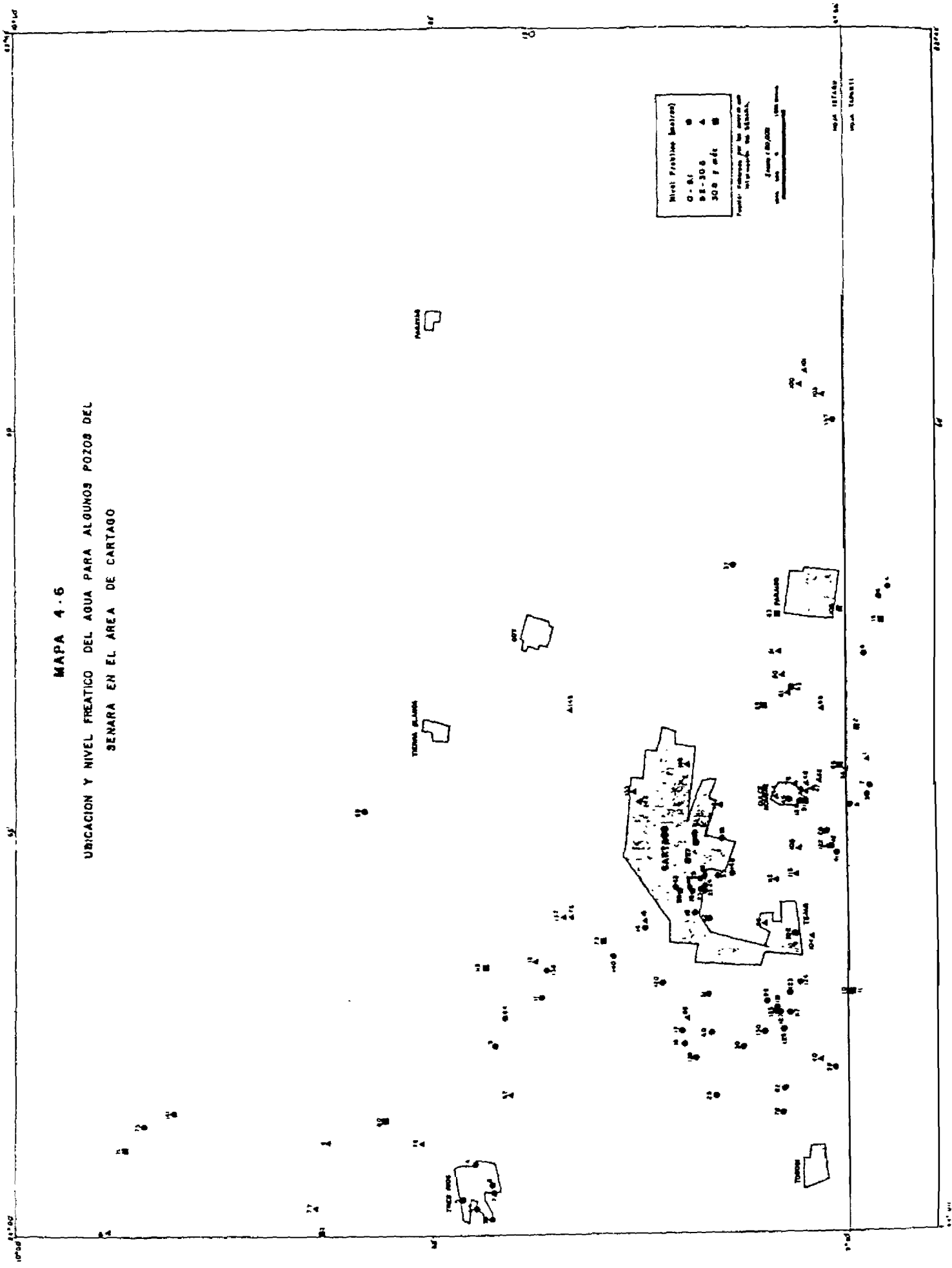
El modelo tiene opción a utilizar como referencia el aluvión saturado o a utilizar otro tipo de aluvión con un nivel freático más profundo, de 9.2 a 30 metros y mayor de 30 m de profundidad del nivel freático. Para el presente estudio se recurrió a información del Servicio Nacional de Riego y Avenamiento (SENARA), con el fin de conocer con certeza las condiciones, en lo que al nivel freático se refiere, en las principales zonas de aluvión en nuestra áreas de estudio y principalmente para Cartago. El mapa 4-6 elaborada a partir de la información del SENARA, muestra la profundidad de los niveles freáticos de la mayoría de los pozos principalmente para la zona de aluvión en que está asentada la ciudad de Cartago. Se agrupó la información en intervalos de acuerdo al cuadro 4-2. Tomando como base este cuadro, se ha considerado la zona de aluviones de la ciudad de Cartago con una condición de saturación del aluvión, no así para la zona de aluviones o depósitos sedimentarios, descrita en el mapa geológico escala 1:200.000 de Costa Rica (hoja San José), para la parte sur de San José. No se ha considerado la época del año y los posibles cambios en los niveles freáticos puesto que los cambios son en el orden de unos pocos centímetros, según especialistas del SENARA

