

# CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA FRECUENCIA DE LOS SISMOS EN CARACAS

DR. VÍCTOR SARDI SOCORRO

Trabajo presentado en el Colquio de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales de Venezuela el día 15 de Noviembre de 1968.

El análisis estadístico de los eventos naturales se suele efectuar mediante los dos siguientes métodos como lo hace resaltar el Profesor Arne Jansen<sup>1</sup> al referirse al caso de las marejadas:

- 1º utilizando las observaciones anuales máximas.
- 2º teniendo en cuenta toda la serie de valores observados.

En el presente trabajo se ha preferido usar el primer método aplicando la función aleatoria de valores extremos de Gumbel<sup>2</sup>, también llamada la función de distribución doble exponencial de Gumbel.<sup>3, 4</sup>

$$P = e^{-e^{-y}} \quad (1)$$

En la cual

- P = probabilidad de no ocurrencia
- e = base de los Logaritmos Neperianos
- y = variable reducida de Gumbel.

Si se llama T al tiempo de retorno, se tiene

$$P = 1 - \frac{1}{T} \quad (2)$$

Esta última expresión permite expresar el tiempo de retorno o período de recurrencia en función de la variable reducida, así se obtienen los valores de la siguiente tabla:

TABLA I

T	$P = 1 - \frac{T}{1}$	y
1,01	0,0099	— 1,53
1,05	0,048	— 1,10
1,25	0,200	— 0,48
1,528	0,368	0,00
1,67	0,401	0,09
2,00	0,500	0,37
2,33	0,571	0,58
2,50	0,600	0,67
3,33	0,700	1,03
4,00	0,750	1,25
5,00	0,800	1,50
10,00	0,900	2,25
20,00	0,950	2,97
25,00	0,960	3,20
50,00	0,980	3,90
100,00	0,990	4,60
200,00	0,995	5,30
403,00	0,9975	6,00
500,00	0,9980	6,21
1000,00	0,9990	6,91

La variable reducida  $y$  es una cantidad adimensional que corrientemente corresponde a una expresión lineal de los valores extremos  $x$

$$x = ay + b \quad (3)$$

Los parámetros  $a$  y  $b$  pueden determinarse por mínimos cuadrados, o gráficamente mediante una recta promedia trazada a sentimiento en papel de probabilidad Gumbel Powel<sup>4</sup>, el cual es una cuadrícula en las que las ordenadas representan las  $x$  en escala natural y las abscisas la variable reducida  $y$ .

Cuando las observaciones abarcan un cierto tiempo  $n$  si se designa con  $m$  el orden de magnitud de cada evento, dándole al mayor el orden 1; el tiempo de retorno  $T$  viene dado por la siguiente fórmula:

$$T = \frac{n + 1}{m} \quad (4)$$

Lo expuesto puede considerarse como un resumen del método general de Gumbel aplicable a valores extremos.

A continuación se aplica el sistema al caso de los sismos de Caracas.

Se ha partido de los datos consignados en la obra del Dr. Melchor Centeno-Graü, titulada "Estudio Sismológico".<sup>5</sup>

Según el referido autor desde 1802 hasta 1939 han ocurrido los siguientes sismos por cada año:

Temblores los años 1811, 1849, 1861, 1867, 1868, 1871, 1872, 1873, 1876, 1897, 1901, 1902, 1903, 1904, 1905, 1906, 1908, 1910, 1911, 1912, 1913, 1914, 1917, 1918, 1924, 1929, 1931, 1935; fuertes temblores en 1802, 1837, 1838, 1854, 1862, 1865, 1866, 1869, 1870, 1874, 1877, 1879, 1880, 1881, 1882, 1883, 1884, 1885, 1886, 1887, 1888, 1889, 1891, 1892, 1893, 1894, 1896, 1898, 1899, 1907, 1915, 1916, 1921, 1922, 1933; fortísimos temblores en 1890 y 1895; Terremotos en 1812, 1878 y 1900\*.

Según se tienen noticias ha habido, después de 1939, tres fuertes temblores en 1963, 1964 y 1960 los que sumados al terremoto de 1967 dan un total de 72 años en los que hubo por lo menos un sismo de intensidad igual o mayor a la de un simple temblor en la zona de Caracas.

