CAPITULO 5

MODELO DE ISOSISTAS

5.1. DATOS INICIALES.

Para la obtencion del modelo de las isosistas se seleccionaron, 14 sismos para el periodo comprendido entre 1920 y 1974 con valores de intensidad que varian desde V a IX y magnitud de 5.0 a 7.8 (Tabla 5-1). Para este propósito utilizamos la escala de intensidad y no los parámetros de aceleración, dado que éstos son desconocidos para una gran parte de los sismos en cuestión.

5.2. CALCULO DEL AREA DE LAS ISOSISTAS

Para realizar el calculo del área de las isosistas, se utilizaron solamente las líneas isosistas cerradas de forma circular o elíptica para sismos con intensidad $I \geq V$ y magnitud registrada por instrumentos. Cada línea isosista para su medición fue aproximada a una elipse. Se midió el largo de los dos ejes principales de la elipse y se calculó su área. Los valores de cada linea isosista para los 14 sismos considerados se presentan en Tabla 5-1.

En Figura 5-1 se gráfica LogQ en función de M para cada intensidad.

5.3. MODELO DEL AREA DE LAS ISOSISTAS.

Para analizar el modelo del area de las isosistas se utilizó

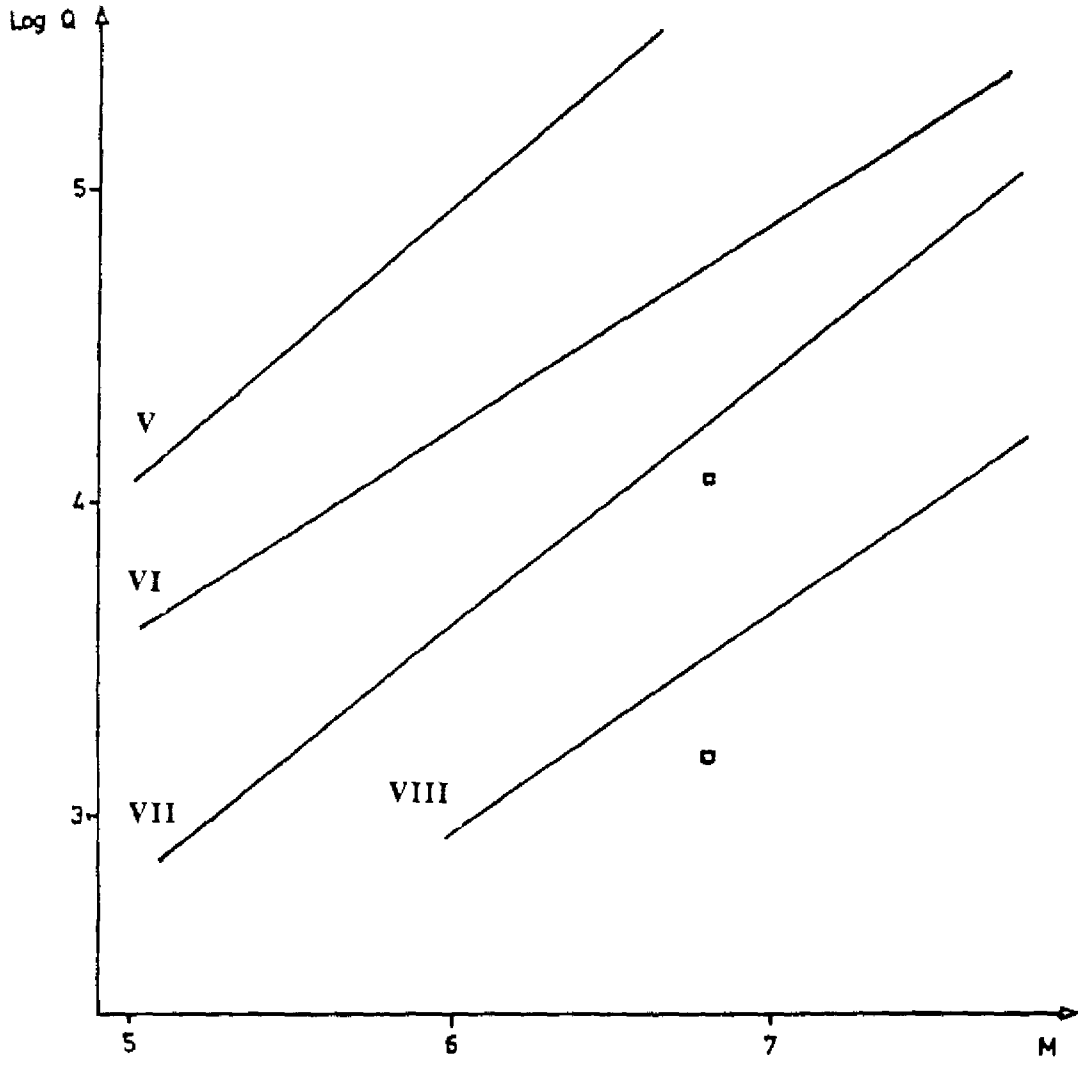


Figura 5-1: LogQ (M), para distintas intensidades.

□ Sismo de 1959, h = 100 km y M = 6.8

Tabla 5-1

#	Años	Lat. S	Long. W	Mag	H	Long. AREA, [km^2] V	VI	VII	VIII	IX	Región
1	1920	32.7	68.4	6.3	40	5.345	4.533	3.631	3.166	-	Costa de Araujo (Mendoza)
2	1927	32.4	69.3	6.3	70	-	-	4.635	3.412	-	Mendoza
3	1929	34.9	68.0	6.5	50	-	4.620	3.862	3.189	-	Sur Mendocino (Mendoza)
4	1930	24.7	66.3	6.0	45	4.820	4.175	3.631	2.845	-	La Poma (Salta)
5	1934	33.7	64.5	6.0	30	-	4.008	3.673	2.646	-	Sampacho (Córdoba)
6	1936	32.5	65.9	6.2	30	5.055	4.520	4.038	3.391	-	San Francisco (San Luis)
7	1941	31.7	67.9	6.7	70	5.432	4.686	3.957	-	-	Caucete (San Juan)
8	1944	31.4	68.4	7.8	30	-	5.170	5.299	4.104	3.318	San Juan
9	1948	24.9	64.8	7.0	50	-	-	4.471	3.544	-	Salta
10	1952	31.7	68.9	7.0	30	-	4.627	3.932	3.449	-	La Rinconada (San Juan)
11	1959	23.2	64.7	6.8	100	-	4.081	3.202	-	-	Salta
12	1966	27.8	67.5	5.0	30	4.299	3.494	2.728	-	-	Belén (Catamarca)
13	1973	24.8	64.6	6.1	40	5.092	4.566	3.741	-	-	Salta
14	1974	23.3	64.4	5.0	30	3.876	3.428	2.651	-	-	Orán

la relación lineal entre el logaritmo del área y la magnitud:

$$\text{Log } Q(i) = A(i) + B(i).M \qquad (1)$$

donde Q es el área, i = intensidad y M = magnitud.

Los parámetros A y B fueron estimados por el método de regresión ortogonal (Tabla 5-2). Asumimos que los valores de magnitud y LogQ tienen un error promedio de sM = 0.25 y sLQ = 0.2 respectivamente. El error de magnitud 0.25 es típico para los catálogos que han sido obtenidos recopilando información de diferentes agencias, como en nuestro caso. El valor 0.2 para el error de LogQ, fue tomado de experiencias previas [7]. Las últimas dos columnas en Tabla 5-2, presentan el intervalo de confianza con una probabilidad del 90% para sLQ si sM = 0.25. Se observa que la decisión de adoptar sLQ = 0.2 es correcta para todas las intensidades excepto para I=7. Esto puede

Tabla 5-2

I	n	εM	εQ	A	B	Int. conf. εLQ
5	7	.25	.20	-.304	.873	.000 - .283
6	12	.25	.20	.375	.629	.098 - .371
7	14	.25	.20	-2.343	.972	.243 - .615
8	9	.25	.20	-1.273	.697	.000 - .337

I - intensidad,
n - números de datos,
εM - error en magnitud,
εLQ - error en LogQ,
A,B - parámetros estimados,
Int conf. εLQ - intervalo de confianza con nivel de probabilidad 90% para εLQ

ser explicado por la presencia en los datos de un sismo con h = 100Km (1959, M=6 8). Las áreas isosistas de éste son muy pequeñas (ver Figura 5-1). Si excluimos este sismo del estudio, los resultados mejoran utilizando εLQ = 0 2 para cualquiera de las intensidades (caso 2 en Tabla 5-3).

En los datos utilizados hay dos sismos con h = 70Km. Se analizó si la exclusión de estos influía en la estimación de los parámetros de regresión. Los resultados obtenidos (caso 3 en Tabla 5-3) muestran que esto no es así para I > V.