El programa produce varios tipos de mapas de salida, a saber:

- 1 Intensidades en la escala de Rossi Forel

MAPA 4-5

UBICACION Y NIVEL FREATICO DEL AGUA PARA ALGUNOS POZOS DEL
SENARA EN EL AREA DE CARTAGO



2. Intensidades en la escala de Mercalli Modificada
3. Daños a casas de madera o construcciones de concreto
 - a) Porcentaje de pérdidas en construcciones de madera.
 - b) Porcentaje de pérdidas a residencias de concreto no reforzadas.
 - c) Porcentaje de pérdidas en construcciones de comercio no reforzadas.

Análisis de resultados y conclusiones.

Como se ha dicho, para llegar a los mapas con los resultados obtenidos se hicieron una serie de simulaciones y de mapas previos hasta llegar a los resultados que se consideraron más satisfactorios. El cuadro 4-5, muestra los valores con los cuales se realizaron las simulaciones y el cuadro No 4-6 muestra los valores utilizados para elaborar los mapas definitivos, con el objetivo de reproducir las situaciones generadas por el terremoto del 4 de mayo de 1910.

Un total de 22 mapas fueron elaborados para cada una de las fallas con un parámetro de atenuación de 1.75 y una pseudo-profundidad de 20 (ver apéndice V). Se presentan los 22 mapas ya que no se tiene certeza de la falla que ocasionó el terremoto del 4 de mayo de 1910. Varios autores (Montero, W. y Miyamura, S., 1981 y Montero, W. y Morales L., 1984) consideran como posible causante de dicho terremoto la falla "Agua Caliente-Orosi" que en algunos segmentos serían los denominados por nosotros como Orosi 1, 2, 3, 4 y 5. Sin embargo, como se planteó en el Capítulo IV es muy significativa la

Cuadro 4-5.

Valores utilizados para las simulaciones

Nombre de la falla	factor (K) de atenuación	seudo-profundidad	considera aluvión
Orosi1	1.50/1.75	15/20/25	si/no
Orosi2	1.50/1.75	15/20/25	si/no
Orosi3	1.50/1.75	15/20/25	si/no
Orosi4	1.50/1.75	15/20/25	si/no
Orosi5	1.50/1.75	15/20/25	si/no
Navarro1	1.50/1.75	15/20/25	si/no
Navarro2	1.50/1.75	15/20/25	si/no
Cartago1	1.50/1.75	15/20/25	si/no
Cartago2	1.50/1.75	15/20/25	si/no
Tobosi	1.50/1.75	15/20/25	si/no
Ujarrás	1.50/1.75	15/20/25	si/no

(FUENTE: Elaborado por Montero, C. y González, Y.)

Cuadro 4-6.

