

## 4 TECTÓNICA Y SISMICIDAD EN LA REGIÓN DE ESTUDIO

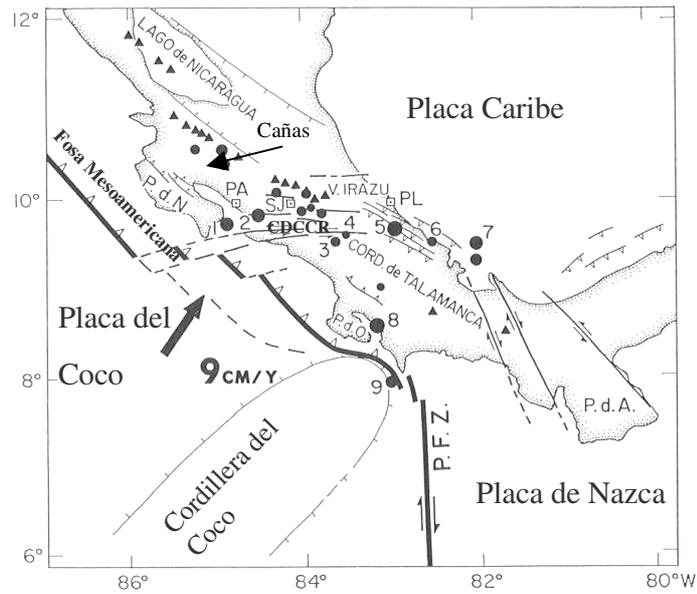
Para la realización de este estudio se prepararon bases de datos de información sísmológica y tectónica específicas para la ciudad de Cañas, con base en los catálogos y mapas disponibles en el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), así como de información suministrada por la Red Sísmológica Nacional (RSN:ICE-UCR).

### 4.1 Marco tectónico regional

Costa Rica está ubicada dentro de una zona tectónicamente activa, caracterizada principalmente por el proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe, a lo largo de la Fosa Mesoamericana. A partir de diversas evidencias geológicas, Astorga *et al.* (1991) proponen la existencia de un importante sistema de fallas que atraviesa la parte central del país dividiéndolo en dos grandes bloques denominados Bloque Norte y Bloque Sur (Fig. 2). Montero (2001) avala este modelo de un límite incipiente entre la microplaca de Panamá y la placa Caribe al que denomina Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR), pero sugiere visualizar esta zona de deformación como una zona ancha constituida por varios sistemas de fallas con diferentes tipos de deslizamientos.

La región al sureste de la península de Nicoya (P. d. N. en la fig. 2) se caracteriza por la presencia de irregularidades batimétricas como la Cordillera del Coco que provoca una disminución en la profundidad de la fosa oceánica y un menor ángulo de subducción. En la región sur del país, existe otro rasgo tectónico importante que es la Fractura de Panamá, la cual separa las placas del Coco y Nazca. La condición de borde convergente activo de placas provoca el desarrollo de importantes caracteres geomorfológicos por los esfuerzos compresivos que se originan en la interacción de las placas Coco y Caribe, dando lugar a complejos sistemas de fallas al interior del país.

A nivel regional, en el caso específico de Costa Rica, se puede decir que, principalmente, la tectónica está regida por dos grandes sistemas que interactúan entre sí: a) El proceso de subducción de la placa del Coco bajo la Placa Caribe y b) El sistema de fallamiento local al interior del continente.



**Fig. 2: Marco tectónico regional de Costa Rica (tomado de Jacob *et al*, 1991).**

#### 4.2 Proceso de subducción

La introducción de la placa del Coco debajo de la Caribe origina una zona de sismicidad que se extiende en profundidad, desde la fosa hacia el interior del país, que se conoce como "Zona de Benioff", en la cual se producen los sismos más fuertes que ocurren en Costa Rica, y que pueden causar daños importantes en las regiones costeras cercanas al epicentro y daños menores hacia el interior del país. Además, la actividad entre estas dos placas genera complejos sistemas de fallas hacia el continente.

Esta fuente sísmica es una de las más importantes, dado que se caracteriza por grandes liberaciones de energía en forma de terremotos de magnitudes altas ( $M_s \geq 7,7$ ) que pueden generar intensidades máximas de grado VIII o IX en la zona epicentral y, además, por su profundidad son sentidos en una región más amplia que los originados en fallas locales. Los hipocentros de los eventos sísmicos generados por esta fuente se localizan en la zona sísmica de Benioff, la cual buza bajo la corteza continental hasta profundidades máximas de unos 200 km. Históricamente, esta fuente ha generado importantes sismos como los de 1916, 1939, 1950, 1978 y 1990 en la región noroeste del país. En el pacífico norte del país, a este proceso de subducción se le han identificado dos zonas sísmicas: Papagayo y Nicoya, las cuales coinciden con áreas de ruptura conocidas (Morales, 1985), y tienen potencial para generar un sismo importante ( $M=7,7$ ) a mediano plazo (Barquero, 1990).

