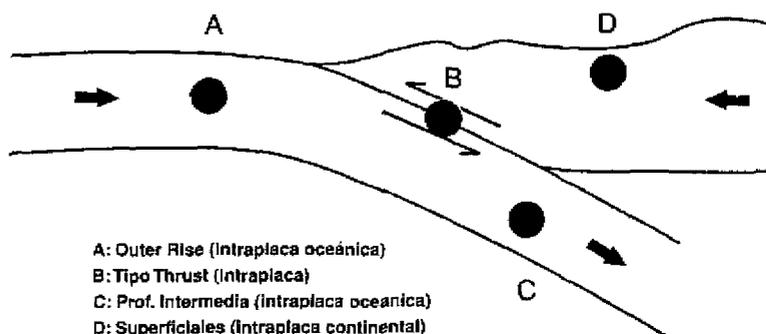


Tipos de sismos en una zona de subducción

to del 4 de Agosto de 1998, con epicentro en la región norte del Ridge de Carnegie, indica que ambas zonas corresponden a contactos interplaca fuertemente acoplados y en consecuencia, sísmicamente activos. Adicionalmente, existen reportes y antecedentes de importantes eventos sísmicos ocurridos en el pasado en esta región (Kanamori y McNally, 1982, Bonilla y Ruiz, 1992; Mendoza y Dewey, 1984), lo que sugiere que todo el margen a lo largo de la zona de subducción comprendida entre la latitud 4°N, y la latitud 3°S corresponde a una zona sísmicamente activa capaz de producir grandes terremotos.

La cinemática que presenta esta subducción a nivel del margen Norte del Ecuador y Sur de Colombia (0° - 1°N de latitud), obtenida a partir del modelo global de Placas NUVEL-1, indica una tasa de subducción para la Placa de Nazca del orden de 67 mm/año siguiendo una dirección de N80 5°E y asumiendo la Placa de Sudamérica fija (DeMets et al, 1990; Gripp, et al, 1990) Un valor similar se obtiene para la región epicentral del evento del 4 de Agosto lo que es de esperar dados los respectivos vectores de Euler de la ubicación del polo de rotación de la Placa de Nazca (latitud 56.0°N y longitud 94 0°W, con una velocidad angular de 0.72 grados/millón de años)

La Figura 2.1 muestra un mapa de la región con la sismicidad ocurrida previa al terremoto del 4 de Agosto determinada por la RNS del IG-EPN y que comprende el periodo 01 de Enero de 1995 al 04 de Agosto de 1998. En la parte inferior de la Figura se presenta un corte vertical que muestra la distribución en profundidad de esta actividad sísmica previa al sismo principal. La estrella indica la ubicación del terremoto del 4 de Agosto. Se observa claramente en el perfil vertical la actividad sísmica relacionada a la Placa de Nazca subduci-



- A: Outer Rise (Intraplaca oceánica)
- B: Tipo Thrust (Intraplaca)
- C: Prof. Intermedia (Intraplaca oceánica)
- D: Superficiales (Intraplaca continental)

FIGURA 2.2

da y que alcanza profundidades de más de 140 km. Es evidente una gran concentración de sismicidad tipo intraplaca en la Placa Sudamericana que pone en evidencia una intensa deformación en la corteza continental debido al fuerte grado de acoplamiento de la subducción en la zona de contacto interplaca. La geometría de la subducción muestra un ángulo de buzamiento de la Placa de Nazca del orden de los 25° hacia el Este entre 2°S y 1°N

El terremoto de Bahía corresponde a un típico terremoto de mecanismo inverso de bajo ángulo característico de la región de contacto interplaca en zonas de subducción (tipo thrust). Su ubicación epicentral respecto a la fosa y su profundidad focal corresponden exactamente a este tipo de eventos "thrust". La Figura 2.2 muestra un diagrama de los 4 principales tipos de eventos sísmicos que pueden ocurrir en un contexto tectónico de subducción. La ubicación en profundidad de este terremoto (Figura 2.1) concuerda con la ubicación esperada de los eventos de tipo B (thrust). Como se verá más adelante, el mecanismo focal calculado mediante inversión de las formas de ondas P en el campo lejano para este evento permiten concluir que el terremoto del 4 de Agosto de 1998 corresponde a un evento del tipo "thrust" en la región de contacto interplaca característicos de zonas de subducción fuertemente acopladas.

SISMICIDAD HISTORICA

El margen a lo largo de la zona costera comprendida entre el Sur de Colombia y Sur del Ecuador corresponde a una zona de subducción de gran actividad sísmica. La Figura 2.3 presenta un mapa de la sismicidad de la región

para el período 1977-1997 tomada del sitio WEB del USGS. En ella se puede apreciar en amarillo los límites de las Placas y la actividad sísmica representada por círculos de diferentes colores según su profundidad focal.

