OBSERVACIONES DE DAÑO CORRESPONDIENTES AL TERREMOTO DE IRPINIA (ITALIA) DE 1980. PARTE I: DISTRIBUCION DE DAÑOS Y ESTUDIO DE PARAMETROS DE DAÑO POTENCIAL.

L. Cabañas[1], B. Benito[1], J. Chávez[2], X. Goula[2], T. Roca[2], F. Sabetta[3] y D. Rinaldis[3].

1. E.U.I.T. Topográfica. Universidad Politécnica de Madrid.
2. Servei Geologic. ICC. Barcelona.
3. Servizio Sísmico Nazionale. SSN. Italia.

RESUMEN

Los datos analizados en este estudio, facilitados por el SSN de Italia, son resultado de la inspección de edificios puesta en marcha por el gobierno italiano inmediatamente después del terremoto de Irpinia del 23/11/1980 (Ms = 6.9), y corresponden a observaciones de daño en más de 32000 edificios distribuidos en 41 municipios de la zona afectada. Tras un análisis previo de los mismos, encaminado a obtener las distribuciones de daño y su comportamiento en el área considerada, se han evaluado algunos parámetros del movimiento del suelo (aceleración máxima, velocidad máxima, velocidad absoluta acumulada e intensidad de Arias) con el fin último de determinar cuáles de éstos son los que explican mejor el daño ocurrido, y pueden ser considerados mejores indicadores de la severidad o destructividad del terremoto. Se han examinado las relaciones de estos parámetros con los grados de daño observado, tratando de buscar valores umbrales en cada uno de ellos, que indiquen el comienzo de un nivel de daño fuerte, para distintos tipos de edificios.

INTRODUCCION

La evaluación e interpretación del daño causado por terremotos, es un problema antiguo en ingeniería sismológica, que suele generalmente dividirse en cuatro problemas de carácter inverso, en los que el daño puede ser interpretado como un indicador de la intensidad sísmica, como un revelador de fenómenos locales en el emplazamiento, como una medida de la vulnerabilidad o bien como un medio de obtener "lecciones aprendidas".
En el presente trabajo, se han analizado datos de daños producidos por el terremoto de Irpinia (Italia) del 23/11/1980, y a partir de ellos y de los registros acelerométricos existentes, se ha estudiado, por una parte la vulnerabilidad sísmica de los edificios de la zona afectada, y por otra, la destructividad, o severidad sísmica de dicho evento en cada lugar, a partir de la evaluación de determinados parámetros de movimiento (pga, pgv, cav, ia), para los que se han tratado de cuantificar umbrales de comienzo del daño.

DATOS UTILIZADOS

El terremoto de Irpinia, tuvo una magnitud Ms=6.9. Los estudios posteriores de su mecanismo[1,2] dan una función temporal de la fuente compuesta por un evento principal y 2 subeventos aproximadamente a 20 y 40 segundos del primero. El evento principal tiene un Mo=2.6 x 10^{19} Nm, producido por un mecanismo de falla normal casi puro (dip-slip) con rumbo 305-330 y buzamiento 53-63 (en dirección NE). La profundidad del hipocentro se situó entre 8 y 13 km, y se observaron rupturas en superficie de aproximadamente 15 km (fallas Marzano y S. Gregorio) y 20 km (fallas Carpineta y Picenti).
A partir de la inspección de daños inicial del GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti), una primera evaluación de la intensidad macrosísmica, dio para la zona epicentral Io=X (MSK), siendo reducida a Io=VIII (MSK) tras una revisión posterior[3,4]. Los datos de

daño utilizados proceden de observaciones en edificios para usos de vivienda, pertenecientes a 41 municipios de la zona afectada, clasificados en 15 tipos de estructuras (ver tabla 1) y 8 niveles de daño (desde 1-no daño hasta 8-destrucción total). El total de observaciones asciende a 32537 edificios, siendo el mínimo y máximo de observaciones por municipio de 122 y 2130 respectivamente. Por tipos de estructura, el más numeroso es el 2 (estructura vertical de piedra natural, estructuras horizontales de madera), con 8996 observaciones.
Por otra parte, también han sido utilizados datos de movimiento fuerte correspondientes a 17 de las 19 estaciones acelerométricas del ENEA-ENEL, dotadas de instrumentos analógicos SMA-1, que registraron el terremoto.