#### 4.3 Sistemas de fallamiento

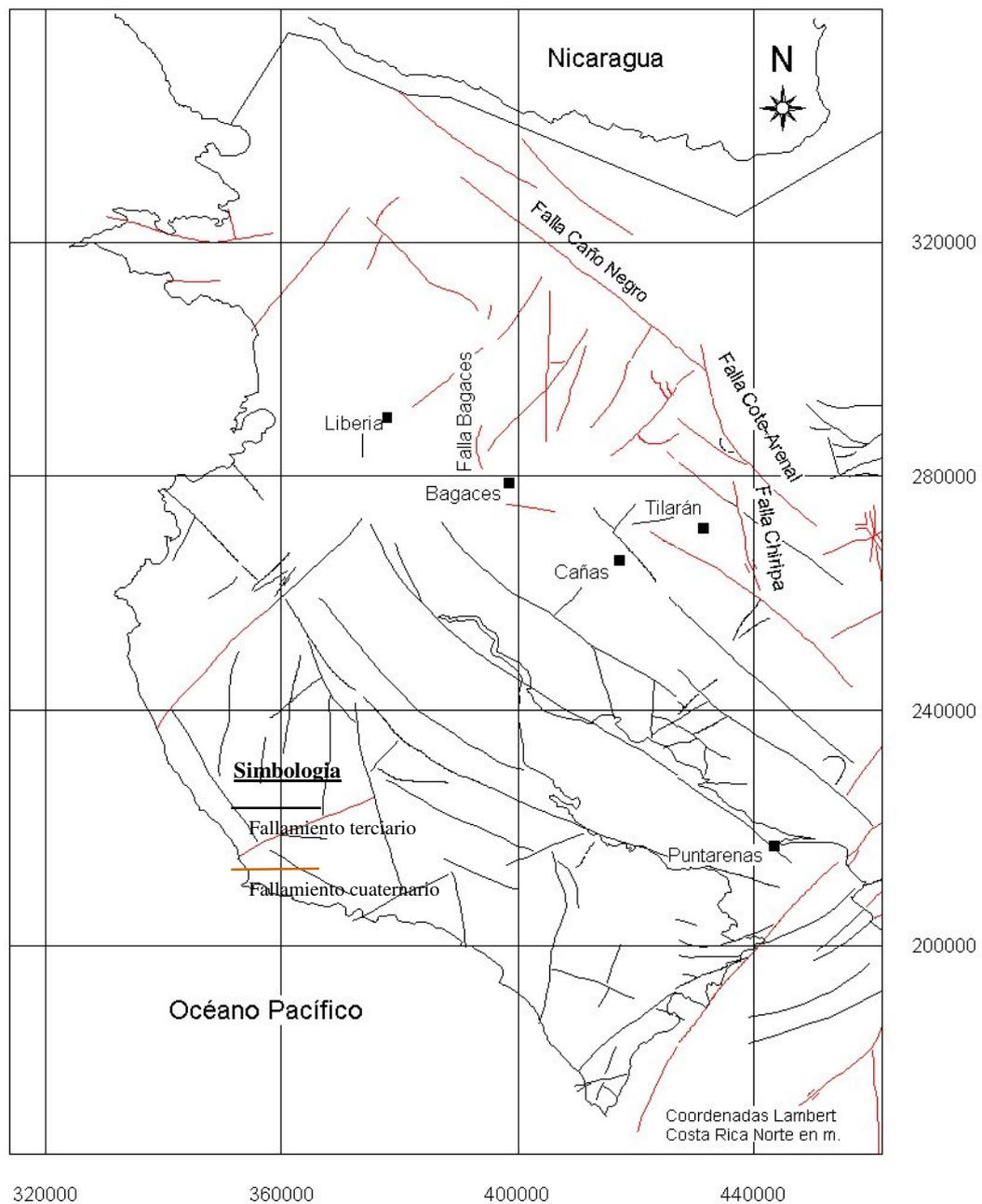
Los esfuerzos compresivos generados por el proceso de subducción producen sistemas de fallas de carácter regional, predominantemente de tipo inverso y de

rumbo a nivel de la corteza continental. Además de dichas estructuras, muchas otras fallas locales con dimensiones más pequeñas, se encuentran presentes hacia el interior del país. Estas fallas se caracterizan por la generación de sismos de magnitudes locales intermedias ( $5,0 \leq M_L \leq 6,5$ ) con foco superficial ( $5 \leq Z \leq 20$  km), condición que hace que los mismos sean generalmente más destructivos cuando ocurren cerca de centros de población.