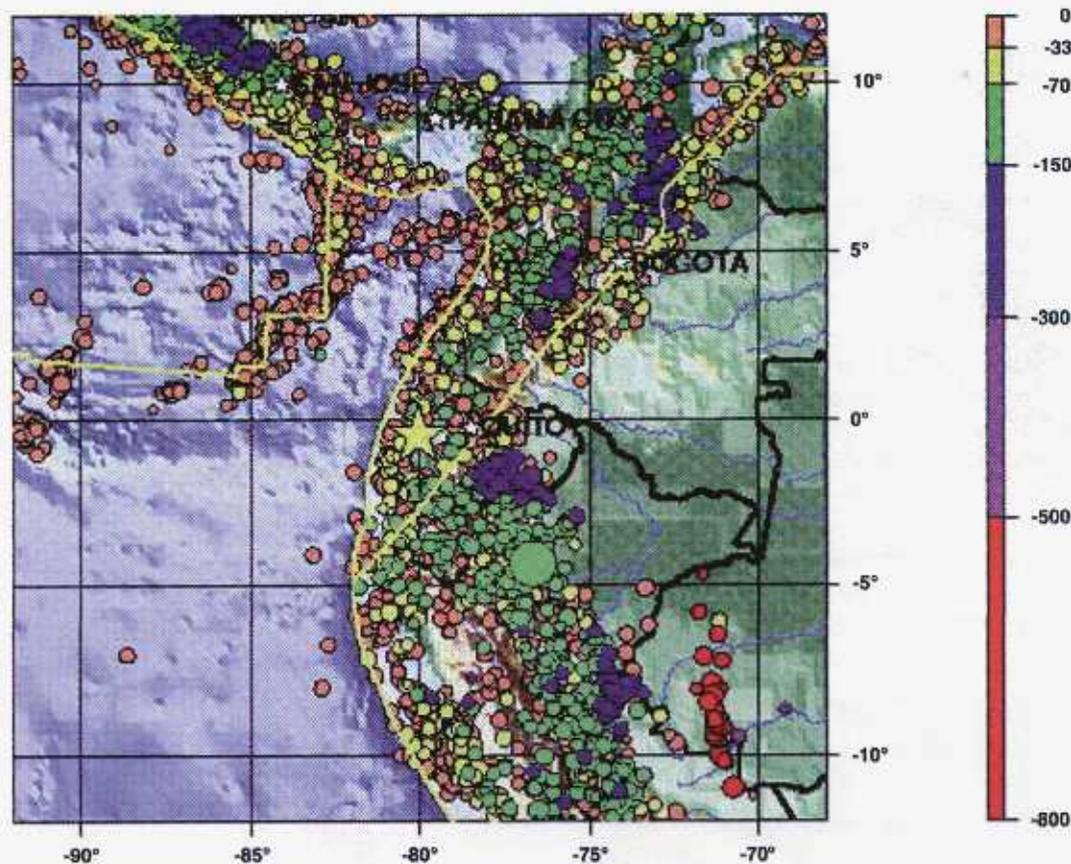


FIGURA 2.3

La zona epicentral del terremoto de Bahía ha sido en el pasado escenario de importantes sismos. La Tabla 2.2 presenta una recopilación de los grandes

terremotos ocurridos en el margen de subducción a lo largo del segmento Ecuador de la zona de subducción.

Tabla 2.2
Sismicidad en la zona costera del Ecuador
Catálogo SISRA

Año mes/día	LATITUD	LONGITUD	PROFUNDIDAD	M _s
1901 01/07	-2.00	-82.00	25	7.8
1906 01/31	1.00	-81.50	25	8.7
1906 09/28	-2.00	-79.00	150	7.5
1942 05/14	-0.75	-81.50	25	7.9
1956 01/16	-0.5	-80.5	33	7.2
1958 01/19	1.37	-79.34	60	7.8
1979 12/12	1.60	-79.36	24	7.7

El terremoto de 1956 tiene una ubicación epicentral, magnitud y efectos muy similares a los del evento de Bahía, por lo que es probable que sus zonas de ruptura sean también similares.

Un gran terremoto que también afectó esta zona

epicentral fue el evento del 14 de Mayo de 1942, con magnitud Richter M_s=7.9 y magnitud Momento M_w=7.8. La ruptura sísmica del terremoto del año 1942 comprometió aproximadamente el tercio Sur de la ruptura del gran terremoto de 1906 (M_w=8.8; M_t=8.7). Los terremotos de 1979 y 1958, de magnitudes de Momento 8.2 y 7.7 respectivamente, correspondieron a rupturas sísmicas que comprometieron el resto de la zona de ruptura del gran terremoto de 1906 salvo las últimas decenas de kilómetros del extremo