Tabla 5-3

Prof.	Todas (1)		H < 100 (2)			H < 60 (3)	
I	n	B	n	B	A	n	B
5	7	.87	7	.87	-0.30	6	.93
6	12	.63	11	.65	.32	10	.64
7	14	.97	13	.81	-1 27	11	.88
8	9	.70	9	.70	-1.27	8	.71

5.4. COMPARACION CON OTRAS RELACIONES.

Con el propósito de analizar la relación (1) obtenida para Argentina, se la comparó con otras relaciones estimadas para distintas regiones tectónicas del mundo [5]. En Tabla 5-4 se presentan los parámetros A y B obtenidos para cada intensidad y en Figuras 5-2 y 5-3 se gráfica LogQ en función de M, para intensidad VII y VIII respectivamente.

Tabla 5-4

LogQi = Ai+Bi*M

Regiones:

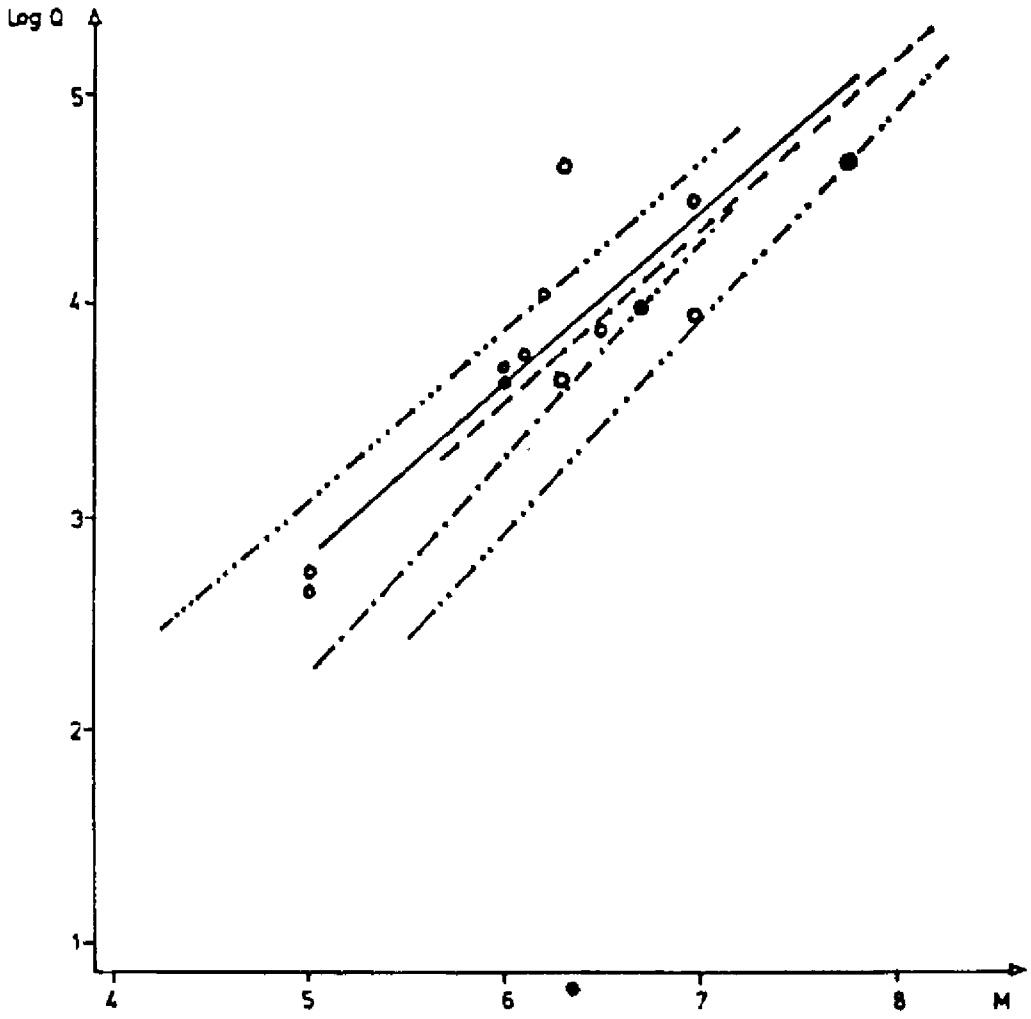
CD	- Fallas (San Andrés y otras)	(M=5.0-8.0)
KR	- Márgenes activos de continentes	(M=5.7-8.5)
PF	- Placas reactivadas e Himalaya	(M=5.5-8.5)
ALH	- Grecia, Egeo, Alpes	(M=5.0-7.5)
ALB	- Italia	(M=4.2-7.3)

Relaciones Individuales

	I	A	B
CD	7	-.62	.68
	8	-2.86	.89
	9	-7.17	1.40
KR	7	-1.61	.81
	8	-2.31	.86
ALH	7	-2.96	1.02
	8	-4.20	1.10
	9	-4.76	1.10
PF	7	-3.50	1.04
	8	-4.72	1.12
	9	-6.75	1.33
ALB	7	-1.03	.78
	8	-1.64	.79
	9	-5.19	1.25

Relaciones con B común

	Grupo 1			Grupo 2			
I	7	8	9		7	8	9
	B=0.8	B=0.8	B=1.3		B=1.0	B=1.1	B=1.2
Reg.	A(7)	A(8)	A(9)	reg	A(7)	A(8)	A(9)
CD	-1.25	-2.23	-6.62	PF	-3.11	-4.69	-5.79
KR	-1.26	-1.84	-6.47	ALH	-2.74	-4.31	-5.42
ALB	-.94	-1.66	-5.69				



REFERENCIAS

ALB

ALH

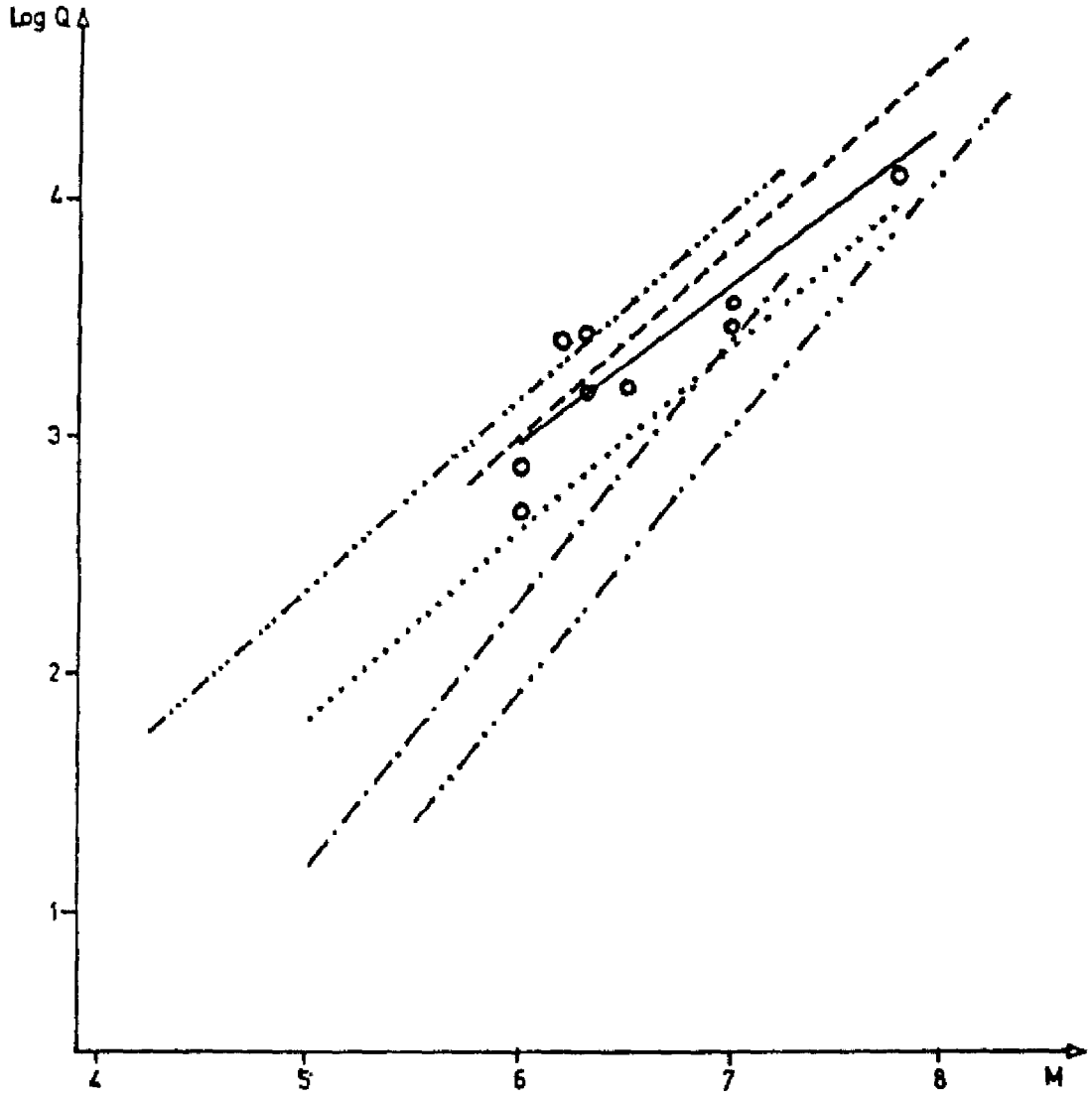
PF

KR

ARGENTINA

Obs. Argentina

Figura 5-2: Gráfico LogQ (M), intensidad VII



REFERENCIAS

ALB

ALH

PF

KR

CD

ARGENTINA

Obs. Argentina

Figura 5-3: Gráfico LogQ (M), intensidad VIII

Las figuras demuestran que los datos para el territorio de Argentina son insuficientes y tienen una gran dispersión. Las áreas de isosistas en Argentina son más grandes que las áreas en placas reactivadas (Tíbet, Himalaya, Asia Media), región ALH (Grecia, Egeo) y China; y aproximadamente similares a los valores de las siguientes regiones: Italia (región ALB), los márgenes activos de los continentes (región KR, que incluye una parte de los datos argentinos) y los de la región CD. Estas tienen dos valores comúnes de B: para las mayores intensidades B = 1.3 y para las menores B = 0.8 (grupo 1 en Tabla 5-4). El grupo 2 tiene B $\geq$ 1 para cualquier I.