Se consideró que en la región Chorotega de Costa Rica, en la cual se encuentra la ciudad de Cañas, hay cuatro fallas activas locales más importantes a tomar en consideración: a) Chiripa, b) Cote-Arenal, c) Bagaces y c) Caño Negro (Fig. 3). Aunque en la región hay evidencia de otras estructuras cuaternarias, se consideró que las anteriores, de acuerdo con el conocimiento actual, representan adecuadamente el nivel de amenaza sísmica en la zona. La estadística de temblores en esta región, estima que un sismo de magnitud hasta de 6,5 puede ocurrir a mediano plazo, en los próximos 20 años (Barquero, 1990)

**Falla Chiripa:** La identificación de esta falla en la zona suroeste del lago de Arenal fue posible gracias a los registros sismológicos obtenidos por la Red Sismológica de Arenal instalada de 1974 a 1978, mediante la cual se pudieron localizar gran cantidad de réplicas del terremoto de Tilarán de abril de 1973. Es una falla de rumbo NNW de unos 20 km de longitud. El mecanismo focal elaborado por Matumoto et al. (1978) muestra una solución de tipo transcurrente sinistral, uno de cuyos planos nodales concuerda con la dirección del alineamiento de los epicentros de las réplicas del terremoto Tilarán. Este fallamiento está asociado con la deformación cortical que resulta de los esfuerzos compresivos regionales de rumbo NE originados por el proceso de subducción. A esta falla se le podría asociar también el terremoto de Guatuso de 1911 y de Cañas de 1853 (Alvarado, 1989). Montero (1984) estimó un período de recurrencia de 60 años, para sismos de magnitudes intermedias (6,0-6,5) en la región donde se localiza esta falla.

**Falla Cote-Arenal:** Falla de traza semi-curvilínea con rumbo NW-SE hasta WNW-SSE que se extiende por más de 20 km con el bloque sur descendido. A unos 7,3 km de la represa de Sangregado por la carretera hacia Nuevo Arenal, se ha observado un extenso afloramiento en donde se evidencia una clara tectónica normal que afecta casi a toda la secuencia de tefras del Arenal de los últimos 3 000 años. No ha sido posible evaluar posibles movimientos transcurrentes (horizontales). La falla principal ha desplazado unos 5,4 m verticalmente a un nivel de paleosuelo rico en materia orgánica. De este nivel se obtuvo una fecha con radiocarbono de  $1370 \pm 215$  años A.C. Basándose en que la falla se ha desplazado 540 cm en 3 000 años, se obtuvo una velocidad de aproximadamente 0,18 cm/año lo cual la califica como una falla de alta actividad. Esta falla también pudo haber sido la fuente del terremoto de Guatuso de 1911 (Alvarado, 1989).



**Fig. 3: Tectónica relacionada al fallamiento superficial en la región donde se ubica la ciudad de Cañas.**

**Falla Bagaces:** Falla perteneciente al sistema N-S y NNE-SSW de fallas normales que constituyen la estructura del graben Fortuna-Peje. Esta falla, cuya parte de su traza se observa en un alineamiento geológico de rumbo NNE-SSW cerca de Bagaces, parece ser la fuente de los terremotos de 1935 y 1941 (Montero y Alvarado, 1988).

**Falla Caño Negro:** Falla de rumbo NW-SE de unos 50 km de longitud cuyo escarpe se distingue claramente en las fotografías aéreas y que parece ser una

prolongación del graben (depresión tectónica limitada por fallas) de Nicaragua. Los mecanismos focales elaborados con temblores recientes, presumiblemente asociados con esta fuente, confirman la existencia de una falla normal orientada NW-SE con componente en coincidencia con el escarpe observado en fotografía aérea. No se han podido encontrar evidencias directas de esta falla en el campo, ya que posiblemente estén cubiertas por suelos, aluviones, lahares y espesa vegetación (Barquero, 1990).

#### **4.4 Sísmicidad Histórica**

Los terremotos históricos más importantes de Costa Rica han sido documentados por varios autores (Miyamura, 1980; Morales, 1983; Montero, 1989; Rojas, 1993; White y Harlow, 1993; Peraldo y Montero, 1994, entre otros).

Desde 1900 hasta el presente se han registrado 25 eventos sísmicos importantes ( $M_s > 5,5$ ) en la región NW de Costa Rica localizados entre la fosa mesoamericana y el arco volcánico (Tabla 1), algunos de ellos tuvieron como fuente el fallamiento local y otros el proceso de subducción de la placa del Coco bajo la Caribe. Históricamente, los que han causado mayores daños materiales y humanos, debido a su poca profundidad y cercanía de los centros de población, son los originados por las fallas locales, aún cuando sus magnitudes son menores que los originados por la subducción. En la figura 4 se presenta el mapa con la ubicación epicentral de los más importantes de ellos, en color azul los relacionados a la subducción y en verde al callamiento local.