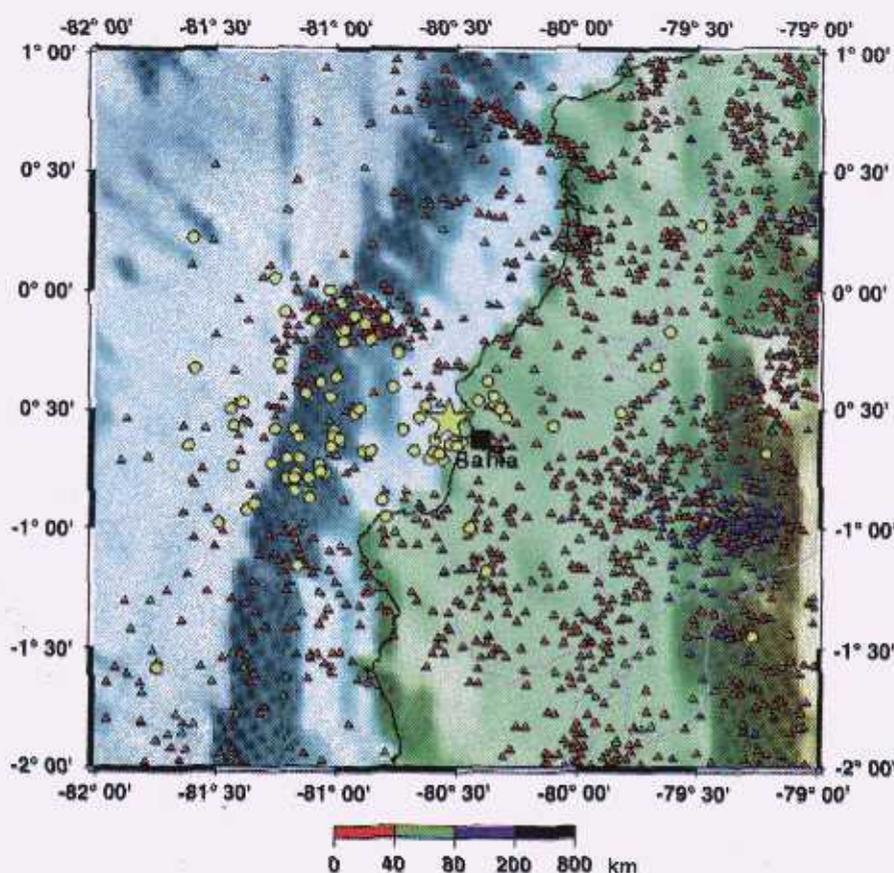
Norte y una porción entre las rupturas de los terremotos de 1942 y 1958 que pudo haber sido por el terremoto de 1956. El proceso de ruptura del terremoto del 4 de Agosto de 1998 comprometió nuevamente parte de esa brecha.

PROCESO DE RUPTURA

Una importante actividad sísmica se registró durante los meses previos alrededor de la zona de ruptura del terremoto del 4 de Agosto. Cabe destacar, sin embargo, que el área de ruptura comprometida con el sismo principal presentó una relativa calma sísmica al menos 8 meses antes del terremoto. La Figura 2.4 muestra la actividad sísmica registrada por la RNS del IGE-EPN para el período 01 de Enero de 1995 al 30 de Septiembre de 1998.

FIGURA 2.4

Actividad sísmica previa (en triángulos), las réplicas del terremoto (en círculos amarillos), la ubicación del epicentro del terremoto (estrella) y las profundidades de los eventos indexadas a un determinado color según una escala de profundidad que se incluye.



Las réplicas se extendieron en un área que va desde la latitud $\sim 0^\circ$ a -0.8° S por el límite Norte y Sur respectivamente y desde la longitud -80.4° W a -81.5° W para los límites Este y Oeste respectivamente. El área de ruptura estimada a partir de las réplicas es del orden de 7 mil km^2 , lo que da una longitud característica de ruptura de $\sim 90 \text{ km}$ asumiendo una relación de escala de $L = W/2$, donde W es el ancho del área de ruptura. Si adicionalmente se asume que el desplazamiento sobre el plano de falla satisface la relación de escala:

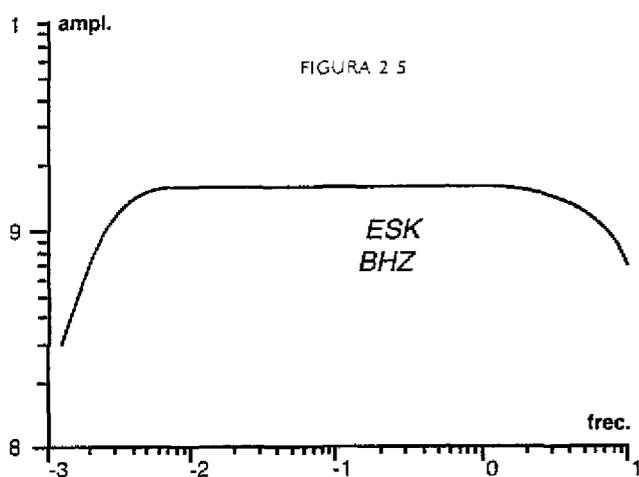
$$u = 10^{-5} \cdot L$$

y un valor para el módulo de cizalle de $7 \cdot 10^{11} \text{ dinas cm}^{-2}$, se obtiene un valor para el Momento Sísmico de $M_0 = 2,6 \cdot 10^{27} (2,6 \cdot 10^{21} \text{ Nm}^{-2})$, lo