El modelo para Argentina es similar al grupo 1 para baja pendiente B. Las "regiones" CD y KR no pertenecen a la misma región tectónica, son grupos de zonas separadas del mundo, reunidas debido a la ocurrencia de movimientos tectónicos aproximadamente similares. Solamente la región ALB incluye datos locales, lo que hace posible que se puedan comparar los datos locales argentinos con esta región.

A continuación se comparan los parámetros B para Argentina e Italia en forma conjunta y por separado:

	Argentina		Italia		Común	
I	n	B	n	B	n	B
7	13	.81	37	.78	50	.85
8	9	.70	30	.79	39	.86

Dada la falta y dispersión de los datos para la región de estudio, se decidió utilizar el valor de B = 0.85 obtenido en forma conjuntamente para las dos regiones, como valor común y a partir de éste obtener los valores de A para cada intensidad.

La comparación estadística del parámetro B, para ambas regiones muestra que los datos no contradicen la hipótesis sobre equivalencia de este parámetro para I=VII y I=VIII. En consecuencia podemos usar el valor común de B = 0.85 y diferentes valores de A(I) para cada intensidad: A(7) = -1.54, A(8) = -2.37, en el cálculo del riesgo sísmico.

5.5 DECISION FINAL PARA $LogQ_1(M)$.

Figura 5-4, muestra que los datos macrosísmicos usados, son irregulares sobre el territorio. Mucho recelo se crea por la falta de información en regiones 2, 3, 9a. Hay solo dos mapas isosistas (1929 y 1930) de los 14 sismos. En estas regiones es muy importante analizar el hecho que el parámetro B=0.85 de la regresión LogQ(M) sea mayor que b=0.74 obtenido de RFM. En el problema de riesgo, el efecto promedio de un movimiento de intensidad $\geq$ I es proporcional al área de la isosista y frecuencia de sismos, esto es:

$$\int_{Mc}^{M_{max}} 10^{-bM} * 10^{BM}\, dM = \int_{Mc}^{M_{max}} 10^{(B-b)M}\, dM$$

En esta relación, la importancia de la máxima magnitud dramáticamente aumenta si B-b > 0. En las regiones (2, 3, 9a) tenemos:

1 - B - b = 0.1 > 0

2 - solo dos eventos con datos macrosísmicos

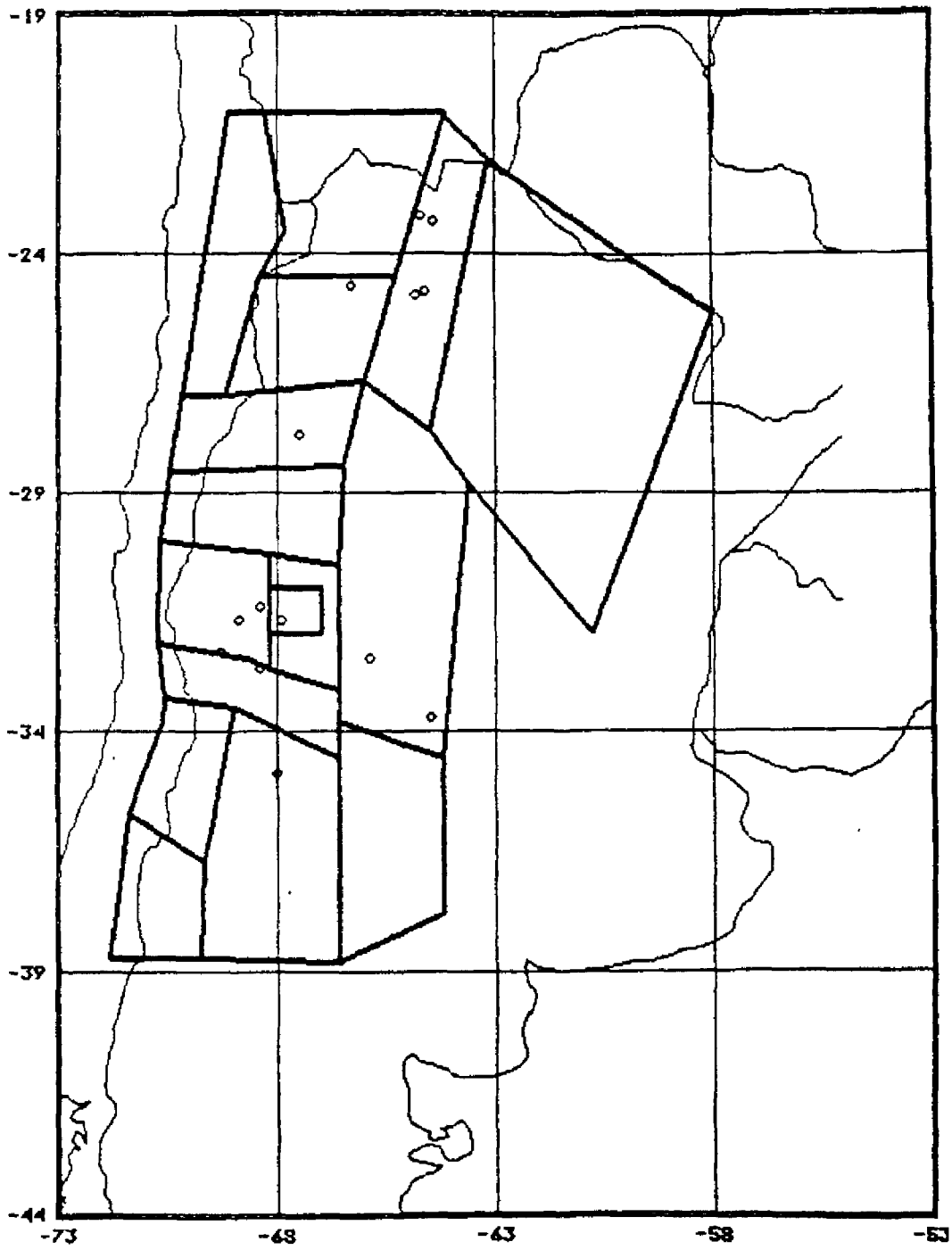


Figura 5-4: Sismos utilizados en el modelado de isosistas

3 - muy poca información para la estimación de M_{max} (ver sección sobre "M_{max}").

Por lo tanto, es necesario disminuir la influencia de M_{max} en estas regiones para estimar el riesgo sísmico. Se tomó una decisión neutral sobre B estableciendo que B = b.

De esta manera la decisión adoptada sobre parámetros LogQ(M) es la siguiente:

- en regiones 2, 3, 9a: B = b = 0.74

  A(i=7) = -0.88

  A(i=8) = -1.61

- en el resto de las regiones: B = 0.85

  A(i=7) = -1.54

  A(i=8) = -2.37

En futuras investigaciones es necesario incluir datos adicionales, comenzando por los eventos de Tabla 5-5, es muy importante buscar información adicional para las regiones 2, 3, 9a.

Tabla 5-5

Sismos del período instrumental que no fueron considerados debido a la ausencia de mapas isosistas.

Fecha	Lat,S	Long,W	H	M
1966 10 21	27.8	67.5	30	5.0
1973 11 19	24.8	64.6	40	6.1
1974 8 17	23.3	64.4	30	5.0
1975 12 29	56.77	68.48	14	6.5
1976 2 14	57.41	64.42	40	6.0
1977 1 17	24.85	68.67	33	6.5
1981 1 18	61.09	55.43	22	6.0
1983 7 11	60.89	53.02	10	7.0
1983 12 15	33.09	70.28	54	6.0
1985 1 26	33.05	68.46	5	6.0

5.6. INTENSIDAD EN EL AREA EPICENTRAL.

En este ítem, M_{low} se definirá como el menor valor de magnitud el cual puede generar intensidad I. El catálogo utilizado para su cálculo contiene 94 eventos para el territorio argentino con valores de máxima intensidad Io. Pero una parte de estos sismos no pueden ser considerados, puesto que sus magnitudes fueron obtenidas de datos macrosísmicos (Tabla 5-6). En consecuencia,

Tabla 5-6

Año	Lat. S	Long. W	M	Io
1692	25.4	64.8	7.0	9
1782	33.0	69.2	7.0	8
1844	24.8	64.7	6.5	7
1845	35.1	59.8	5.0	5
1861	32.9	68.9	7.0	9
1888	34.6	57.9	5.5	6
1894	29.8	69.0	7.5	9
1903	32.1	69.1	6.0	8
1908	30.5	64.5	6.5	7
1917	32.3	68.9	6.5	7

solo 56 eventos con registro instrumental desde 1920 hasta enero de 1991, magnitud $M \geq 4.0$ y valor de profundidad fueron utilizados para obtener información sobre M_{low}. (ver Tabla 5-7).