Dentro de los sismos de mayor magnitud asociados con fallamiento superficial se pueden citar los eventos de 1941 y 1935 que han sido asociados con la falla Bagaces, el de 1911 a la falla Cote-Arenal, el de 1973 a la falla Chiripa. En el caso de la subducción, algunos de los sismos mayores ocurridos en esta fuente son el de 1916 y 1983 asociados con la zona sísmica de Papagayo, y una serie de eventos como los de 1916, 1950 y 1978 relacionados con la zona sísmica de Nicoya. Debido a ellos en la zona donde se localiza la ciudad de Cañas se ha reportado Intensidades Mercalli Modificada máximas de grado VII, este valor máximo podría variar si se incluyeran terremotos más antiguos a los mencionados.

A continuación se presenta una pequeña descripción de los principales eventos sísmicos históricos ocurridos en la región noroeste de Costa Rica en el siglo XX.

##### Terremoto de 1916:

Fecha: 27 de febrero de 1916, Localización: Latitud 10,7° N Longitud 85,88° W  
Magnitud: 7,5, Intensidad epicentral: superior IX R.F.  
Origen: Subducción, zona sísmica de Papagayo.

Tristán (1916) lo reporta causando gran cantidad de daños en la región noroeste de Costa Rica, con un área epicentral entre la bahía Culebra, Península Santa Elena y Punta Gorda. Daños en Sardinal, en El Coco con colapso parcial o total de construcciones.

**Tabla 1: Sismicidad histórica en la región noroeste de Costa Rica**

| Fecha      | Latitud   | Longitud  | Magnitud | Localización epicentral |
|------------|-----------|-----------|----------|-------------------------|
| 21-06-1900 | 10°00,00' | 85°30,00' | 7,2      | Pen. de Nicoya          |
| 20-01-1905 | 09°51,00' | 84°40,80' | 6,7      | Mata de Limón           |
| 10-10-1911 | 10°36,00' | 84°56,00' | 6,5      | Laguna Cote             |
| 27-02-1916 | 10°42,00' | 85°52,80' | 7,5      | Golfo Papagayo          |
| 24-04-1916 | 10°21,00' | 85°12,00' | 7,3      | Pen. de Nicoya          |
| 04-03-1924 | 09°51,00' | 84°33,60' | 7,0      | Orotina                 |
| 01-08-1935 | 10°34,50' | 85°14,70' | 5,5      | Bagaces                 |
| 21-12-1939 | 10°08,40' | 84°36,00' | 7,3      | Miramar                 |
| 22-12-1939 | 09°48,00' | 84°31,80' | 6,7      | San Mateo               |
| 27-10-1940 | 09°45,00' | 84°30,00' | 6,7      | San Mateo               |
| 06-12-1941 | 10°30,00' | 85°15,00' | 5,5      | Bagaces                 |
| 05-10-1950 | 10°00,00' | 85°30,00' | 7,7      | Pen. de Nicoya          |
| 13-05-1952 | 10°18,00' | 85°18,00' | 6,9      | Pen. de Nicoya          |
| 14-04-1973 | 10°27,50' | 84°54,00' | 6,5      | Tilarán                 |
| 02-10-1973 | 10°03,00' | 85°29,40' | 5,0      | Pen. De Nicoya          |
| 25-02-1976 | 10°00,00' | 85°28,20' | 5,9      | Pen. De Nicoya          |
| 23-08-1978 | 09°45,60' | 85°34,20' | 7,0      | SW de Sámará            |
| 23-08-1978 | 09°53,40' | 85°30,00' | 7,0      | SW de Sámará            |
| 01-05-1981 | 09°34,20' | 85°01,20' | 5,4      | Golfo de Nicoya         |
| 29-09-1983 | 10°35,40' | 85°54,00' | 5,7      | Golfo de Papagayo       |
| 02-03-1988 | 09°31,77' | 84°52,30' | 5,7      | Golfo de Nicoya         |
| 25-03-1990 | 09°36,24' | 84°56,76' | 6,5      | Golfo de Nicoya         |
| 01-03-1991 | 10°49,20' | 84°48,00' | 5,8      | Guatuso                 |
| 16-03-1991 | 09°43,20' | 85°39,60' | 6,3      | Frente Pen. de Nicoya   |
| 20-07-2000 | 09°11,40' | 85°28,20' | 6,2      | Océano Pacífico         |

Terremoto de Bagaces de 1935:

Fecha: 01 de agosto de 1935, Hora: 10:08 (L.T.)