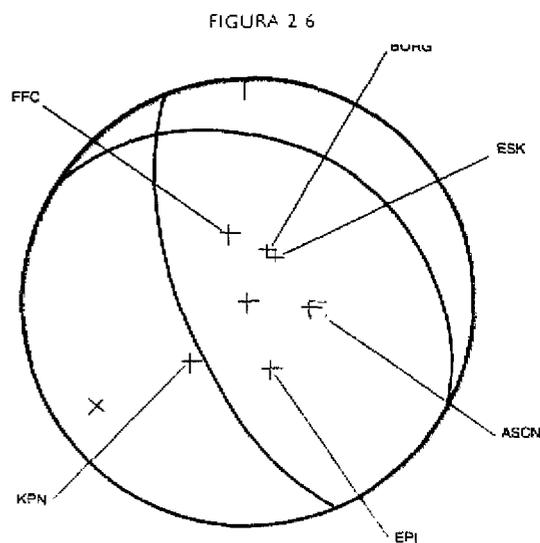
que corresponde a una magnitud de Momento de $M_w 7.5$.

Es evidente que las réplicas rellenaron el área de silencio sísmico definida por la actividad microsísmica de los meses previos al terremoto. Un área de similar tamaño se deja ver contigua hacia el Norte de la zona de ruptura y está definida fundamentalmente por la microsismicidad de los años 1995 y 1996. De romperse instantáneamente esta brecha o silencio sísmico, se generaría otro terremoto de similares características al del 4 de Agosto de 1998, con lo cual se habrían liberado las tensiones acumuladas en una zona equivalente a la que se rompió durante el terremoto de 1942.

MECANISMO FOCAL Y COMPLEJIDAD DE LA FUENTE



Respuesta instrumental de un sismógrafo de banda ancha



Mecanismo focal de Terremoto de Bahía

El terremoto fue registrado por la red mundial de estaciones digitales de banda ancha y gran rango dinámico, lo que permitió realizar un estudio detallado del proceso de ruptura, mecanismo focal y complejidad de la función temporal de la fuente sísmica. Se seleccionaron diferentes estaciones sismológicas digitales de banda ancha a distancias telesísmicas que simultáneamente permitieran asegurar una buena co-

bertura hacia diferentes azimuts respecto al epicentro del evento.

La Figura 2.5 muestra una respuesta instrumental típica de un instrumento del tipo banda ancha y gran rango dinámico (STS-1) utilizado en el análisis del proceso de ruptura para este terremoto. Se seleccionaron sólo los registros de ondas P (ventana de 120 segundos) para llevar

adelante un estudio detallado de la complejidad de la función fuente. Estas ondas presentan menos atenuación natural que las ondas S al viajar por el interior de la tierra ($t^*=T/Q=1$ para ondas P; $t^*=4$ para ondas S) y en consecuencia permiten caracterizar con más detalle la ruptura sísmica (mayor contenido de altas frecuencias).

La Tabla 2.3 presenta un resumen del resultado de la inversión de las ondas P en el campo lejano para este terremoto. El Momento sísmico encontrado, y que explica las amplitudes de los

registros sísmicos observados, está en muy buen acuerdo con el estimado a partir de la ruptura sísmica deducida del área de réplicas y relaciones de escala, lo que sugiere una magnitud de Momento para este evento de $M_w=7.5$, mayor que la magnitud Richter $M_s=7.1$ estimada de manera preliminar por el USGS. El mecanismo focal encontrado a partir de la inversión y presentado en la Tabla 2.3 y Figura 2.6, corresponde a un evento de tipo "thrust" típico de regiones de contacto interplaca en zonas de subducción.

Tabla 2.3
Parámetros del mecanismo focal del terremoto de Bahía

Mo	Strike	Dip	Rake	PROFUNDIDAD
$2.63 \cdot 10^{21}$ [Nm ²]	300°N	29°	54°	24 [km]