Tabla I

TIPOS DE ESTRUCTURAS Y NUMERO DE OBSERVACIONES

ESTR. VERTICAL / *ESTR. HORIZONTAL*	*PIEDRA*	*SILLAR*	*FABRICA de LADRILLO*	*H. ARMADO*
BOVEDAS	**1** 1540	**5** 617	**9** 17	-
MADERA	**2** 8996	**6** 3322	**10** 137	-
ACERO	**3** 5375	**7** 2584	**11** 535	-
H. ARMADO (1-3)	**4** 945	**8** 3555	**12** 819	**13** 3186
H. ARMADO (4-6)	-	-	-	**14** 869
H. ARMADO (>6)	-	-	-	**15** 40

DISTRIBUCIONES DE DAÑO

Un primer análisis de las frecuencias observadas en cada nivel de daño (1-8) y para cada tipo de edificio (1-15), en cada uno de los municipios afectados, muestra la variedad de distribuciones de daño y también las diferencias de tipos constructivos existente entre unos municipios y otros. Por ello, aunque la clasificación inicial dada (15 tipos y 8 niveles de daño) supone una clasificación de vulnerabilidad más fina, la muestra es también más heterogénea. Cabe entonces, estudiar el comportamiento de un tipo determinado de edificio individualmente, o bien agrupar los 15 tipos en clases de vulnerabilidad A, B, C, D, etc. y en 5 niveles de daño según la escala EMS-92. Esta 2ª opción es más ventajosa, ya que de esta manera los datos pueden ser analizados desde un enfoque sismológico más apropiado, y por otra parte supone estadísticamente una homogeneización de la muestra. La agrupación realizada tanto para tipos de edificios, como para niveles de daño es una de las propuestas por *Braga et al.*[3,4] y está resumida en la tabla 2.

Tabla II

CONVERSION DE TIPOLOGIAS DE EDIFICIOS Y NIVELES DE DAÑO

TIPOS DE EDIFICIOS		**TOTAL**	**NIVELES DE DAÑO**	
GNDT	EMS-92		GNDT	EMS-92
T1,T2,T5,T6,T9,	A	14492	1	0
T3,T7	B	7959	2-3	1
T4,T8,T10,T11,T12,T13	C	9177	4-5	2
T14,T15	Posible D (no utilizados)	909	6	3
			7	4
			8	5

Con esta nueva clasificación se han obtenido las distribuciones condicionadas del daño para los tipos A, B, C, es decir la matriz de daños de cada uno de los municipios. Las frecuencias de estas distribuciones condicionadas se han representado sobre un mapa de la zona para mostrar la extensión y distribución geográfica del daño. En la figura 1 se muestran los mapas correspondientes a los niveles de daño acumulado $D \geq 3$ y $D \geq 4$ para cada uno de los tipos A, B, C . Puede observarse en ellos como la zona de máximo daño se sitúa en un núcleo en torno a la zona norte de las trazas de falla representadas. Se destaca también, una disminución notable

de zonas dañadas según se pasa del tipo A al C, siendo mayor esta disminución en el caso de D≥4. Las frecuencias máximas alcanzadas para estos 2 niveles de daño y tipos A, B y C son respectivamente, 70%, 40% y 15% para D≥3 y 60%, 25% y 8% para D≥4.