En el catálogo de sismos que por orden cronológico trae la citada obra del Dr. Centeno-Graü, aparecen años en los cuales ocurrieron muchos sismos en Caracas; por ejemplo, en 1901 se señalan 139 temblores, 65 en 1866 y en 1877 26 movimientos de tierra apreciables. Como ya se dijo, en el presente trabajo sólo se ha considerado un sólo movimiento sísmico por año en que los hubo, de acuerdo con la teoría de los valores extremos.

En resumen, de los 72 sismos, 4 corresponden a terremotos, 2 a fortísimos temblores, 38 a fuertes temblores y 28 a temblores.

Con ayuda de la Fig. 1 y de las descripciones que de los respectivos eventos se hace en la obra citada del Dr. Centeno-Graü, se han adoptado las siguientes magnitudes para los sismos:

\* Aun cuando "temblor de tierra" y "terremoto" son sinónimos, siguiendo la costumbre común en Venezuela y otros países de habla hispana, en el presente estudio se entiende como terremoto a los movimientos violentos e impetuosos de la tierra y como temblores aquellos otros que poco o ningún daño provocan.

	M
Terremoto de 1812	7,0
" " 1967	6,7 a 6,3
" " 1900	6,3
" " 1878	6,0
Fortísimos temblores de 1890 y 1895	5,8 y 5,6
Fuertes temblores y temblores	entre 5,5 y 3,7

La gama de movimientos sísmicos catalogados como Temblores y Fuertes Temblores constituyen 66 casos cuyas magnitudes debieron estar comprendidas entre 5,5 y 3,7. No disponiendo de mayores datos para clasificarlos se supuso una distribución lógica de tipo triangular en la cual los sismos de menor intensidad tuviesen una mayor frecuencia.

Suponiendo una variación discreta de décima en décima para las magnitudes comprendidas entre las más arriba citadas, se llega al cuadro de la Tabla III; con esos guarismos y los correspondientes a terremotos se ha preparado la Tabla IV en cuya primera columna aparece el número de orden de los eventos, según magnitudes descendentes; en la segunda columna los tiempos de retorno; en la tercera los correspondientes valores de la variable reducida de Gumbel; en la cuarta la magnitud  $x$  de los eventos. En las columnas quinta y sexta los valores de  $xy$  y de  $y^2$  necesarios para establecer las ecuaciones normales del método de cuadrados mínimos. La séptima columna contiene los valores de las magnitudes  $x_0$  calculados de acuerdo con la ley de variación determinada por mínimos cuadrados. La octava y novena columnas las diferencias  $(x_0 - x)$  y estos valores al cuadrado.

En el gráfico de la Fig. 2 se representa en papel de Gumbel-Powel la magnitud de los 72 eventos considerados en función de su frecuencia.

Como se puede observar la sucesión de puntos representativos muestran muy poca dispersión con respecto a la recta determinada por mínimos cuadrados y cuya ecuación es la siguiente:

$$x = 0,73 y + 3,27 \quad (5)$$

que proviene de la solución del siguiente sistema de ecuaciones normales

$$\begin{aligned} \sum x &= a \sum y + n b \\ \sum xy &= a \sum y^2 + b \sum y \end{aligned} \quad (6)$$

en las cuales los valores de  $\sum x$ ,  $\sum y$ , etc., se toman de la Tabla IV.

Aplicando la ecuación (5) se obtienen los siguientes valores:

T	y	x
2	0,37	3,54
50	3,90	6,12
100	4,60	6,63
200	5,30	7,14
1000	6,91	8,31

Coeficiente de correlación

$$r = \frac{n \sum xy - \sum y \sum x}{\sqrt{[n \sum y^2 - (\sum y)^2] [n \sum x^2 - (\sum x)^2]}}$$

$$r = \frac{72 \times 590,96 - 120,26 \times 323,90}{\sqrt{[72 \times 269,04 - 14462,47] [72 \times 1439,77 - 104911,21]}}$$

$$r = 0,999166$$

$$r^2 = 0,998333$$

"Test" de Student

$$t = \sqrt{\frac{r^2 (n - 2)}{1 - r^2}}$$

$$t = \sqrt{\frac{0,998333 (72 - 2)}{1 - 0,998333}}$$

$$t = 204,75$$

Según las tablas de distribución de los valores de t (6) la probabilidad asociada para  $t = 204,75$  y 70 grados de libertad es mucho menos que 0,001, luego el valor de  $r$  es muy significativo.