Los máximos valores observados de Io para diferentes profundidades y magnitudes se presenta en la Tabla 5-8. Como vemos, los datos son insuficientes para obtener una decisión.

Actualmente hay varias relaciones empiricas entre la magnitud Mo y Io, las cuales son usadas en diferentes regiones para calcular la magnitud macrosísmica para el periodo de observación pre-instrumental. Usaremos algunas de estas

Tabla 5-7

Año	h	M_{max}	Io	Año	h	M_{max}	Io	Año	h	M_{max}	Io
1920	40	6.0	8	1967	45	5.4	6	1989	10	4.5	3
1927	110	7.1	8	1968	20	5.0	6	1989	120	4.1	3
1929	40	6.8	9	1970	100	5.7	4	1989	44	4.8	4
1930	30	6.0	8	1970	118	5.7	3	1989	52	4.5	3
1934	30	6.0	9	1971	95	6.7	5	1989	57	4.4	3
1936	40	6.0	8	1971	105	6.8	4	1989	118	4 7	4
1941	20	6.2	7	1973	117	6.5	5	1990	120	4.7	3
1944	30	7.4	9	1973	7	5.9	6	1990	29	4.5	4
1947	50	5.5	7	1973	12	5.9	7	1990	120	4.9	4
1948	30	5.5	6	1974	30	5.0	7	1990	102	5.7	4
1948	50	7.0	9	1975	33	5.5	5	1990	22	4.9	5
1950	100	8.3	7	1977	102	5.2	7	1990	112	5.5	5
1952	30	7.0	8	1977	4	7.4	9	1990	120	4.6	2
1955	25	6.9	6	1988	117	5.2	2	1990	122	4.4	3
1959	100	6.8	8	1989	49	4.9	3	1990	106	4.6	2
1964	80	6 0	5	1989	56	4.8	3	1990	125	4.8	4
1965	40	4.6	5	1989	110	5.5	3	1990	116	5.3	4
1966	60	5.0	7	1989	28	5.3	4	1991	118	4 0	3
1966	20	4.8	6	1989	22	5.4	3				

Tabla 5-8

Prof. / M	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
4.4-4.5	3		4		3	3						3
4.6-4.9		6		5	3	3					2	4
5.0-5 4		6	7			7				7		4
5.5-5.9	7		6		7					4	5	3
6.0-6.4		7	9	8				5		8		
6.5-6.9		6		9						5	4	5
7.0-7.4	9		9		9						8	
7.5-7.9												
≥ 8.0										7		

relaciones para determinar M_{low}:

(1) M = 1 + 2/3 Io - Gutenberg (sin h)

(2) Ms = 1.26 + 0.63 * Io - Sudamérica

(3) Ml = 1.08 + 0.26 * Io - Bolivia

(4) Mm = a * Io + b * Log(h) + c - Perú

donde:

a	b	c	condiciones
0.0896	+4.14712	0.75156	0 < h < 33, I ≥ 6
0.47184	-5.36147	13.02346	33 < h < 100, I ≥ 6
0.28707	+1.2003	1.70319	0 < h < 33, I = 2 a 5
0.28445	+4.22306	-4.14673	33 < h < 130, I = 2 a 5

(5) M = 0.62 * Io + 2.18 Rumania

A continuación se compararon los datos observados de Tabla 5-8 con valores de Io calculados por medio de las fórmulas arriba mencionadas (Tabla 5-9). Los valores de M_{low} deben estar en armonía con dos posiciones:

-M_{low} no debe ser menor que la magnitud $M_{min}(I)$ observada.

-M_{low} debe estar de acuerdo con las opiniones sobre M_{low} en regiones cercanas.

Tabla 5-9

Io para diferentes magnitudes y profundidades

	Observado en Argentina				Otras Regiones							
								(4) Perú				
h: Io	≤ 70 M_{min}	≤ 70 h_{min}	> 70 M_{min}	> 70 h_{min}	(1) normal M_{min}	(2) ≤ 55 Ms	(3) ML	5 M	30 Mm	100 Mm	(5) >70	M_{low} para sismos normales
4	4.5	28	4.7	100	3.5	3.8	3.6	3.7	4.6	5.4	4.4	
5	4.6	22	5.5	112	4.3	4.4	4.2	4.0	4.9	5.7	5.0	
6	5.0	7	-	-	5.0	5.0	4.8	4.2	7.4	5.1	5.5	
7	5.0	12	5.2	102	5.7	5.7	5.4	4.3	7.5	5.6	6.1	5.0
8	6.0	30	6.8	100	6.3	6.3	6.0	4.4	7.6	6.1	6.7	6.0
9	6.0	4	-	-	7.0	6.9	6.7	4.5	7.7	6.6	7.2	6.0

M_{min} - mínima magnitud observada para Io.

h_{min} - mínima profundidad observada para Io.

M_{low} - decisión adoptada para utilizar en la estimación del riesgo sísmico.

En Tabla 5-9 se ve que de acuerdo a los datos observados I=7 corresponde a M $\geq$ 5 0. El mismo resultado fue obtenido en INPRES, como resultado del estudio de la ley de atenuación sobre la base de datos de aceleración de suelo.

De acuerdo a la fórmula para el Perú, todo los sismos están divididos en normales (h $\leq$ 33 Km) y de foco profundo. Quizás el coeficiente b para h > 33 Km y I $\geq$ 6 contiene errores de imprenta en publicación (comparar Mm para h = 30 y h = 100 en Tabla 5-9), esta es la razón, por la cual para Perú, se utilizó solamente la aproximación h < 33 Km. En Perú, Io = 7 corresponde a M = 5.5 si la profundidad es igual a 10 Km y corresponde a M = 6.8 si h = 20 Km. Las otras aproximaciones dan valores de M mayores que 5.0. Gran parte de los sismos en Argentina están situados a una profundidad de 10 - 30 Km por lo tanto asumiremos que sismos con M $\geq$ 5.0 pueden generar I = 7 y sismos con M $\geq$ 6.0 pueden producir I = 8.

5.7. FORMA Y ORIENTACION DE LAS ISOSISTAS.

Para obtener el modelo de las isosistas tenemos que definir la elongación y orientación de las isosistas. Definiremos a la elongación como El = a/b, donde a es el eje mayor y b el eje menor del modelo eliptico. La orientación del modelo está definido por el azimut predominante AZf de las fallas tectónicas y por un valor aleatorio dAZ el cual es una diferencia entre el azimut AZi del mayor eje y la principal dirección AZf. El intervalo de discretización del azimut es 15°

En Tabla 5-10 se presentan los datos de elongación para cada intensidad.

Tabla 5-10

Año	-Lat	-Long	M	Elongación I=5	I=6	I=7	I=8	I=9
1920	32.7	68.4	6.3	1.53	1.65	1.61	1.09	-
1927	32.4	69.3	6.3	-	-	1.58	2.26	-
1929	34.9	68.0	6.5	-	1.36	1.81	1.42	-
1930	24.7	66.3	6.0	1.48	1.92	1.92	1.41	-
1934	33.7	64.5	6.0	-	1.55	1.31	1.11	-
1936	32.5	65.9	6.2	1.22	1.18	2.13	1.35	-
1941	31.7	67.9	6.7	1.07	1.52	1.64	-	-
1944	31.4	68.4	7.8	-	1.51	1.95	2.35	2.42
1948	24.9	64.8	7.0	-	-	1.33	1.34	-
1952	31.7	68.9	7.0	-	1.40	1.45	1.19	-
1959	23.2	64.7	6.8	-	-	1.21	1.84	-
1966	27.8	67.5	5.0	1.18	1.78	1.95	-	-
1973	24.8	64.6	6.1	1.28	1.20	1.27	-	-
1974	23.3	64.4	5.0	1.53	1.93	1.24	-	-

5.7.1 FORMA DE LAS ISOSISTAS.

Los valores del parámetro **El** varían de 1.1 a 2.4 para todas las magnitudes. Para algunos eventos el valor **El** es menor para las intensidades altas que para las más bajas. Esto puede ser explicado por la presencia de pequeñas áreas isosistas en mapas con escala muy chica utilizados en este trabajo. A continuación se presenta un histograma de valores máximos de **El(I)** para cada evento:

El	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4
< 7			1			3		1	3		1	1		
≥ 7			1	1										1

De la última tabla se observa que el promedio del valor de **El** = 1.8. Este valor será usado en este trabajo para el modelado

de las isosistas.