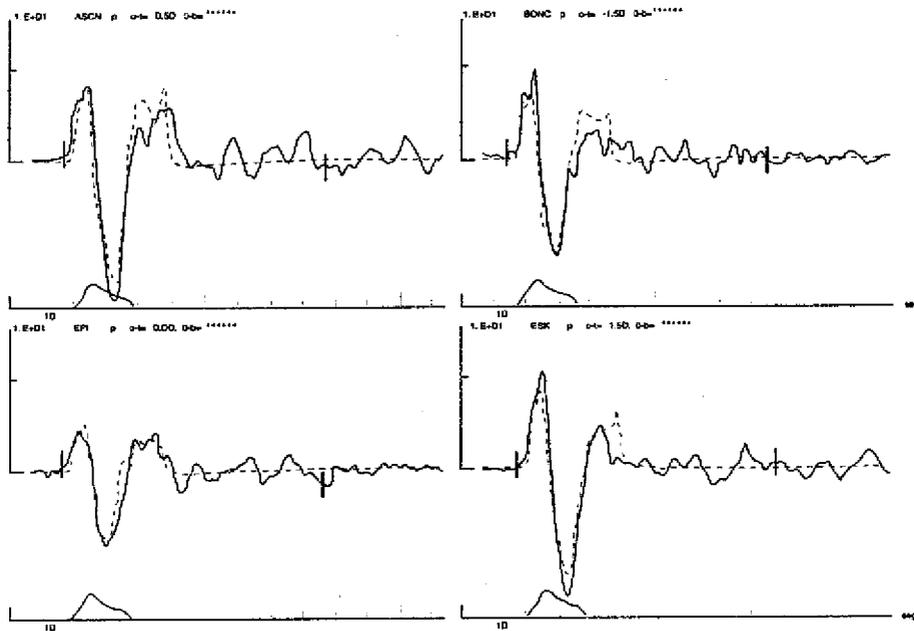


FIGURA 2.7 (a)

Modelación de la onda P y proceso de ruptura

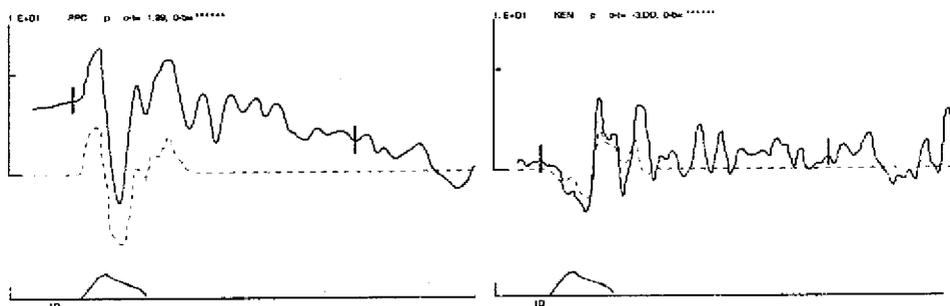


FIGURA 2.7 (b)

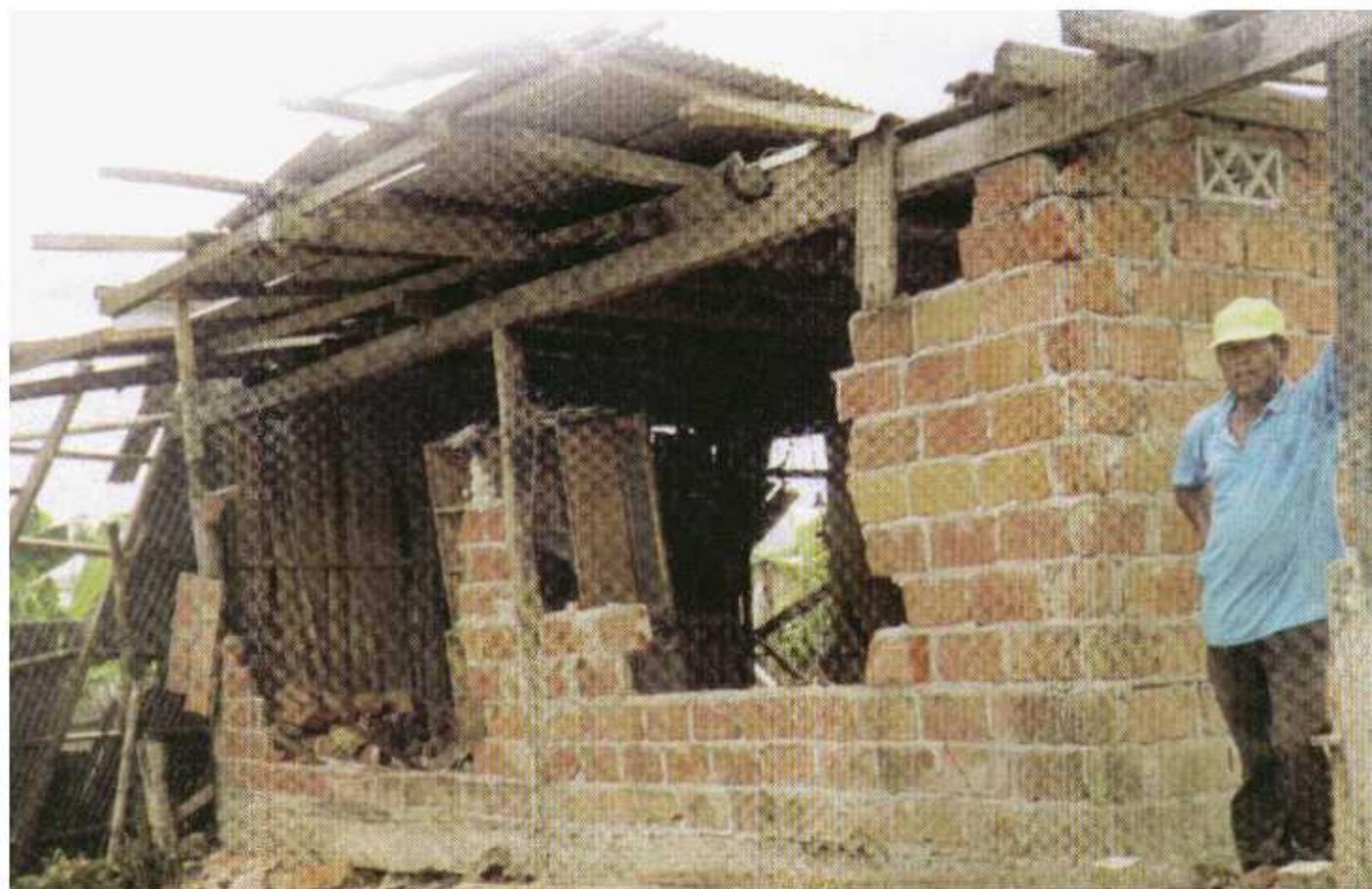
Las Figuras 2.7(a) y 2.7(b) muestran los registros de ondas P observados y los sismogramas sintéticos calculados (en punteado) a partir de los parámetros focales determinados mediante el proceso de inversión de las señales. El ajuste es bastante bueno y puede apreciarse a partir de una simple inspección de los registros que el sismo presentó un proceso de ruptura sencillo con una rápida liberación de mo-