El error standard vale

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_0 - x)^2}{n}} = \sqrt{\frac{0,1810}{72}} = 0,05$$

Además de la señalada en la Tabla III se ensayaron otras distribuciones, siempre bajo la hipótesis de una mayor frecuencia para las bajas magnitudes, pero todas las ensayadas dieron mayor dispersión e incongruencia con los valores de los terremotos habidos que la distribución adoptada.

Como puede observarse en la Tabla III los 28 temblores de menor intensidad corresponden a valores de la magnitud de esos sismos entre 4,1 y 3,7 de la escala de Richter y los 38 fuertes temblores entre 5,5 y 4,2 lo cual corresponde a la clasificación de esos eventos. (Ver Tabla II y Fig. 1). Esta circunstancia aboga también en favor de la distribución adoptada.

El método de los valores extremos para el caso de sismos ha sido usado por diversos autores y recientemente por W. G. Milne y A. G. Davenport para una zona del Canadá<sup>10</sup> y por I. D. Dick<sup>9</sup> para Nueva Zelanda.

Es interesante notar que la curva de frecuencia determinada por Milne y Davenport para la región Sur de la Columbia Británica en el Canadá, es prácticamente paralela a la determinada en este estudio para la zona de Caracas, pero con magnitudes sísmicas correspondientes mayores en un 6%.

Esto parece indicar que la distribución en el tiempo de los sismos tanto en Caracas como en aquella zona del Canadá es semejante, difiriendo sólo en la intensidad de ellos.

Dadas todas las limitaciones del método expuesto y la incertidumbre de los datos es conveniente señalar también que los períodos de retorno a que conduce el análisis de frecuencia efectuado "indica sólo el *intervalo medio* entre sucesos iguales o mayores que una magnitud dada"<sup>12</sup> y "los períodos de retorno reales pueden ser sustancialmente inferiores que la media para un suceso dado".

La probabilidad J de que un suceso ocurra en cualquier período q de años, es

$$J = 1 - \left( \frac{T - 1}{T} \right)^q$$

en la cual, T es el tiempo de retorno medio.

Así por ejemplo: un terremoto de magnitud 6,7 como se ha supuesto para el sismo que ocurrió en Caracas el 29 de julio de 1967 cuyo tiempo de

retorno medio es, en números redondos según el gráfico de la Fig 2, de 100 años; tiene un 64% de probabilidad de ocurrir en 100 años, 40% en 50 años, 18% en 20 años, 10% en 10 años y 1% en un año.

## TABLA N° II

### ESCALA DE MERCALI

modificada por Wood y Neumann  
tomada de Kulik, referencia (7)

- I Percibido por muy pocas personas en circunstancias especialmente favorables.
- II Percibido por pocas personas en quietud, especialmente, en los pisos superiores de los edificios. Los objetos suspendidos pueden oscilar.
- III Percibido claramente en el interior de las casas, sobre todo, en los pisos superiores; muchas personas no lo reconocen como temblor. Automóvil parado puede moverse algo. La sacudida es similar a la producida por un camión. La duración puede ser estimada.
- IV Durante el día es percibido por muchas personas dentro y por pocas fuera de las casas. De noche algunas personas se despiertan. Platos, puertas, ventanas se mueven; paredes desprenden un crujido. Sensación similar al choque de un camión pesado contra un edificio. Un automóvil parado se mueve notablemente.
- V Percibido por casi todas las personas; muchas se despiertan. Algunos platos, ventanas, etc., se rompen, se agrieta el revoque; se vuelcan los objetos inestables. A veces se nota el movimiento de árboles, postes y otros objetos altos. Relojes de péndulas se paran.
- VI Percibido por todos; muchas personas abandonan sus casas con espanto. Se mueven algunos muebles pesados, cae el rovoque, se dañan las chimeneas. Perjuicios leves de los edificios.
- VII Todas las personas abandonan las casas. Daños sin importancia en los edificios bien proyectados y de buena construcción; leves hasta moderados, en buenas construcciones comunes; considerables en mal cons-

truidos y mal proyectados. Algunas chimeneas se destruyen. Las personas que viajan en automóviles notan el sismo.