5.7.2 ORIENTACION DE LAS ISOSISTAS.

En muchos casos, los azimut de los ejes mayores de las distintas isosistas de un evento son diferentes. La isosista correspondiente a la mayor intensidad, representada en un mapa de pequeña escala de un gran territorio, por lo general, tiene una área muy pequeña. Estas isosistas, usualmente, son dibujadas en un mapa como un círculo de pequeño radio, no correspondiendo este hecho a la situación real. La configuración de las isosistas de baja intensidad, en un alto grado depende de los sedimentos cuaternarios y la distribución de la población. El mapa isosista para el sismo de 1934 (Lat -33.7, Long -64.5, M=6.0) ilustra muy claramente tal situación. Por ejemplo, la linea isosista de intensidad V se estrecha al sur del epicentro (ubicado en la sierra de San Luis) a lo largo del Valle de la Pampa Seca, rellenado por depósitos cuaternarios. (Figura 5-5) [27].

Las direcciones de los mayores ejes medidos en los mapas de isosistas, para los sismos considerados en este trabajo, fueron trazados en un mapa tectónico para compararlos con la orientación de las fallas más importantes. (Figura 5-6).

En el mapa tectónico del área investigada, pueden ser distinguidos varios sistemas principales de fallas diferentemente orientadas (ver capítulo 2). La orientación de la mayor parte de las fallas longitudinales corresponden generalmente a zonas de los Andes. Al mismo tiempo hay dos sistemas de fallas transversales con orientación NO-SE y NE-SO respectivamente con alguna variación

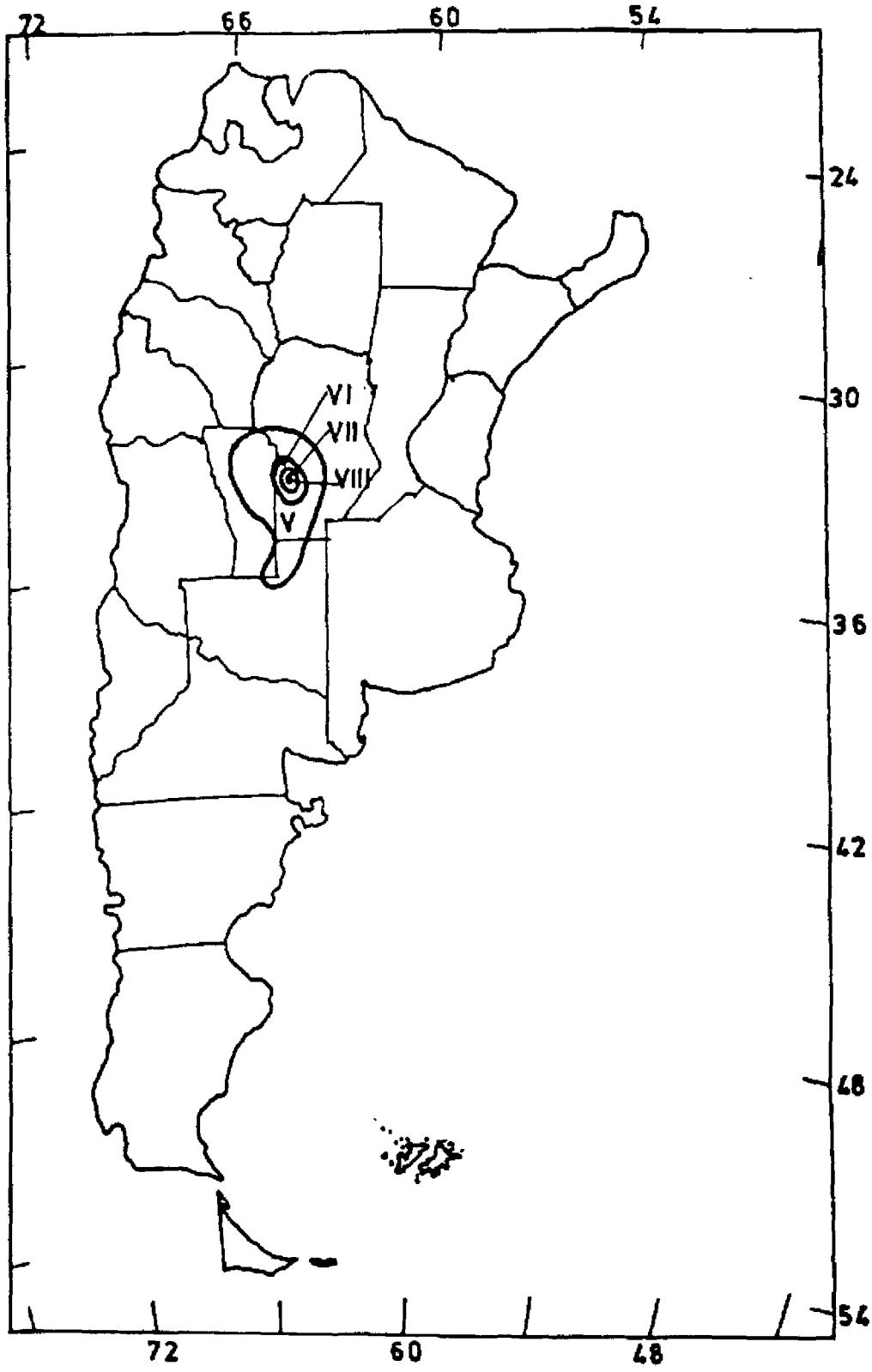


Figura 5-5: Curvas isosistas, sismo 11-6-1934

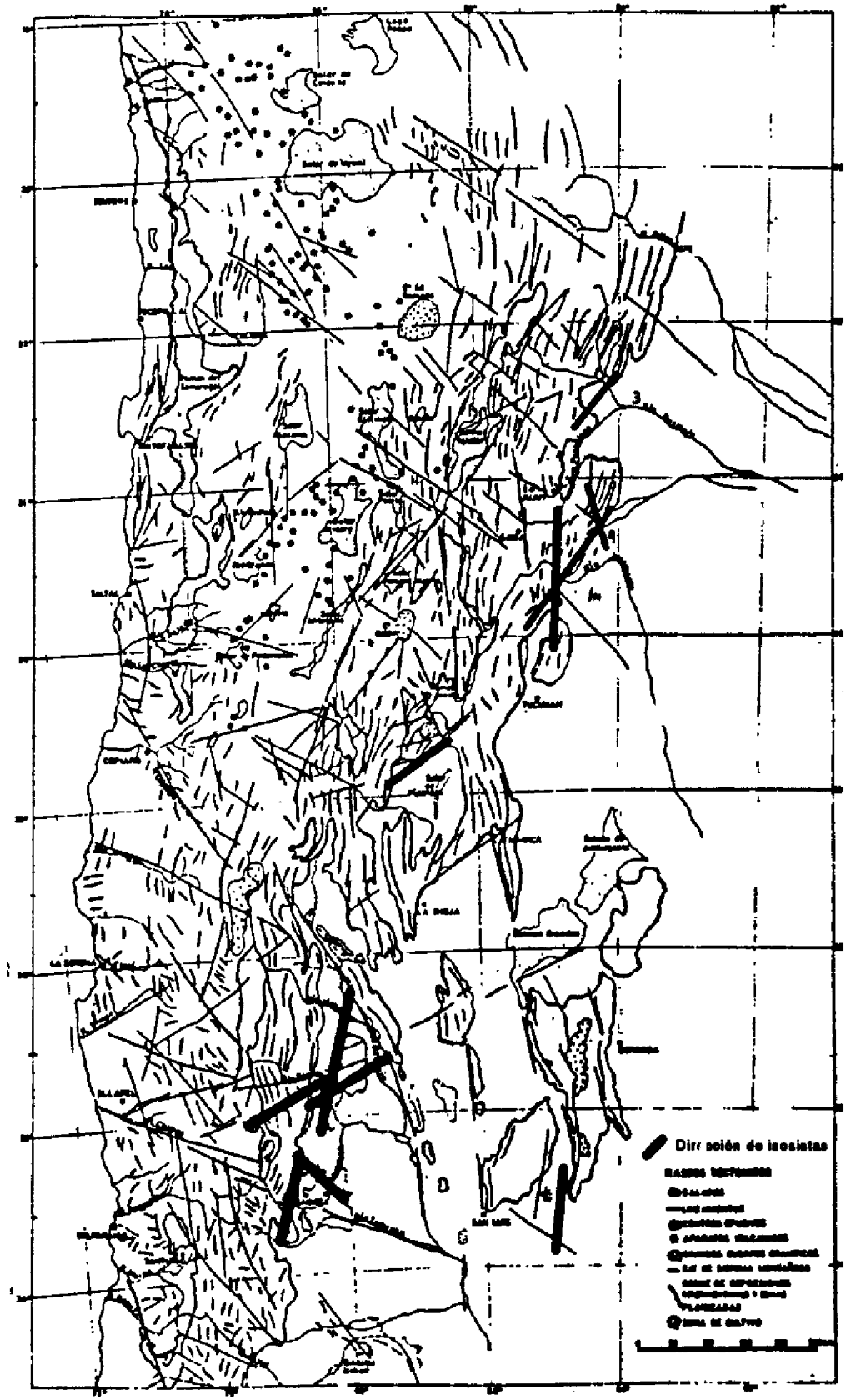


Figura 5-6: Mapa neotectónico.