Localización: Latitud 10,5° N Longitud 85,5° W (ISS)

Magnitud: 5,5, Profundidad: 10-15 km, Intensidad epicentral: VII, Origen: F. Bagaces

Este terremoto ocasionó daños principalmente en Bagaces, en donde hubo destrucción total o parcial de casas, se escucharon ruidos subterráneos y se reportaron también algunos daños en Liberia; en Cañas se sintió muy fuerte, pero no produjo daños materiales, en San José, Heredia y Cartago fue sentido fuerte y prolongado.

Terremoto de Bagaces de 1941:

Fecha: 06 de diciembre de 1941, Localización: Latitud 10,5° N Longitud. 85,25° W

Magnitud: 6,0, Profundidad: 10-15 km, Intensidad epicentral: VIII

Origen: Falla Bagaces.

Este terremoto ocasionó daños considerables en Bagaces en donde unas 100 casas quedaron inhabitables, el techo de la iglesia colapsó, las oficinas de la Jefatura Política, Municipalidad y Telégrafo también quedaron dañados. Otros datos de intensidades según Montero y Alvarado (1988) son: en Montano VII, en Montenegro VI-VII, en Salitral VII, Liberia, La Fortuna de Bagaces VI, Bebedero VI.

Terremoto de 1950:

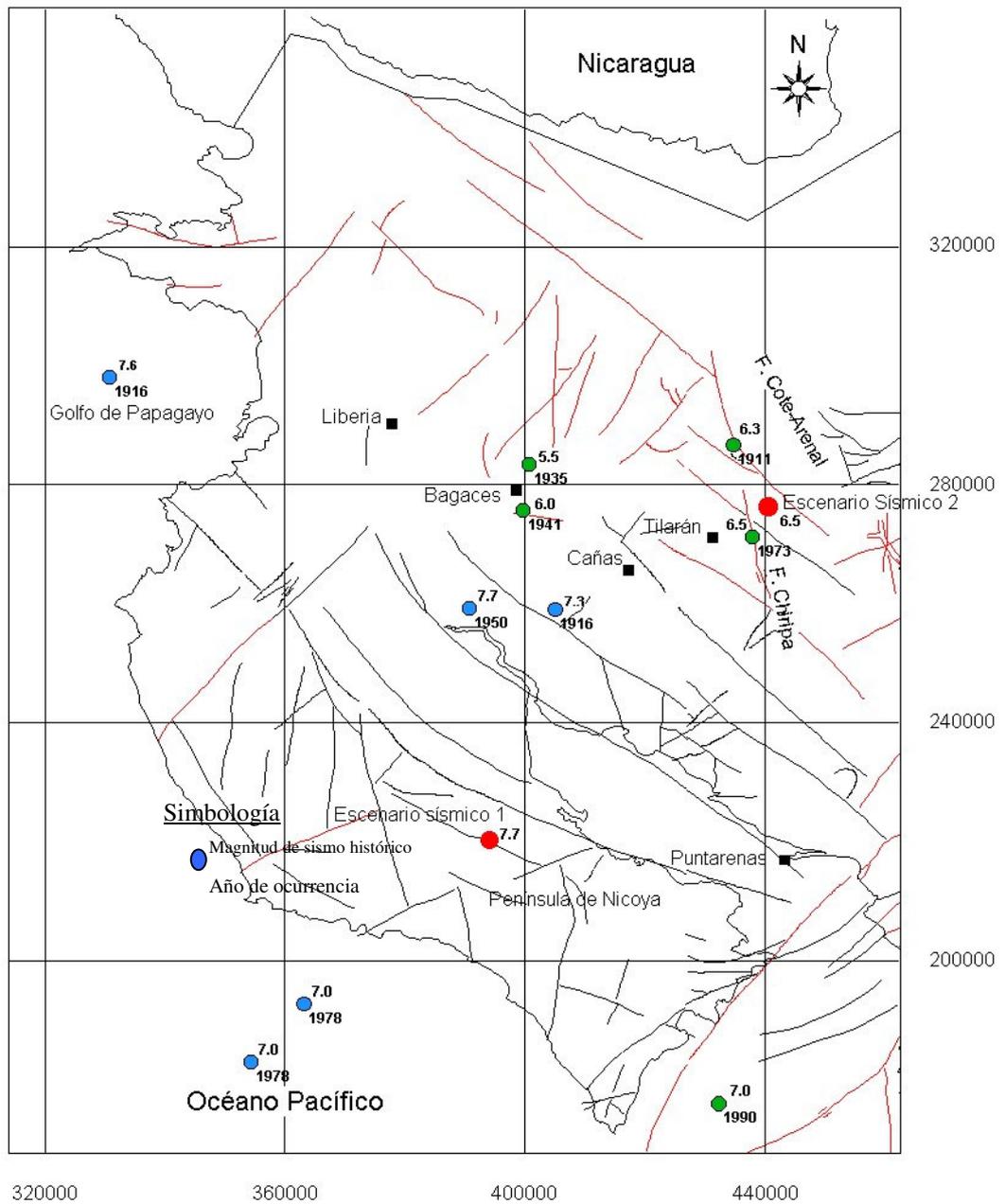
Fecha: 5 de octubre de 1950, Localización: Latitud 10,0° N Longitud 85,50° W  
Magnitud: 7,7, Origen: Subducción, Zona Sísmica de Nicoya.