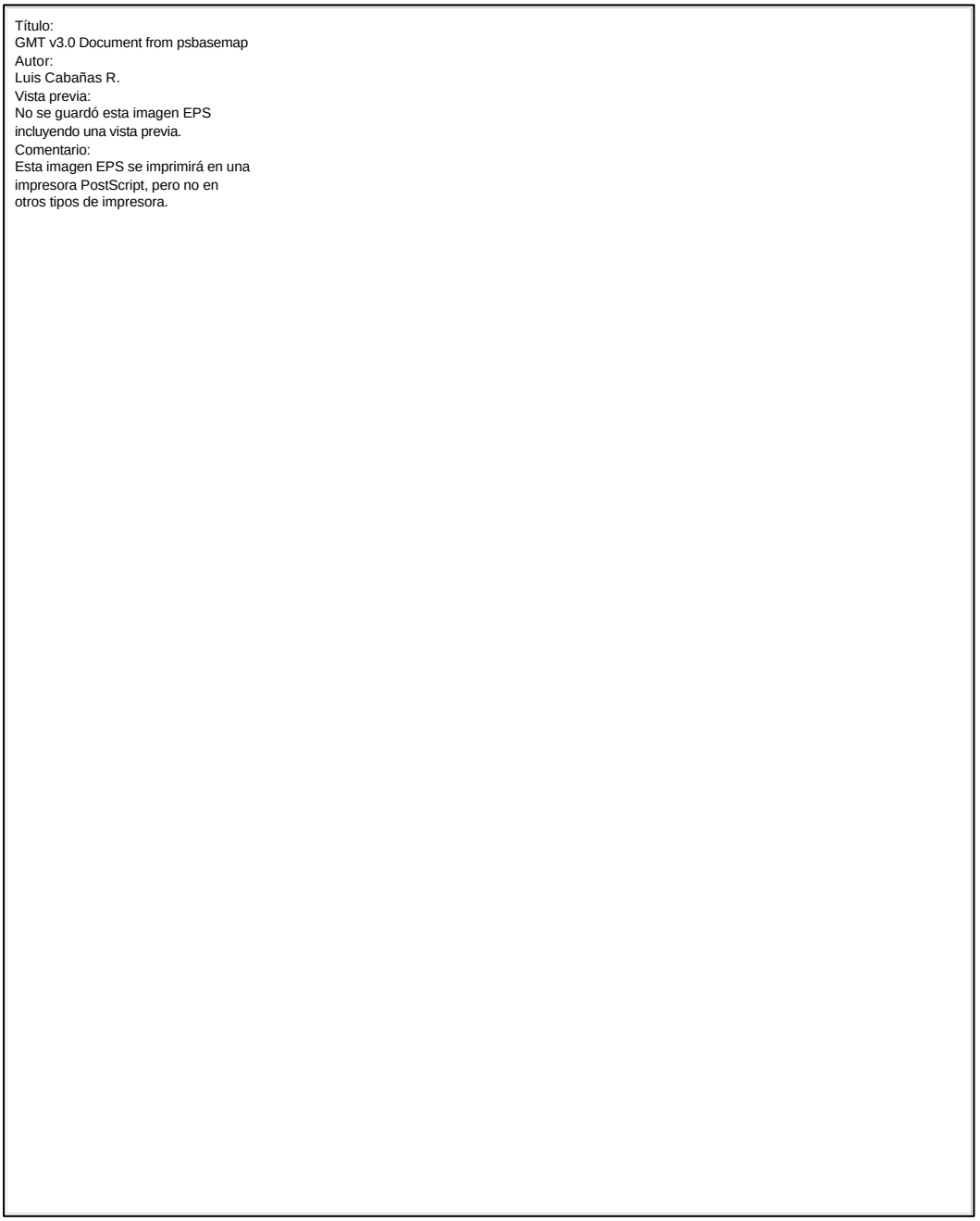

Figura 1.- Distribución geográfica del daño. Daño acumulado D≥3 y D≥4**.**

EVALUACION DE PARAMETROS DE MOV. INDICADORES DEL DAÑO

Con el objetivo de poder relacionar el daño ocurrido con el movimiento del suelo y dado que en los municipios donde existen datos de daño no hay registros, ha sido necesario calcular previamente valores de las variables del movimiento analizadas (pga, pgv, ia y cav) en dichas localizaciones. Para ello se utilizaron inicialmente leyes de atenuación[5] y en una segunda fase también se han calculado estos valores mediante un método de interpolación (método integral de mínima curvatura modificado[6,7]). Las isolíneas resultado de estas interpolaciones se

muestran en las figura 2 y en ellas pueden observarse diferentes comportamientos de las variables consideradas, generalmente muy condicionadas por el máximo que se da en la estación STU.