**Valores de atenuación y pseudo-profundidad
utilizados en los mapas de modelado definitivos.**

Nombre de la falla	valor (K) de atenuación	seudo-profundidad	considera aluvión
Orosi 1	1.75	20	si/no
Orosi 2	1.75	20	si/no
Orosi 3	1.75	20	si/no
Orosi 4	1.75	20	si/no
Orosi 5	1.75	20	si/no
Navarro 1	1.75	20	si/no
Navarro 2	1.75	20	si/no
Cartago 1	1.75	20	si/no
Cartago 2	1.75	20	si/no
Tobosi	1.75	20	si/no
Ujarrás	1.75	20	si/no

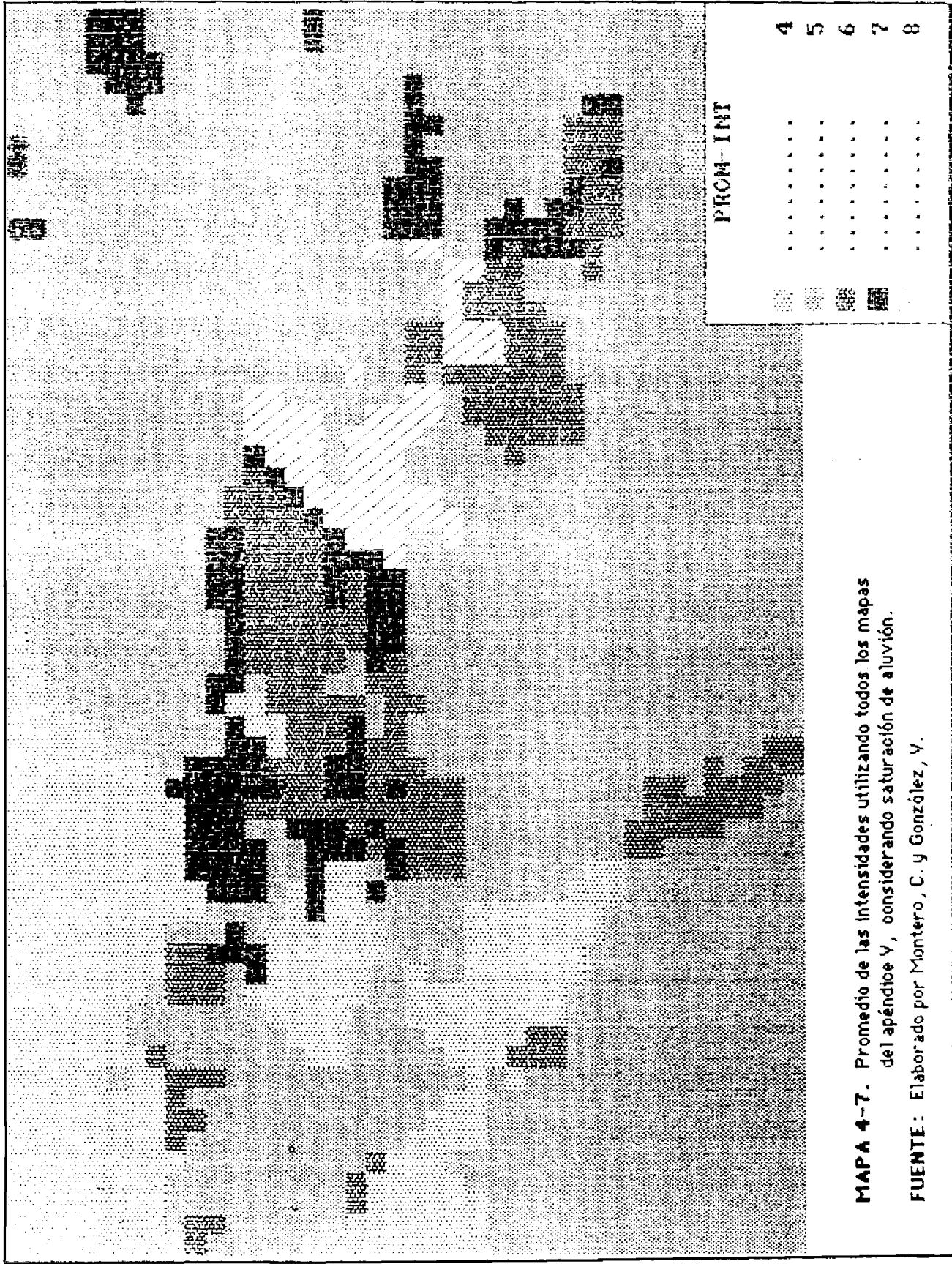
(FUENTE: Elaborado por Montero, C. y González, Y.)