Este terremoto originó daños en construcciones de Puntarenas, Nicoya, San Ramón, Filadelfia, Santa Cruz y otros poblados en la península de Nicoya, y de la costa pacífica central del país y en el Valle Central Occidental (Montero, 1984).

Terremoto de Tilarán de 1973:

Fecha: 14 de abril de 1973, Hora: 03:35 (L.T.), Magnitud:  $M_b = 5,7$   $M_s = 6,5$   
Localización: Latitud 10,35° N Longitud 84,88° W, Profundidad: 10 km  
Intensidad epicentral: VIII (MM), Origen: falla Chiripa

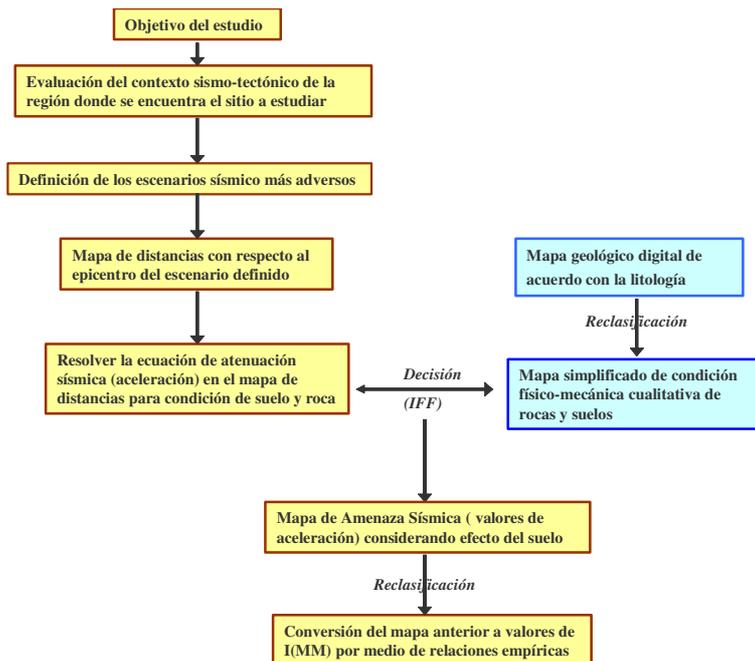
Los daños, debidos a este terremoto, estuvieron concentrados dentro de una área de 150 km<sup>2</sup> y los deslizamientos mayores, generados por la sacudida sísmica, se produjeron dentro de un área de 20 km<sup>2</sup>, fueron responsables de la muerte de 23 personas y de daños a los caminos vecinales (Mora y Morales, 1986). Los fracturamientos observados están relacionados todos con deslizamientos gravitacionales y ninguna de las fracturas tenía más de unas decenas de metros de longitud (Plafker, 1973).



**Fig. 4: Sismos históricos severos ( $M_s \geq 6,0$ ) en el periodo 1900-2000, en la región donde se ubica la ciudad de Cañas y localización de los escenarios sísmicos.**

## 5 ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA

Como se indicó anteriormente, en este estudio la amenaza sísmica (grado de exposición) será determinada con base en la definición de escenarios sísmicos específicos, basados en el conocimiento de la sismicidad histórica y el potencial de generar sismos de cada una de las fallas o fuentes sísmicas seleccionadas. En la figura 5 se presenta el esquema simplificado de la metodología seguida utilizando sistemas de información geográfico.



**Fig. 5: Esquema simplificado para la estimación de la amenaza sísmica determinística utilizando un SIG.**

Con base en la información sísmo-tectónica presentada en los apartados anteriores para la región noroeste de Costa Rica, se pueden establecer cuatro posibles escenarios sísmicos que podrían tener un impacto importante en la ciudad de Cañas. El primero es un sismo que hipotéticamente ocurriría en la zona sísmica denominada Nicoya (zona de subducción), el cual tendría una magnitud máxima de 7,7 y una profundidad promedio de 30 km bajo la península de Nicoya. El segundo un sismo que sería originado en la zona sísmica de Papagayo (subducción) con una magnitud de 7,7 y ocurriendo a una profundidad promedio de 40 km. El tercer y cuarto escenario serían sismos originados en una falla local. Estos eventos tendrían una magnitud máxima de 6,5 y una profundidad promedio de 12 km. El primero asociado con las fallas Cote-Arenal o con la Chiripa y el segundo a la fallas Bagaces o la Caño Negro. Es conveniente indicar que posiblemente hay otras fallas cercanas, igualmente activas y potencialmente dañinas, pero no tan estudiadas, y cuyos efectos para nuestro estudio serían similares a los acá analizados.