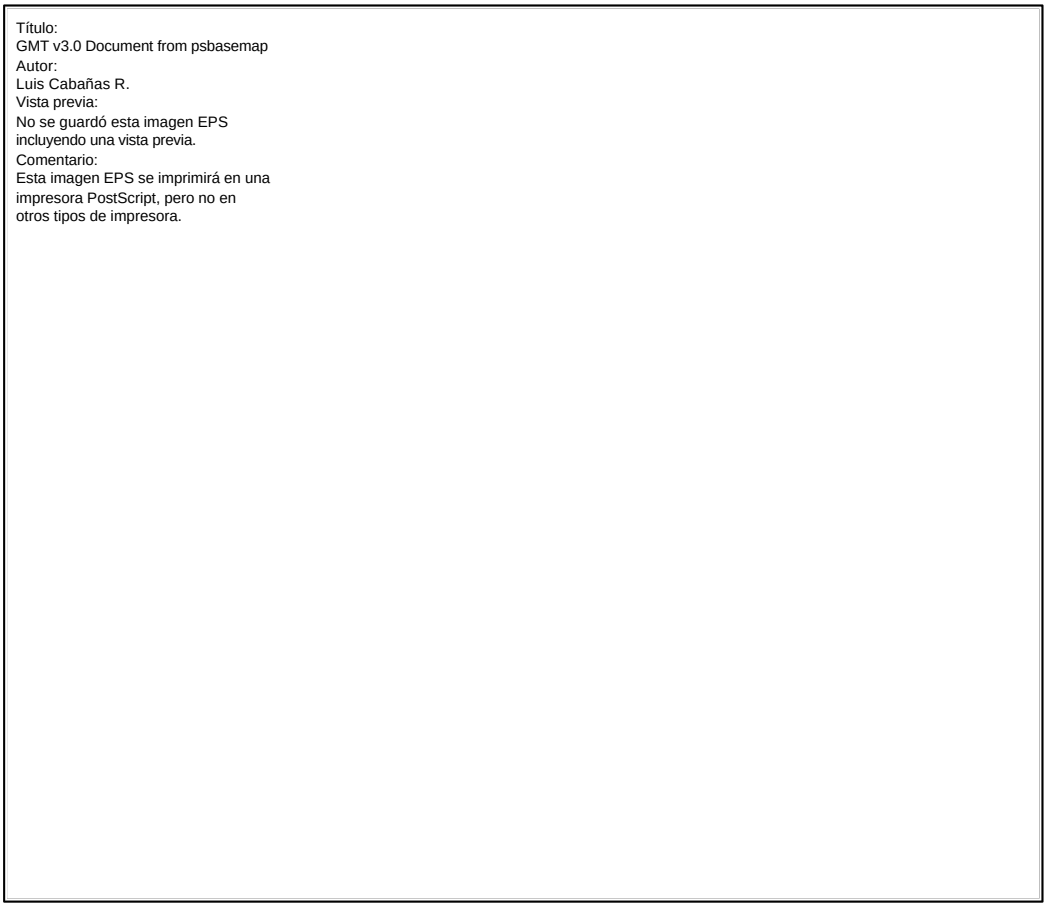

Figura 2.- Datos del movimiento del suelo. Datos interpolados pga, pgv, ia, y cav.

Una vez obtenidos los valores del movimiento se ha pasado a construir para cada uno de los parámetros analizados, una función de evaluación de su comportamiento como indicador del daño, según el esquema de la figura 3. Esta metodología, que ha sido utilizada anteriormente en estudios de sistemas de control antisísmico[8], se resume a continuación.

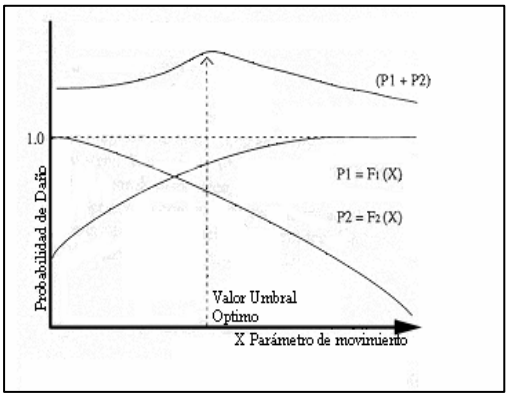

Figura 3.- Funciones de probabilidad de daño P1, P2, y función de evaluación $(P1+P2)^8$.

Consideremos X un parámetro de movimiento posible indicador de severidad o destructividad sísmica. Consideremos también tres niveles de daño, daño ligero o no daño (ND), daño moderado (DM) y daño fuerte (DF). Sea $P_1=F_1(X)$ la probabilidad de sufrir daño superior o igual al nivel de daño moderado fijado P_1= P(DM+DF)=P(D≥DM). Sea $P_2=F_2(X)$ la probabilidad de no sufrir daño o tan solo daño inferior o igual al nivel de daño moderado fijado P_2= P(ND+DM)=P(D≤DM).

P_1 ha de ser una función creciente con el parámetro de movimiento y ha de tender a 1 cuando X se hace muy grande. Por el contrario, P_2 debe crecer hasta llegar a 1 cuando X tiende a 0. Dado que las dos funciones son monótonas

ha de existir un valor crítico en el que las probabilidades P_1 y P_2 alcanzan simultáneamente el mayor valor, por lo que la función $F(X)=a\ P_1 + b\ P_2$ alcanza un máximo. Los pesos a y b pueden variarse en función del grado de conservadurismo que se desea asumir (a>b más riesgo; a<b más conservador). En nuestro caso a=b=1.
La interpretación del máximo de esta función de evaluación, puede hacerse teniendo en cuenta que $P_1 + P_2 = 1+DM$ indica el comportamiento del daño moderado elegido, es decir de la zona de intersección entre P_1 y P_2. Así, antes de alcanzar el máximo, puede decirse que predomina el daño ligero o no daño y después de éste comenzará a predominar el daño fuerte.
Por tanto, el máximo es un valor umbral que separa ambas zonas y que puede ser importante estimar para la toma de decisiones (como ocurre en control antisísmico) o bien para el conocimiento del orden de magnitud en el que se halla cada parámetro de movimiento analizado.