Se observó que la orientación de gran parte de los ejes mayores de las lineas isosistas, coinciden generalmente con la orientación de las fallas transversales conocidas. Es posible asumir, que las fallas transversales, juegan un importante rol en la generación de sismicidad en esta región.

5.7.2.1 DECISION SOBRE ORIENTACION DE LAS ISOSISTAS.

La Figura 5-4, muestra que todos los datos macrosismicos a nuestra disposición, están concentrados entre dos áreas, a saber: la parte norte de la región bajo estudio (provincias de Salta y Jujuy) y en la parte central (provincia de San Juan, Mendoza y San Luis).

Para sismos con magnitud 5.0 - 6.0, tenemos solo dos eventos con orientación conocida. Para este intervalo usaremos una distribución uniforme de dAZ, puesto que de experiencias obtenidas en trabajos anteriores [7] para sismos con pequeña magnitud los ejes mayores de las isosistas pueden estar orientados en cualquier dirección, dado que estos eventos pueden estar conectados con fallas locales.

Los parámetros usados para $M \geq 6$ se representan en Tabla 5-11 y 5-12.

Para los segmentos de los Andes (reg. 1, 8a, 8b) donde son conocidas grandes fallas NE-SO, usaremos un distribución limitada (1 en Tabla 5-11).

En la parte norte (reg. 2, 3, 4a), las isosistas observadas demuestran dos posibles direcciones, con prevalencia de una de ellas que coincide con las fallas transversales (AZf = 150°)

y algunas variaciones aleatorias a 30° (distribución 3 en Tabla 5-12).

Para la parte central de la zona de estudio, (reg 5, 6a, 6b-1, 6b-2, 6b-3 y 7) tenemos dos direcciones principales, a saber: una orientación aproximada N-S y otra transversal NO-SE, las cuales están claramente representadas por los bloques estructurales del área.

Observaciones adicionales de isosistas demuestran una alta probabilidad de otras direcciones, lo que está en armonía con la complejidad tectónica del área. Se asumió que la probabilidad que tienen los ejes mayores de orientarse a lo largo de cada dirección principal es igual; también se asumió la necesidad de tener en cuenta la posibilidad de otras direcciones (distribución 4 en Tabla 5-12).

En regiones 6c y 9a, tres grupos de isosistas muestran que la dirección principal es AZf = 60° y la dirección adicional es aproximadamente 30° (distribución 5 en Tabla 5-12).

Tabla 5-11

Decisión sobre orientación de isosistas.

Reg.	AZf	F(dAZ)*	Reg.	AZf	F(dAZ)*	Reg.	AZf	F(dAZ)*
1	15	1	6a	15	4	7	15	4
2	150	2	6b-1	15	4	8a	15	1
3	150	2	6b-2	15	4	8b	0	1
4a	150	2	6b-3	15	4	9a	60	5
4b	150	3	6c	60	5	9b	150	3
5	15	4	5	15	4			

* Los números que aparecen en columna F(dAZ) son descriptos en Tabla 5-12.

Tabla 5-12

Distribución de dAZ.

AZi = AZf + dAZ

dAZ	-75	-60	-45	-30	-15	0	+15	+30	+45	+60	+75	+90
1					1	8	1					
2	02	0	0	02	1	25	1	02	02	17	2	1
3				05	2	5	2	05				
4	035	4	04	02	04	4	035	015				015
5			05	3	05	55	05					

CAPITULO 6

ESTIMACION DEL RIESGO SISMICO

En este trabajo se definirá el riesgo sísmico como la probabilidad que tienen las ciudades consideradas en este estudio y sus pobladores de ser afectados por movimientos sísmicos de intensidad VII y VIII, en los próximos 30 años (1992-2022).

Las estimaciones estadísticas de riesgo sísmico presentadas en este capítulo, se basan en una regionalización de la zona bajo estudio y en dos modelos sísmicos: de ocurrencia de sismos y de isosistas. Estos modelos fueron desarrollados para aquellas zonas de Argentina que tienen una actividad sísmica importante.

6.1. CIUDADES Y SU POBLACION.

En Figura 6-1 y Tabla 6-1, se presentan las 17 ciudades capitales, localizadas en la zona sísmicamente activa de Argentina, que se han considerado en este estudio.

Para la estimación, se han tomado dos medidas indirectas del riesgo sísmico:

a) riesgo para las ciudades (en este caso cada ciudad es considerada un punto). Esta medida es independiente de la información demográfica.

b) riesgo para la población de las ciudades. La población de éstas, varía desde: 44.600 a 1.179.100 habitantes. La gran ciudad de Córdoba, que se encuentra dentro de la zona sísmicamente activa, debe ser examinada en forma separada de las otras ciudades dada su elevada población (1.179.100). Por esta razón, se

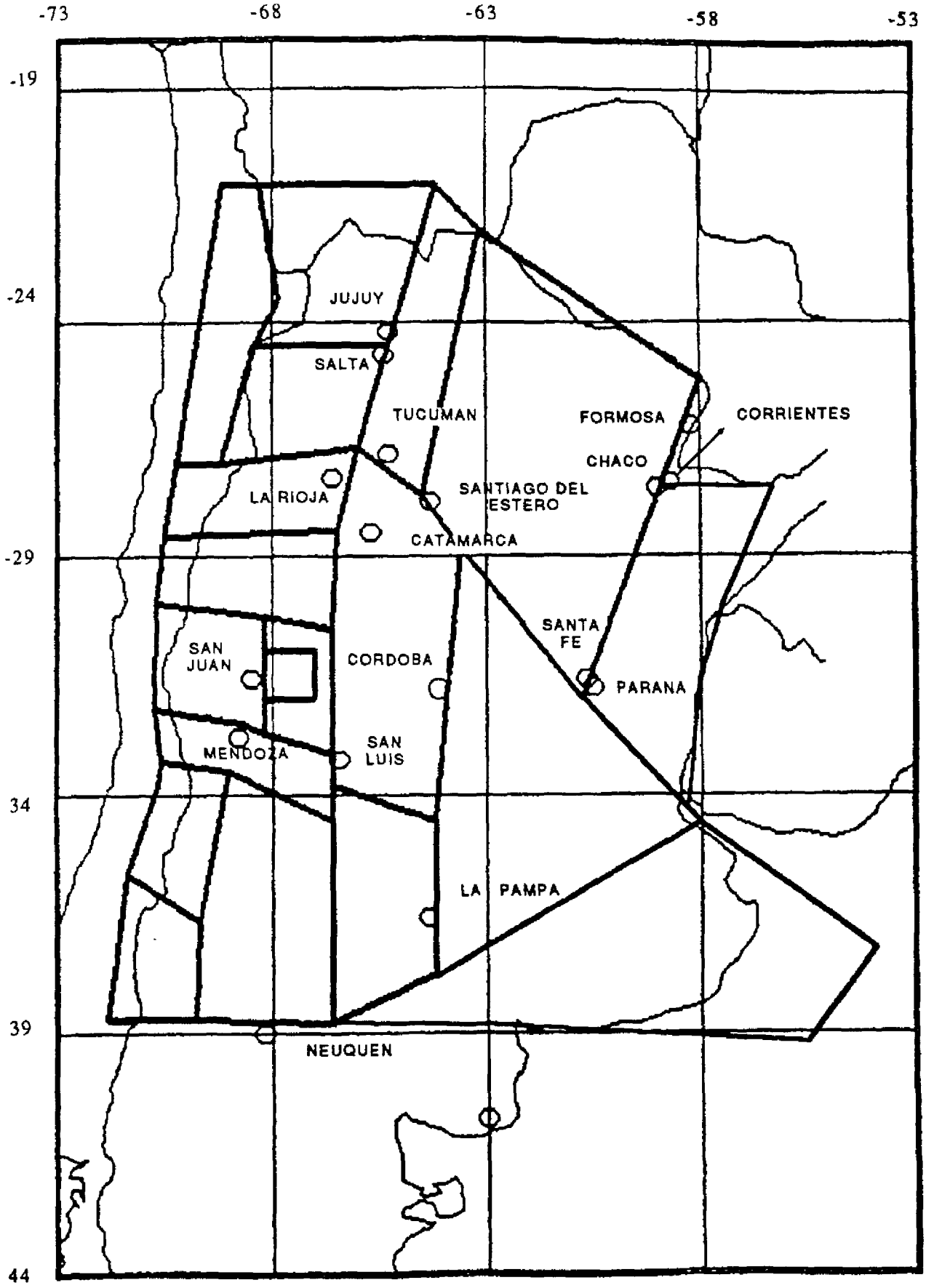


Figura 6-1: Ciudades

suprimió esta ciudad de la lista de objetivos durante la estimacion de riesgo sísmico para la población.

Tabla 6-1

Lista de ciudades.