mento sísmico al inicio, dentro de los 6 primeros segundos, para posteriormente iniciar el proceso de detención de manera paulatina con una duración total de la ruptura de al menos unos ~ 20 segundos. Esto indicaría que, asumiendo una longitud característica de ruptura bidireccional del orden de los 90 km, la velocidad de ruptura da un valor de ~ 2.3 km/s.

CONCLUSION

El terremoto de Bahía del 4 de Agosto de 1998, es un típico terremoto interplaca relacionado con el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana en el segmento Ecuador y de ninguna manera constituye el primero de este tipo que sacude la zona. Un terremoto de similares características ocurrió el 16 de Enero de 1956 y uno mayor de magnitud, $M_s=7.9$, en 1942. La ruptura del terremoto de Bahía fue simple, habiéndose detenido hacia el Norte en una zona que presentó una conspicua actividad microsísmica durante el año

1996. Esta área constituiría una barrera que impidió la propagación de la ruptura más al Norte, hasta una segunda posible barrera frente a Muisne (lat. 0.5° N, Fig. 2.4) que pudo haber sido la causante de la detención del proceso de ruptura del terremoto de 1942. Entre estas posibles barreras se nota una clara ausencia de microsismicidad durante los meses pasados, constituyendo por lo tanto una zona de potencial generación de un terremoto de características similares al terremoto de Bahía en los próximos años.



Asignación de Intensidades

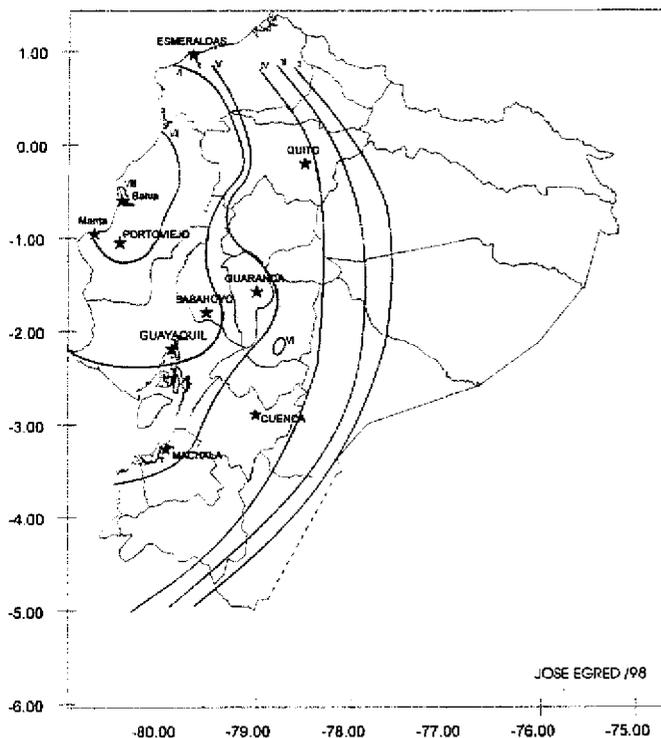


Fig. 3.1 Mapa de isosistas elaborado en base a las intensidades asignadas en diferentes localidades del país

La provincia de Manabí fue la más afectada por el terremoto del 4 de Agosto de 1998, que estuvo localizado en la parte central de la costa manabita. Las localidades donde se presentaron los mayores daños fueron Bahía de Caráquez, San Vicente y Canoa. En menor proporción los daños afectaron a otras ciudades y poblaciones como Tósagua, Jama, Portoviejo, Manta, Crucita Jipijapa, Chone y otras. Daños menores se reportaron en localidades específicas de las provincias de Esmeraldas, Guayas, Bolívar y Chimborazo.