concentración de sismicidad en los grupos que se han denominado Navarro, Navarro Centro y Navarro Este, además de la concentración de sismicidad al norte de Cartago; por ello se ha optado por incluir todos los mapas con cada uno de los segmentos de falla. Es importante aclarar que todas las salidas del programa Quak-2 de Evernden, J. (1985), presentados en éste capítulo y en los apéndices V y VI han sido retomados con el MAP ANALYSIS PACKAGE (MAP) para el formato de salida final (Ohio State University, 1989).

Una conclusión importante en la observación de los mapas presentados en el apéndice V, es que en términos del riesgo la localización de falla en cualquiera de los segmentos señalados en el mapa 4-5, es irrelevante, ya que no se aprecian diferencias significativas en lo referente a las mayores intensidades presentadas, las cuales se concentran en la ciudad de Cartago. El mapa 4-7, que es un promedio de los mapas del apéndice V, demuestra ésta afirmación.

Se han producido mapas de salida considerando una condición de aluvión saturado y en otros sin considerar la saturación del aluvión. Como se puede observar en el apéndice V, las intensidades simuladas están condicionadas por las características geológicas del suelo, por cuanto se consideran parámetros de atenuación de cada uno de los tipos de rocas. Por esta situación, el resultado no va ser una reproducción exacta de los mapas de isosistas de Montero y Miyamura, 1981 y de Guendel, F., 1986; pero si pueden ser un punto de referencia sobre las características de un futuro terremoto.

La generalidad de los mapas mostrados indican las mayores intensidades (VIII) en la ciudad de Cartago, principalmente por la cercanía del evento



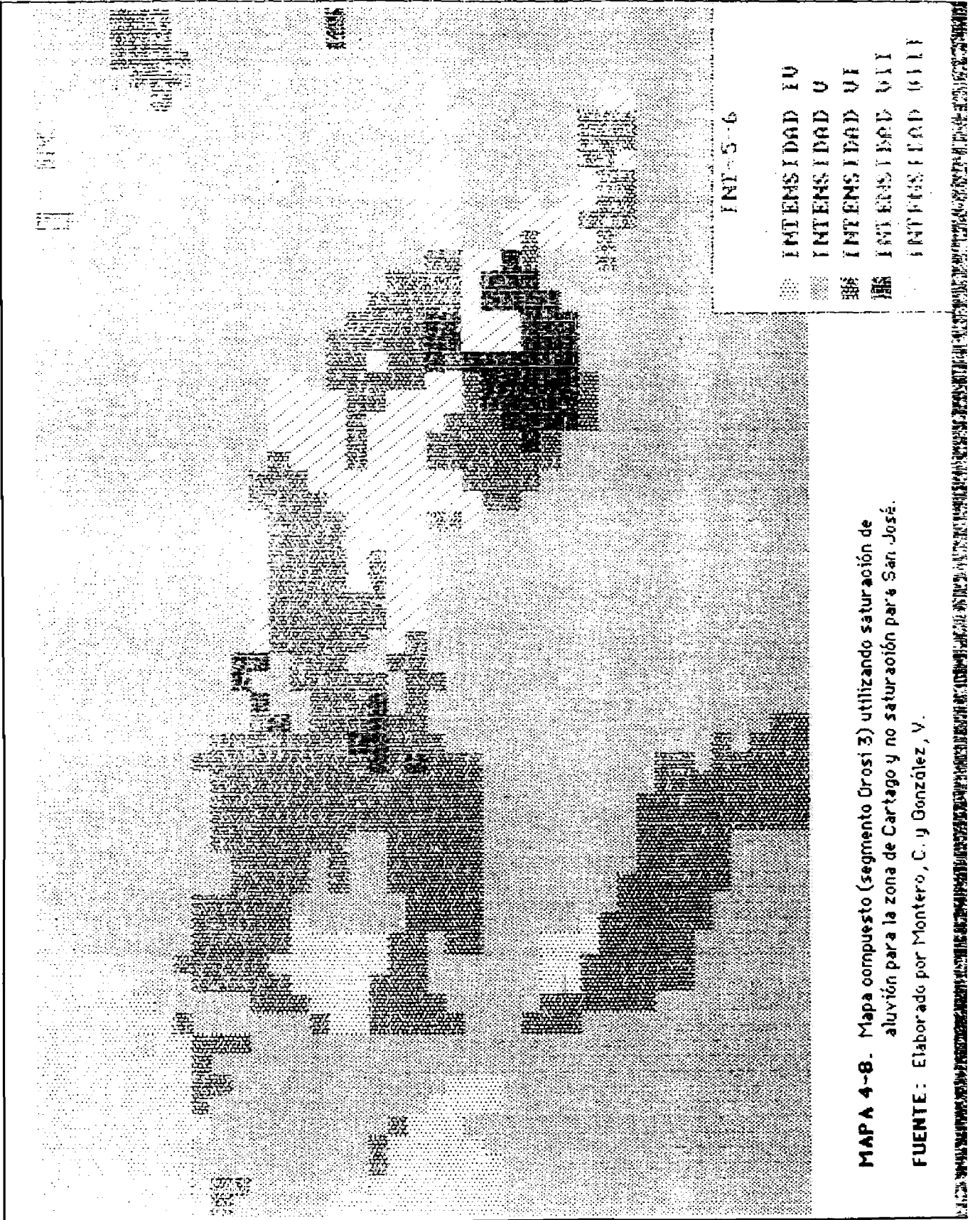
MAPA 4-7. Promedio de las Intensidades utilizando todos los mapas del apéndice V, considerando saturación de aluvión.