#	Nombre	Lat S	Long W	Pob1	Pob2	*bet* %
1	Catamarca	28.50	65.70	78.799	110.489	3.2
2	Córdoba	31.45	64.20	993.055	1179.067	1.6
3	Corrientes	27.40	58.70	187.757	267.742	3.4
4	Formosa	26.20	58.20	104.741	165.700	4.3
5	La Pampa (Santa Rosa)	36.60	64.35	54.491	78.057	3.4
6	La Rioja	27.30	66.60	69.504	106.281	4.0
7	Mendoza	32.80	68.80	119.088	121.696	.2
8	Neuquén	39.00	68.20	156.135	265.050	5.0
9	Paraná	31.75	60.50	226.050	277.338	1.9
10	Posadas	27.40	55.80	150.924	219.824	3.6
11	Rawson	43.30	65.20	67.991	100.132	3.7
12	Rio Gallegos	51.60	69.30	56.114	79.033	3.2
13	Salta	24.70	65.40	265.995	373.857	3.2
14	Chaco (Resistencia)	27.50	59.00	231.157	297.646	2.4
15	San Juan	31.60	68.50	118.046	119.399	.1
16	San Luis	33.25	66.45	80.094	121.146	3.9
17	San Salvador de Jujuy	24.20	65.30	167.394	229.520	3.0
18	Santa Fe	31.60	60.65	381.449	442.214	1.4
19	Santiago del Estero	27.80	64.30	164.867	201.709	1.9
20	Tucumán	26.80	65.30	395.373	473.014	1.7
21	Viedma	40.80	63.00	28.350	44.582	4.3
	Total:			4097.374	5273.496	2.4
	Promedio:			195.113	251.119	2.8
	Sin Córdoba:			3104.319	4094.429	2.6

Los datos demográficos han sido obtenidos del último censo nacional realizado el 15 de mayo de 1991. Se cuenta con información para dos fechas: 22 de octubre de 1980 y 15 de mayo de 1991 (columna Pob1 y Pob2 en Tabla 6-1). En columna "*bet*" se presentan los parámetros de dinámica de población para cada ciudad. calculados en un intervalo de tiempo de 10.6 años:

$$Pob2 = Pob1 * \exp(bet * dT)$$

El parámetro *bet* varía entre 0.1 y 5%. Para la estimación, se utilizó el valor común *bet* = 2.6% (ver última línea en Tabla 6-1).

6.2. PARAMETROS COMPUTACIONALES.

El territorio Argentino fue discretizado por una grilla rectangular con intervalos A = 20 Km. El eje x de la retícula fue orientado en dirección N-S. Cada punto de la superficie y cada objetivo (ciudades), fueron asignados al nudo más cercano de la retícula, con un error en aproximación del 3,5%.

Para una mayor adecuación de la grilla utilizada sería necesario, repetir algunos de los cálculos con intervalos A más chicos y con pequeños traslados y rotaciones de la retícula.

El área Q de las isosistas también fue discretizado. El rango de magnitud se dividió en dos intervalos (5.0 - 6.0) y (6.1 - 8.4). Dentro de cada intervalo, las fluctuaciones de los valores posibles de Q para cada I fueron reemplazados por 30 y 50 valores discretos.

6.3. RESULTADOS DE LA ESTIMACION DEL RIESGO SISMICO.

En las siguientes Tablas: 6-2, 6-3, y 6-4 son presentados los principales resultados de la estimación del riesgo sísmico para 17 ciudades y su población.

En Tabla 6-2, se presentan los valores de período de retorno T_I en años para cada ciudad, ordenados en forma decreciente y di-

vididos en tres grupos.

Del análisis de los resultados, las ciudades más vulnerables son: San Juan, Mendoza, Salta, San Salvador de Jujuy, Tucumán y San Luis, con períodos de retorno que van desde T_8 = 240 años para San Juan a 800 años para San Luis. En el segundo grupo se encuentran las ciudades de: La Rioja, Catamarca, Córdoba y Santiago del Estero con T_8 = 1020 años para La Rioja y 5680 años para Santiago del Estero. El tercer grupo esta compuesto por las ciudades de: Resistencia (Chaco), Santa Fe, Formosa, Paraná, La Pampa, Corrientes, Neuquén.

Tabla 6-2

Riesgo sísmico para capitales

CIUDADES	Número Ni de sismos, por 100 años.		Período de retorno T_I [años]	
	I=VIII	I = VII	I=VIII	I=VII
San Juan	0.42	5.0	240	20
Mendoza	0.39	4.2	250	24
Salta	0.23	2.2	440	46
San Salvador	0.18	1.7	560	59
Tucumán	0.14	1.8	690	54
San Luis	0.12	1.8	800	55
La Rioja	0.100	1.20	1020	86
Catamarca	0.064	0.94	1570	110
Córdoba	0.059	0.73	1700	140
Santiago	0.018	0.38	5680	260
Resistencia	0.0033	0.056	30120	1780
Santa Fe	0.0033	0.053	30130	1890
Formosa	0.0022	0.044	46430	2300
Paraná	0.0021	0.039	46670	2560
La Pampa	0.000020	0.00039	49420	2580
Corrientes	0.000019	0.00036	51940	2780
Neuquen	0.000018	0.00096	54860	1040

En Tabla 6-3, se describen los efectos producidos por un

sismo. Los resultados muestran que un promedio de 3 ± 30 mil personas pueden sentir movimientos de intensidad VIII y 4 ± 37 mil de intensidad VII.

Tabla 6-3

Efectos de un sismo para 17 ciudades.

I	Período de retorno para intensidad I	Número de ciudades (Total: 17)			Población de ciudades (16 ciudades) (Total: 4.094.000, sin Córdoba [1000 personas]		
		Promedio	Desv. Std.	N° Max. cdes. afectadas	Promedio	Desv. Std.	N° Max. pob. afectada
VIII	0.92	.016	.130	5	3.06	29.98	1293
VII	0.11	.022	.168	12	4.22	37.46	2780

El riesgo sísmico para los próximos T = 30 años (1992 -2022), se presenta en Tabla 6-4. Los resultados muestran, que las ciudades tienen una probabilidad del 68% de ser afectadas por movimientos de intensidad VIII. Para intensidad I = VII, la situación es bastante diferente, pues la probabilidad de que sean afectadas es del 99,14%. Por otra parte, los sismos pueden generar con una probabilidad del 5% movimientos de intensidades VII en 11 ciudades en los próximos 30 años.

El efecto en la población es el siguiente: 69 ± 122 mil personas podrán ser afectadas por movimientos de I = VIII y 790 ± 441 mil personas por I = VII durante los siguientes 30 años si la dinámica poblacional se mantiene igual a la de los 10 años

precedentes.

Tabla 6-4

Riesgo sísmico para los próximos T = 30 años (1992-2022)

(a) Número de ciudades que pueden ser afectadas por intensidad I

	Número de ciudades			Probabilidad
I	promedio	Desv. stand.	95% quantile	de no ser afectadas.
VIII	0.524	0.753	2	32.09%
VII	6.097	2.798	11	0.14%

(b) Número de pobladores que pueden sentir movimientos de intensidad I (sin tener en cuenta Córdoba).

	miles de personas			probabilidad
I	promedio	dev. stand.	95% quantile	de no ser afectadas.
VIII	69	122	230	49.90%
VII	793	441	1600	0.26%

6.4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

Para una mayor comprensión de las estimaciones de riesgo, es útil entender los efectos generados por diferentes zonas sismotectónicas. En Tabla (6-5) se presenta el número de eventos de cada zona que pueden generar I = VIII para 100 años.

Para la interpretación de los resultados obtenidos, será necesario tener presente que el riesgo sísmico en algunas

ciudades situadas cerca (una de otra), no es independiente. Como medida de dependencia, definiremos la probabilidad condicional de un evento como: "un sismo que produzca movimientos de $I \geq VIII$, afectará dos ciudades bajo la misma condición que afecte a una" [V. Keilis-Borok, lectura en workshop, ICTPI, Trieste, 1983].

En Tabla 6-5 se caracteriza esta dependencia por el valor N_{max}, el cual muestra el gran número de ciudades que pueden ser afectadas por I = VIII producidas por un sismo en cada región. Se observa que un evento puede afectar dos ciudades en gran parte de las zonas activas estudiadas, usando como datos las estimaciones supuestas del modelo de isosista y máxima magnitud en cada región.

El resto de las columnas en Tabla 6-5 nos muestran la probabilidad que tiene cada región de ser afectada por movimientos de I = VIII y finalmente el número promedio de ciudades afectadas para 100 años, estos valores caracterizan la contribución de cada región a los efectos sísmicos comunes considerados.

En Tabla 6-5 se observa que los sismos en las regiones 1 y 8b, no afectan otras ciudades. La misma afirmación es prácticamente correcta para las zonas 6a, 8a, 9a, 9b. Muy diferente es la situación para las regiones 7, 6b1, 6b2 y 5, siendo esta última región la que puede generar el mayor efecto, pues un sismo que ocurra en ella puede afectar 5 ciudades; sin embargo, la actividad sísmica general no es muy alta y su contribución al riesgo común no muy grande.

Por lo tanto, las regiones 7, 6b1, 6b2, 4a y 5 juegan un rol

principal en riesgo sísmico. Sería muy importante continuar estudiando las cuatro primeras regiones para ajustar los modelos sísmicos empleados en este trabajo.