En este terremoto, a más de los daños esperables en construcciones populares, llama mucho la atención la afectación de los edificios modernos y caros de la ciudad de Bahía de Caráquez, que será analizada en detalle más adelante.

La gran mayoría de construcciones de tipo popular, destinadas a vivienda y/o pequeños negocios en la provincia de Manabí, generalmente han sido construidas en forma artesanal. La generalidad de estas construcciones es de una y dos plantas, existiendo algunas de tres pisos. En el sector central de las ciudades, todas las casas tienen portales hacia la calle.

En estas edificaciones predomina el tipo mixto, consistente en una estructura de madera que se rellena con mampostería de ladrillos de aproximadamente 10 cm. de espesor, que se colocan de canto, con lo cual estas paredes resultan sumamente delgadas e inestables. También existen casas con paredes de madera o de caña aplanada con o sin recubrimiento (bahareque). Especialmente en las casas antiguas las paredes son esbeltas con alturas de por lo menos 3m, a fin de obtener buena ventilación. Su acoplamiento con la estructura es débil.

En menor proporción se encuentra estructuras con columnas de concreto, bloque de cemento o ladrillo y mampostería de estos mismos materiales. En algunos casos las vigas de madera de los portales están recubiertas de ladrillo delgado.

Los pisos y tumbados por lo general son de madera (comunmente duelas), colocadas sobre vigas del mismo material, con espesor variable de acuerdo a las dimensiones de las habitaciones. Las cubiertas en su gran mayoría son de cinc corrugado y en mucha menor proporción de planchas de asbesto-cemento.

Estas características de las construcciones las hacen vulnerables a los movimientos sísmicos, lo cual se acrecienta por el deterioro de los materiales de construcción, en especial la madera, razón por la cual, las casas resultan más afectadas en función de su antigüedad.

Los daños más comunes son la caída parcial o total de paredes, tanto interiores como exteriores. Gran cantidad de las paredes que no colapsaron, han quedado seriamente afectadas por cuarteamientos severos que obligan su derrocamiento. Otros de los daños frecuentes han sido la caída de comisas, balcones y adornos. En casas de buena calidad se presentaron fisuras de fácil reparación en las paredes.

En cuanto a la estructura de las casas, se observaron muchos casos de falla en los pilares de madera que sostienen el armazón, por ruptura o desviación de la línea de plomada, al igual que fractura de vigas horizontales con la caída de cubiertas, pisos y tumbados.

Las construcciones con estructura de concreto y mampostería de bloque de cemento o ladrillo, experimentaron menos daños, consistentes principalmente en paredes fisuradas.

La figura 3.1 muestra el mapa de isosistas de este terremoto. Sin embargo, si se toman en cuenta los severos daños en edificios nuevos de hormigón armado, equivalentes a los edificios tipo C de la escala sísmica de intensidades MSK aquí utilizada, la intensidad en la parte norte de Bahía de Caráquez sería de grado IX.