FUENTE: Elaborado por Montero, C. y González, V.

simulado y porque la ciudad de Cartago se encuentra asentada básicamente sobre depósitos sedimentarios del cuaternario. No parece existir una buena correlación con las altas intensidades en la parte que corresponde a San José, con las intensidades del terremoto del 4 de mayo de 1910, que según Montero y Miyamura, 1981 y Guendel, 1986; fueron de V MM en dicha ciudad. Esto se debe principalmente a la misma constitución del suelo tanto en Cartago como en San José. Es por esto que los mapas definitivos se elaboraron considerando aluvión saturado para la zona de depósitos sedimentarios, en que está asentada la ciudad de Cartago y para la parte de San José descrita también como depósitos sedimentarios no se consideró su saturación, ver mapa 4-8.

Tomando en consideración el nivel experimental del método y la carencia de información sobre los parámetros de atenuación para nuestro país, es preciso una mayor investigación que permita establecer dicho factor con exactitud, con el fin de generalizar el programa para distintos eventos. Aunque creemos que para un evento superficial dicho valor puede ser de 1.75 o cercano a éste.

Esta metodología puede ser de gran utilidad para la planificación del uso del suelo que tome como criterio el riesgo sísmico en las diferentes zonas del país, por el solo hecho de poder simular intensidades hipotéticas que están basadas en los niveles de daños esperados por futuros eventos sísmicos. Permite aproximar los porcentajes de daño esperados para las distintas intensidades, a pesar que el mismo requiere ajustes y mayor análisis con el fin de poder utilizarlo con mayor propiedad.



MAPA 4-8. Mapa compuesto (segmento Drosi 3) utilizando saturación de aluvión para la zona de Cartago y no saturación para San José.

FUENTE: Elaborado por Montero, C. y González, V.

El programa provee además, estimación de ciertos parámetros geofísicos que requieren también un mayor análisis y discusión, pero que pueden ser también bastante útiles para el propósito recién señalado.

En lo referente a las estimaciones de porcentajes de pérdidas, tanto en viviendas de concreto no reforzado como en edificios de uso comercial de concreto no reforzado, se utilizó un procedimiento similar al descrito para la simulación de las intensidades. Es decir, los mismos segmentos de falla, con atenuaciones regionales de 1.75 y pseudopropiedades de 20 kilómetros considerando además saturación del aluvión así como condiciones de no saturación. En el capítulo V se discutirán los resultados obtenidos.