De los cuatro escenarios antes planteados, finalmente se seleccionaron dos como los que presentan condiciones más adversas para la ciudad de Cañas: 1) Un evento de magnitud 7,7 relacionado a la subducción en la península de Nicoya y, 2) Un evento de magnitud 6,5 ocurriendo en la zona donde se encuentran las fallas Chiripa y Cote-Arenal. En la figura 4 se muestran las localizaciones epicentrales de estos dos escenarios sísmicos, que fueron descritos con mayor detalle anteriormente.

Definidos los escenarios sísmicos, se preparo en ILWIS un mapa de distancias, para cada uno tomando como referencia el epicentro de los mismos, y en ellos se resolvió la ecuación de atenuación de las señales sísmicas, obteniéndose un mapa raster de valores de aceleración horizontal pico del terreno. Para el cálculo se utilizó la ecuación propuesta por Climent *et al.* (1994) para la región de América Central. Esta ecuación permite obtener valores de aceleración horizontal pico tanto para condición de suelo como de roca, y esta representada por la siguiente expresión:

$$\ln A = -1.687 + 0,553 * M - 0.537 * \ln(r) - 0,00302 * r + 0.327 * S + \ln \epsilon$$

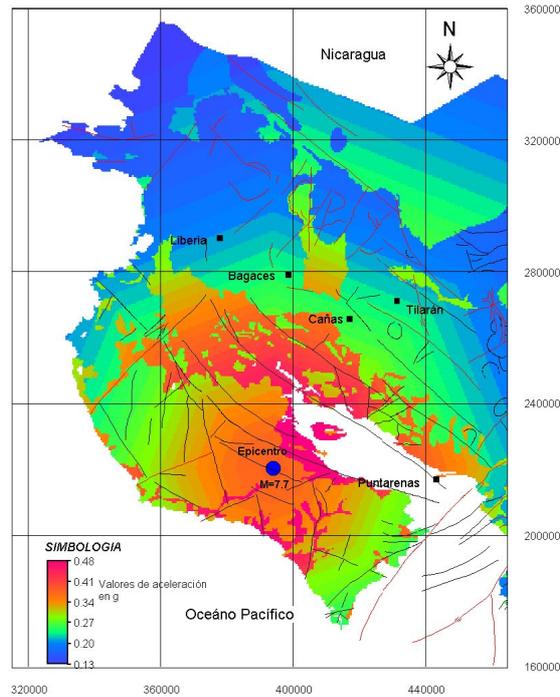
|                |   |
|----------------|---|
| donde: A       | Aceleración horizontal pico en $m/s^2$                |
| M              | Magnitud momento ( $M_w$ )                            |
| r              | Distancia hipocentral                                 |
| S              | S es 0 para sitios de roca y 1 para suelos            |
| $\ln \epsilon$ | término relacionado con el error de estimación (0,75) |

La ecuación anterior relaciona el nivel de aceleración con el tamaño del sismo (magnitud), la distancia de ocurrencia del evento y la condición de la geología superficial local del sitio a evaluar. Con base en los escenarios sísmicos se obtuvieron los valores de **M** y del mapa de distancias los de **r**; y la condición de sitio fue obtenida por medio de mapas geológicos disponibles de la región, reclasificando las diferentes unidades litológicas de acuerdo con su condición físico-mecánica cualitativa. El mapa resultante se puede considerar como una gruesa macrozonificación, En el caso de este último parámetro, para estudios posteriores se recomienda complementar esta información con mapas de espesores de suelos, y en la medida que se pueda con pruebas geofísicas que suministren valores de la velocidad de la onda **P** y **S** para poder preparar un mapa más detallado y preciso.

Dado que los escenarios sísmicos seleccionados tienen un carácter regional con respecto a la ciudad de Cañas, en las figuras 6 y 7 se presenta a manera ilustrativa el entorno regional de amenaza sísmica (en valores de aceleración), en el cual se encontraría la ciudad de Cañas en el caso que los escenarios sísmicos planteados ocurrieran. En estos mapas la condición de sitio fue incluida con base en la mapa geológico 1:500000. En la Tabla 2 se presenta de una manera cualitativa, como pueden interpretarse los valores de aceleración que aparecen en estos mapas y su relación con **I(MM)** (según Wald *et al.*, 1999).