- VIII Leves daños en los edificios asísmicos; considerables en los edificios comunes, algunos de éstos se derrumban; muy grandes en construcciones de pobre ejecución. Paños de mampostería se desprenden del esqueleto; se derrumban las chimeneas de casas y fábricas, columnas, monumentos, paredes. Muebles pesados se vuelcan. Se producen algunas erupciones de arena y barro y cambios en el nivel del agua de los pozos. Personas que viajan en automóvil se sienten perturbadas.
- IX Daños importantes en los edificios especialmente proyectados; bien proyectadas estructuras aporticadas quedan fuera de plomo; grandes perjuicios en los edificios en general, algunos se derrumban. Edificios se levantan de sus fundaciones. Se producen grandes rajaduras en el suelo; se rompen las cañerías subterráneas.
- X Se destruyen algunos edificios de madera bien construídos; la mayoría de los edificios de mampostería y aporticados se destruye en sus fundaciones; el suelo se raja notablemente. Los rieles se doblan. Se producen considerables deslizamientos del suelo en las riberas y barrancas. Erupciones de arena y barro. El agua se lanza sobre la ribera.
- XI Pocos o ningún edificio de mampostería queda en pie. Se destruyen los puentes. Se forman anchas grietas en el suelo. La cañería subterránea queda completamente inutilizada para el servicio. Se produce el hundimiento y deslizamiento de los suelos blandos. Los rieles se doblan en mayor grado.
- XII Destrucción total. Se notan ondas en la superficie del suelo. Se observa la deformación horizontal y vertical del suelo. Los objetos son lanzados del suelo al aire.



TABLA III

5,5					
5,4					
5,3					
5,2	5,2				
5,1	5,1				
5,0	5,0				
4,9	4,9	4,9			
4,8	4,8	4,8			
4,7	4,7	4,7			
4,6	4,6	4,6			
4,5	4,5	4,5	4,5		
4,4	4,4	4,4	4,4		
4,3	4,3	4,3	4,3		
4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	
4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	
4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	
3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7

m	Tr	y	x	xy	y <sup>2</sup>	x <sup>2</sup>	x <sub>0</sub>	x <sub>0</sub> -x	(x <sub>0</sub> -x) <sup>2</sup>
1	166	5,10	7,0	35,70	26,01	49,00	6,99	-0,01	0,0001
2	83	4,40	6,7	29,48	19,36	44,89	6,48	-0,22	0,0484
3	55	4,00	6,3	25,20	16,00	39,69	6,19	-0,11	0,0121
4	41	3,70	6,0	22,20	13,69	36,00	5,97	-0,03	0,0009
5	33	3,50	5,8	20,30	12,25	33,64	5,83	+0,03	0,0009
6	28	3,30	5,6	18,48	10,89	31,36	5,68	0,08	0,0064
7	24	3,15	5,5	17,33	9,92	30,25	5,57	0,07	0,0049
8	21	3,04	5,4	16,42	9,24	29,16	5,49	0,09	0,081
9	18	2,88	5,3	15,26	8,29	28,09	5,37	0,07	0,0049
10	17	2,80	5,2	14,56	7,84	27,04	5,31	0,11	0,0121
11	15	2,68	5,2	13,94	7,18	27,04	5,23	0,03	0,0009
12	14	2,60	5,1	13,26	6,76	26,01	5,17	0,07	0,0049
13	13	2,52	5,1	12,85	6,35	26,01	5,11	0,01	0,0001
14	12	2,45	5,0	12,25	6,00	25,00	5,06	0,06	0,0036
15	11	2,36	5,0	11,80	5,57	25,00	4,99	-0,01	0,0001
16	10	2,25	4,9	11,03	5,06	24,01	4,91	0,01	0,0001
17	9,8	2,24	4,9	10,98	5,02	24,01	4,91	0,01	0,0001
18	9,2	2,18	4,9	10,68	4,75	24,01	4,86	-0,04	0,0016
19	8,7	2,10	4,8	10,08	4,41	23,04	4,80	0,00	0,0000
20	8,3	2,05	4,8	9,84	4,20	23,04	4,77	-0,03	0,0009
21	7,9	2,00	4,8	9,60	4,00	23,04	4,73	-0,07	0,0049
22	7,6	1,95	4,7	9,17	3,80	22,09	4,69	-0,01	0,0001
23	7,2	1,90	4,7	8,93	3,61	22,09	4,66	-0,04	0,0016
24	6,9	1,89	4,7	8,88	3,57	22,09	4,65	-0,05	0,0025
25	6,6	1,81	4,6	8,33	3,28	21,16	4,59	-0,01	0,0001
26	6,4	1,79	4,6	8,23	3,20	21,16	4,58	-0,02	0,0004
27	6,2	1,72	4,6	7,91	2,96	21,16	4,53	-0,07	0,0049
28	5,9	1,70	4,5	7,65	2,89	20,25	4,51	0,01	0,0001
29	5,7	1,65	4,5	7,43	2,72	20,25	4,47	-0,03	0,0009