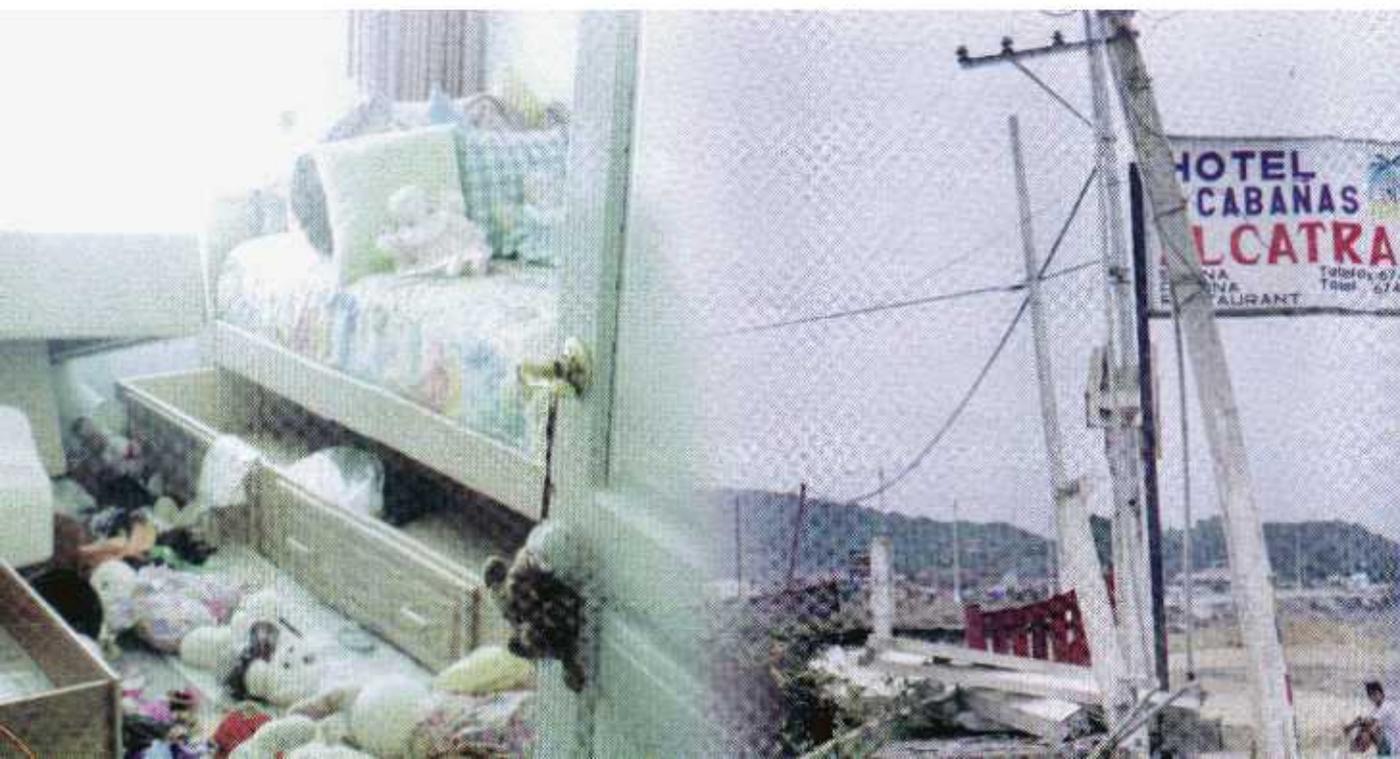
Movimientos máximos *del Terreno*

No se dispone de registros acelerográficos en el área de Bahía de Caráquez. El empleo de relaciones empíricas para estimar los valores máximos probables de los movimientos del terreno no se consideran confiables por las dos razones siguientes: (a) visto el desempeño de edificaciones comparables construidas en diferentes áreas urbanizadas, parece que las condiciones locales modificaron las características del movimiento a nivel de fundación; (b) las regresiones empíricas entre magnitud y distancia a la fuente, están asociadas a elevadas varianzas que, en el mejor de los casos, sólo permitirían estimar un rango amplio de movimientos máximos posibles. En base a las evidencias de daños y a la evaluación de algunas estructuras o se estima que la aceleración máxima del terreno alcanzó valores entre 0.15g y 0.20 g en el área de Bahía.

En todo caso, la simple estimación de la aceleración máxima, nada dice sobre las formas espectrales más probables, por las razones anotadas en el punto (a) del párrafo anterior.

Con la información disponible hasta el momento, no está probado que la acción sísmica en las diferentes áreas urbanizadas de Bahía haya excedido los valores asociados a los criterios de diseño sismorresistente aplicados.

Para dilucidar esta importante incertidumbre, se requiere: (a) instalar estaciones de registro acelerográfico en el área; (b) efectuar estudios de sitio para determinar las formas espectrales predominantes; (c) evaluar cuantitativamente la capacidad portante de una muestra de estructuras sencillas que permitan acotar los movimientos máximos ocurridos durante el sismo.



Movimientos máximos *del Terreno*

No se dispone de registros acelerográficos en el área de Bahía de Caráquez. El empleo de relaciones empíricas para estimar los valores máximos probables de los movimientos del terreno no se consideran confiables por las dos razones siguientes: (a) visto el desempeño de edificaciones comparables construidas en diferentes áreas urbanizadas, parece que las condiciones locales modificaron las características del movimiento a nivel de fundación; (b) las regresiones empíricas entre magnitud y distancia a la fuente, están asociadas a elevadas varianzas que, en el mejor de los casos, sólo permitirían estimar un rango amplio de movimientos máximos posibles. En base a las evidencias de daños y a la evaluación de algunas estructuras o se estima que la aceleración máxima del terreno alcanzó valores entre 0.15g y 0.20 g en el área de Bahía.

En todo caso, la simple estimación de la aceleración máxima, nada dice sobre las formas espectrales más probables, por las razones anotadas en el punto (a) del párrafo anterior.

Con la información disponible hasta el momento, no está probado que la acción sísmica en las diferentes áreas urbanizadas de Bahía haya excedido los valores asociados a los criterios de diseño sismorresistente aplicados.

Para dilucidar esta importante incertidumbre, se requiere: (a) instalar estaciones de registro acelerográfico en el área; (b) efectuar estudios de sitio para determinar las formas espectrales predominantes; (c) evaluar cuantitativamente la capacidad portante de una muestra de estructuras sencillas que permitan acotar los movimientos máximos ocurridos durante el sismo.