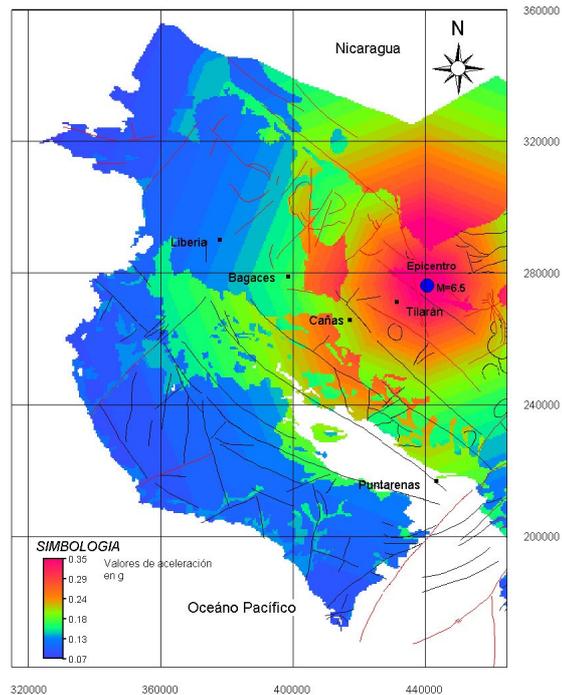
**Tabla 2: Relación entre escalas de intensidad y percepción de la sacudida sísmica.**

| I(MM) | Rango Acel. (g) | Como se percibe la sacudida |
|-------|-----------------|-----------------------------|
| VI    | 0,08 – 0,15     | Fuerte                      |
| VII   | 0,15 – 0,30     | Muy fuerte                  |
| VIII  | 0,30 – 0,60     | Severamente                 |
| IX    | 0,60 – 1,20     | Violentamente               |



**Fig. 6: Amenaza sísmica en la región noroeste de Costa Rica, dado que ocurre un sismo de magnitud 7,7 en la península de Nicoya y asociado a la subducción (Escenario 1).**

Del mapa de la figura 6, correspondiente con un sismo que tendría lugar en la península de Nicoya, se nota que en general toda la región noroeste del país presentaría aceleraciones superiores al 10 % de g, que las aceleraciones máximas variarían entre 0,5 y 0,6 g, en la zona epicentral, y valores entre 0,05 y 0,10 g en las zonas más alejadas hacia el norte del epicentro. Esto significaría que la sacudida sísmica sería percibida a partir de niveles considerados como fuertes, y que los niveles más altos estarían localizados principalmente en la zona epicentral y zonas clasificadas como de suelos blandos en las llanuras de inundación de los ríos, especialmente en la del Tempisque. En el caso de la ciudad de Cañas, se esperaría niveles de aceleración alrededor de 0,30 g y las variaciones con respecto a ese valor estarían en función de la variación de la condición de los suelos localmente



**Fig. 7: Amenaza sísmica en la región noroeste de Costa Rica dado que ocurre un sismo de magnitud 6,5 en la falla Chiripa o Cote-Arenal (Escenario 2).**

Del mapa de la figura 6, correspondiente con un sismo que tendría lugar en la península de Nicoya, se nota que en general toda la región noroeste del país presentaría aceleraciones superiores al 10 % de g, que las aceleraciones máximas variarían entre 0,5 y 0,6 g, en la zona epicentral, y valores entre 0,05 y 0,10 g en las zonas más alejadas hacia el norte del epicentro. Esto significaría que la sacudida sísmica sería percibida a partir de niveles considerados como fuertes, y que los niveles más altos estarían localizados principalmente en la zona epicentral y zonas clasificadas como de suelos blandos en las llanuras de inundación de los ríos, especialmente en la del Tempisque. En el caso de la ciudad de Cañas, se esperaría niveles de aceleración alrededor de 0,30 g y las variaciones con respecto a ese valor estarían en función de la variación de la condición de los suelos localmente.

En el caso de presentarse un evento sísmico en las falla Chiripa o la Cote-Arenal (Fig. 7), en la zona epicentral se pueden esperar aceleraciones horizontales pico entre 0,4 y 0,5 de g y de 0,25 g en promedio en la ciudad de Cañas. Debido a que la zona epicentral de este evento se encontraría en una zona montañosa, se considera que existe el potencial de formación de crecidas o avalanchas en algunos ríos de la zona por represamiento de sus cuencas, especialmente si el sismo ocurre durante la época lluviosa. En el caso de Cañas podría verse afectada por el represamiento en la cuenca alta del río Cañas y la correspondiente avalancha río abajo.

Ya ha sido planteado el contexto regional en el cual se encuentra la ciudad de Cañas en el caso de ocurrir los eventos antes mencionados. El efecto en la ciudad propiamente, dependerá en buena medida de las condiciones locales de sitio, ya que es bien conocido, y ampliamente aceptado que existe un efecto de la geología