7671 14070 40777 21000 70050 447 0,003 0,0009 0,0001

CONTINUAÇÃO DE HA TABELA 14.1

m	Tr	y	x	xy	y <sup>2</sup>	x <sup>2</sup>	x <sub>0</sub>	x <sub>0</sub> -x	(x <sub>0</sub> -x) <sup>2</sup>
30	5,5	1,61	4,5	7,25	2,59	20,25	4,45	-0,05	0,0025
31	5,3	1,60	4,5	7,20	2,56	20,25	4,44	-0,06	0,0036
32	5,2	1,55	4,4	6,82	2,40	19,36	4,40	0,00	0,0000
33	5,0	1,50	4,4	6,60	2,25	19,36	4,37	-0,03	0,0009
34	4,9	1,48	4,4	6,51	2,19	19,36	4,35	-0,05	0,0025
35	4,7	1,42	4,4	6,25	2,02	19,36	4,31	-0,09	0,0081
36	4,6	1,40	4,3	6,02	1,96	18,49	4,29	-0,01	0,0001
37	4,5	1,38	4,3	5,93	1,90	18,49	4,28	-0,02	0,0004
38	4,4	1,35	4,3	5,81	1,82	18,49	4,26	-0,04	0,0016
39	4,3	1,32	4,3	5,68	1,74	18,49	4,23	-0,07	0,0049
40	4,2	1,30	4,2	5,46	1,69	17,64	4,22	0,02	0,0004
41	4,1	1,28	4,2	5,38	1,64	17,64	4,20	-0,02	0,0004
42	4,0	1,25	4,2	5,25	1,56	17,64	4,18	-0,04	0,0016
43	3,9	1,22	4,2	5,12	1,49	17,64	4,16	-0,04	0,0016
44	3,8	1,20	4,2	5,04	1,44	17,64	4,15	-0,05	0,0025
45	3,7	1,18	4,1	4,84	1,39	16,81	4,13	0,03	0,0009
46	3,6	1,12	4,1	4,59	1,25	16,81	4,09	-0,01	0,0001
47	3,5	1,10	4,1	4,51	1,21	16,81	4,07	-0,03	0,0009
48	3,5	1,10	4,1	4,51	1,21	16,81	4,07	-0,03	0,0009
49	3,4	1,06	4,1	4,35	1,12	16,81	4,04	-0,06	0,0036
50	3,3	1,02	4,0	4,08	1,04	16,00	4,01	0,01	0,0001
51	3,2	1,00	4,0	4,00	1,00	16,00	4,00	0,00	0,0000
52	3,2	1,00	4,0	4,00	1,00	16,00	4,00	0,00	0,0000
53	3,1	0,96	4,0	3,84	0,92	16,00	3,97	-0,03	0,0009
54	3,1	0,96	4,0	3,84	0,92	16,00	3,97	-0,03	0,0009
55	3,0	0,91	3,9	3,55	0,83	15,21	3,93	0,03	0,0009
56	3,0	0,91	3,9	3,55	0,83	15,21	3,93	0,03	0,0009
57	2,9	0,88	3,9	3,43	0,77	15,21	3,91	0,01	0,0001
58	2,9	0,88	3,9	3,43	0,77	15,21	3,91	0,01	0,0001
		110,65	171,10	554,61	767,23	1204,57			0,1664