Tabla 6-5

Regiones	Número de eventos 100 años M > 6	N max	Pr{N>0} %	Efecto promedio 100 años
1	54	-	0	-
2	102	2	1.22	.128
3	112	3	1.07	.136
4A	91	2	3.02	.282
4B	28	2	.69	.021
5	41	5	2.24	.095
6A	74	2	.00069	.00005
6B-1	100	3	3.49	.376
6B-2	145	3	.72	.108
6B-3	27	1	.42	.011
6C	92	2	1.89	.174
7	94	3	4.28	.398
8A	60	1	.00038	.00002
8B	16	-	0	-
9A	47	1	.038	.002
9B	3	1	.68	.002

6.5. FUTURAS INVESTIGACIONES.

El principal objetivo en esta dirección, es ajustar los modelos sismológicos utilizados en este estudio para ser aplicados en objetivos particulares. Tales ajustes, pueden estar dados por:

1) verificación de la exactitud de los modelos obtenidos por medio del análisis de las estimaciones del riesgo sísmico con sismos históricos conocidos,
2) analizar el modelo de isosistas, especialmente la orientación

de éstas. Para ello sería necesario aumentar la colección de mapas isosistas, sobre todo aquellos referentes a sismos recientes por tener estos una mayor exactitud,

3) determinación de riesgo sísmico para un número mayor de objetivos tales como: ciudades con población entre 50 y 80 mil personas como así también para poblaciones y villas,
4) repetición de los cálculos con ligeros cambios en los parámetros internos del algoritmo, para verificar la estabilidad de los resultados.

6.7. CONCLUSIONES.

El territorio investigado fue dividido en 12 regiones y en un número de pequeñas subregiones entre las cuales el régimen sísmico puede considerarse como homogéneo.

Los parámetros de la relación frecuencia-magnitud (RFM), fueron obtenidos sobre la base del catálogo sísmico regional. Los valores de b obtenidos varían desde 1.1 a 0.74. Todas las regiones y subregiones son estadísticamente diferentes en el nivel de actividad sísmica.

El modelo de isosista fue diseñado para valores de intensidad en la escala macrosísmica, teniendo en cuenta el efecto de anisotropía de propagación de la onda sísmica y la proximidad y orientación de las isosistas con respecto a las fallas tectónicas importantes. Las direcciones principales de las isosistas fueron la submeridional, NE-SO y NO-SE.

El valor promedio de elongación de las isosistas obtenido es El = 1.8. Para las regiones 2, 3 y 9a, los valores de los paráme-

tros obtenidos de la relación LogQ(M), donde Q = área de las isosistas y M = magnitud, fueron: B = 0.74, A(I=7) = -0.88, A(I=8) = -1.61 y para el resto de las regiones B = 0.95, A(I=7) = -1.54, A(I=8) = -2.37.

Los datos indcan, que sismos con $M \geq 5.0$, pueden generar I = VII y sismos con $M \geq 6.0$, intensidades VIII.

Las ciudades con mayor probablidad de ser afectadas por movimientos de intensidad VII y VIII son: San Juan, Mendoza, Salta, San Salvador de Jujuy y Tucumán, con periodos de retorno que van de $T < 690$ años para intensidad 8 y $T < 54$ años para intensidad 7.

Los datos indican que en los próximos 30 años (1992-2022), con una probabilidad del 68% las ciudades podrán ser afectadas por movimientos de intensidad VIII, mientras que para intensidad VII la probabilidad es del 99.14%. Lo que nos da una idea de la alta exposición a movimientos sísmicos de importancia que tienen las ciudades del noroeste y centro-oeste de Argentina.

En una etapa posterior será necesario repetir los cálculos con ligeros cambios en los parámetros internos del algoritmo, para verificar la estabilidad de los resultados. También se deberán ajustar los modelos sísmicos utilizados en el cálculo, con el objeto de ser empleados posteriormente en problemas particulares tales como: seguros, obras civiles de gran embergadura, planificación y uso de la tierra, etc, temas que cobran una gran importancia en zonas donde el nivel de peligrosidad sísmica es muy elevado, lo que implica un grave problema para la vida y bienes de sus habitantes.

REFERENCIAS.

1. "*A time for action*": World Seismic Safety Initiative, IAEE/IDNDR Committee, 1992.
2. Navarro C.: "*Sismicidad Historica*", INPRES.
3. Kantorovich L.V., Keilis-Borok V.I., Molchan G.M.: " *Seismic risk and principles of seismic zoning*". Translated from Russian, in collection "Seismic design decision analysis". Internal study report 43.V.S. Department of Civil Engineering M.I.T , Cambridge (Mst).1974.
4. Keilis-Borok V.I., Kronrod T.L., Molchan G.M.: "*Algorithm for the estimation of seismic risk*". Translated from Russian, in collection "Seismic design decision analysis". Internal study report N°46, 1974
5. Keilis-Borok V.I., Kronrod T.L., Molchan G.M.: "*Seismic risk for the largest Cities of the World*". The Géneva papers on risk and Insurance, v. 9, N 32, 1984.
6. Keilis-Borok V.I., Molchan G.M., etc.: "*An attempt of the seismic risk estimation for the rural dwellings in Georgia*". In: Logical and computat. methods in seismology. M. Nauka, 1984 (Comput. seismology; Iss.17).
7. Caputo M., Keilis-Borok V.I., etc.: " *Models of earthquake occurence and isoseismals in Italy*". Annaly di Geofisica. 1973, vol. XXVI, N 2-3.
8. Keilis-Borok V.I., Kronrod T.L., Molchan G.M.: "*Seismic risk for the largest Cities of the World (intensity IX)*". Proc. of Symp. of Earth. Prediction, UNESCO, Paris, 1979.
9. Keilis-Borok V.I , Kronrod T. L., Molchan G.M. "*Algorithm*

for the estimation of seismic risk". In the collection "Computational and statistical methods of interpretation of seismic data". Moscow, Nauka, 1973. (Comput. seismology; Iss. 6), pp. 21-43.

10. Alekseevskaya M., Gabrielov A., Gelfand I.: "*Formal Morpho-structural Zoning of Mountain Territories*",1977. Jurnal of Geophysics, vol. 43, pp. 227-233.
11. Gabrielov A., Gvishiani A., Zhidkov M.: "*Formalized Morpho-structural Classification of the Andes Mountain Belt*",1982. In: Computational Seismology, vol. 14. Allerton Press, Inc., New york.
12. Filimonov M , Tumarkin A., Zhidkov M.: "*Recognition of earthquake prone areas in the Andes Mountain belt*", 1992. In: Computational Seismology, vol. 25, Moscow: Nauka, pp. 25-34.
13. "*Catalogo de sismos para América del Sur*". Descripción de el catálogo y reportes nacionales. Volumen 1, 1985, CERESIS.
14. Bollinger G. A., Langer C. J.: "*Development of a Velocity Model for Locating Aftershocks in the Sierra Pie de Palo Region of Western Argentina*". U.S. Geological Survey Bulletin.
15. "*El terremoto de Mendoza*". Argentina, del 26 de enero de 1985. Instituto Nacional de Prevención Sismica, informe general.
16. "*Microzonificacion sismica del Valle de Tulum*", Instituto Nacional de Prevención Sismica, informe técnico generál. Volumen 1.
17. Vinogradov S. D., Miroev K. M., Salomov N. G.: "*Investigation of the Seismic Regime During Fracture of Specimens*". AN

Tadzh. SSR, Dushanbe, 1975.

18. Gutenberg B., Richter C.F.: "*Seismicity of the Earth and associated phenomena*". Second Ed. Priceton Univ. Press, p. 310, 1954.

19. Molchan G.M., Podgaetskaya V.M.: "*Parameters of global seismicity*". In the collection "Computational and statistical methods of interpretation of sismic data". Moscow, Nauka, 1973, pp.44-66.

20. Keilis-Borok V.I., Kronrod T.L., Molchan G.M.: "*Seismic risk for the largest cities of the world*". In the collection: "Mathematical models of the Earth's and the earthquake prediction". Moscow, Nauka, 1981 (Comput. seismology; Iss.14).

21. Kronrod T.L.: "*Seismicity parameters of the main regions of hight seismic activity*". In collection: "Logical and comutat. methods in seismology". M.: Nauka, 1984 (Comput. seismology, Iss. 17)

22. Prozorov A.: "*Effect of an eartquake occurence in the flow intensity of the subsequent events*". PAGEOPH, 1988.

23. Karnik V.: "*Seismicity of the European area*". Praha, 1968.

24. Millan M. H.: "*Evaluación of seismic risk in and around Argentina*", 1983.

25. Hattory S.: "*Regional distribution of b value in the world*" Bul. Intern. Inst. of Seismology and Earth. Eng.,vol 12.1974. pp. 39-57

26. Kronrod T.: "*Seismicity parameters of the main regions of the high seismic activity*". Comput. Seismol., pp. 36-57.

27. Castano J. C.: "*Zonificación sísmica de la República Argentina*". INPRES. Publicación N° 5.