Continuación de la Tabla N° IV

m	Tr	y	x	xy	y <sup>2</sup>	x <sup>2</sup>	x <sub>0</sub>	x <sub>0</sub> -x	(x <sub>0</sub> -x) <sup>2</sup>
59	2,8	0,81	3,9	3,16	0,66	15,21	3,86	-0,01	0,0016
60	2,8	0,81	3,9	3,16	0,66	15,21	3,86	-0,04	0,0016
61	2,7	0,78	3,8	2,96	0,61	14,44	3,84	0,04	0,0016
62	2,7	0,78	3,8	2,96	0,61	14,44	3,84	0,04	0,0016
63	2,6	0,72	3,8	2,74	0,52	14,44	3,80		
64	2,6	0,72	3,8	2,74	0,52	14,44	3,80		
65	2,6	0,72	3,8	2,74	0,52	14,44	3,80		
66	2,5	0,67	3,8	2,55	0,45	14,44	3,76	-0,04	0,0016
67	2,5	0,67	3,7	2,48	0,45	13,69	3,76	0,06	0,0036
68	2,4	0,61	3,7	2,26	0,37	13,69	3,72	0,02	0,0004
69	2,4	0,61	3,7	2,26	0,37	13,69	3,72	0,02	0,0004
70	2,4	0,61	3,7	2,26	0,37	13,69	3,72	0,02	0,0004
71	2,3	0,55	3,7	2,04	0,30	13,69	3,67	-0,03	0,0009
72	2,3	0,55	3,7	2,04	0,30	13,69	3,67	-0,03	0,0009
		120,26	323,90	590,96	269,04	1493,77			0,1816

## BIBLIOGRAFIA

1. Jensen, Arne: Profesor de la Universidad de Copenhague "Problemes de probabilité et decision en connexion avec les raz de marée". Colloque sur l'application du calcul des probabilités. Centre National de Recherche Scientifique, París. 1959.
2. Gumbel, E. J. "Statistical Theory of Extreme Values and some practical Applications". Natl. Bur. Standard (U. S.) Appl. Math. Series 33 - Febrero 1954, Washington D. C.
3. Schmidt, Karsten, Profesor de la Universidad de Copenhague "Evaluation of failure risk for dikes exposed to storm surges". Publicación del Instituto de Estadística Matemática e Investigaciones Operacionales de la Universidad Técnica de Dinamarca.
4. Sardi S., Víctor. "Contribución al Estudio de las Frecuencias de Crecientes Máximas en los Ríos del Norte de Venezuela". Boletín de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales de Venezuela - Año XXVII - Tomo XXVII - N° 76, Tercer Trimestre 1967.
5. Centeno-Graü, Melchor. "Estudios Sismológicos", Caracas.
6. Fisher, R. A. y Yates, F. "Tablas estadísticas para Investigadores Científicos". Aguilar, Madrid, 1963.
7. Kulik, Juan. "Fundaciones de los Edificios Asísmicos". Revista del Centro Argentino de Ingenieros "La Ingeniería", Nos. 855, 856 y 857, Buenos Aires, 1946.
8. Gutenberg, B. y Rickter C. F. "Seismicity of the Earth and Associated Phenomena" Princeton University Press 1949.
9. Dick, I. D. "Extreme Value Theory and Earthquakes". Proceedings of the Third World Conference on Earthquakes Engineering - New Zealand, 1965.
10. Milne, W. G. y Davenport A. G. "Statistical Parameters Applied to Seismic Regionalization". Proceedings of the Third World Conference on Earthquakes Engineering - New Zealand, 1965.
11. Gumensky, D. B. "Earthquakes and Earthquake - Resistant Design" del Manual de Robert W. Abbet "American Civil Engineering Practice". Vol. III, Hohn Willey and Sons, Inc. New York, 1957.
12. Linsley - Kohler - Paulhus "Hidrología para Ingenieros". Ediciones del Castillo, S. A. - Madrid, 1967.