RESULTADOS

Para la aplicación de este método a los datos de daño que se tienen, se ha tomado para cada una de las clases de vulnerabilidad consideradas A,B,C, como nivel de no daño (o daño ligero) d0+d1, como nivel de daño moderado d2 y como nivel de daño fuerte d3+d4+d5, de manera que $P_1=F_1(X)= P(D\geq d2)$ y $P_2=F_2(X)= P(D\leq d2)$.

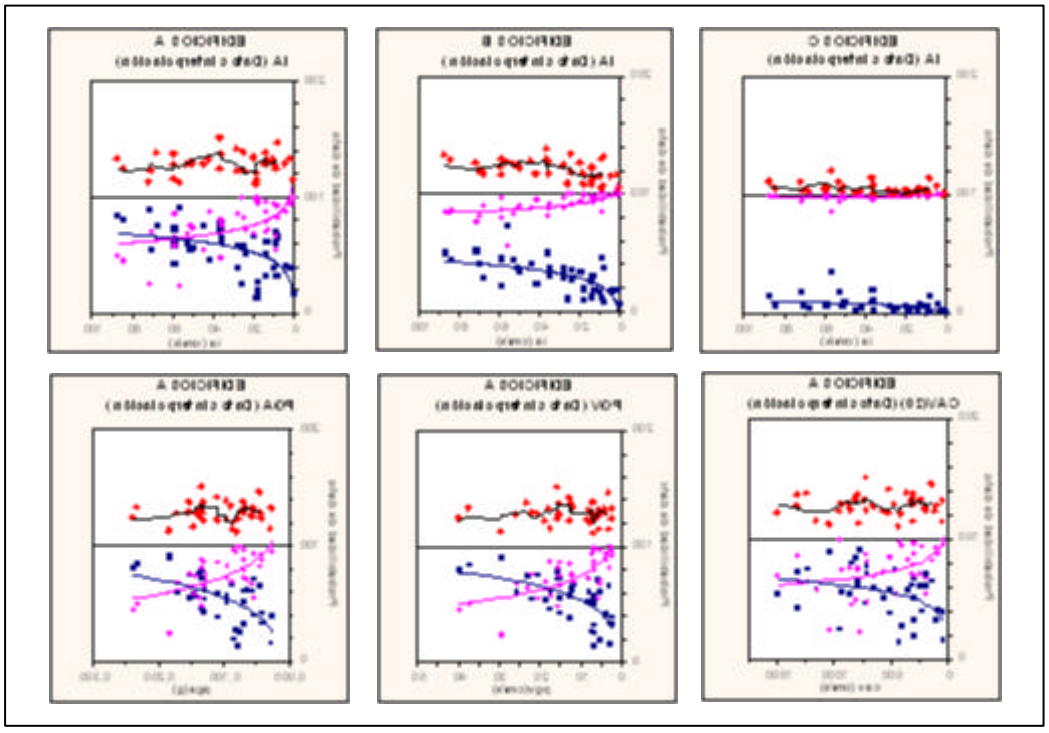

Figura 4.- Resultados función de evaluación. En cada gráfico se muestran P1 y P2 en la parte inferior y P1+P2 en la parte superior

En la figura 4 se muestran como parte de los resultados obtenidos la intensidad de Arias (ia) para edificios A, B y C, y los parámetros aceleración máxima (pga), velocidad máxima (pgv) y velocidad absoluta acumulada (cav) para los edificios tipo A. Puede distinguirse un comportamiento diferente de las estructuras A, B y C para los cuatro parámetros estudiados. En general, las estructuras tipo A presentan un cruce entre P_1 y P_2 y un máximo en $P_1 + P_2$. Ello implica, según lo visto, que existe una separación entre zonas de dominio de P_1 y P_2, es decir probabilidad de daño y de no daño y puede estimarse un valor umbral en cada uno de los parámetros. Para las estructuras tipo B, aunque puede apreciarse la tendencia convergente de

ambas curvas, no parece existir un cruce entre ambas funciones de probabilidad para ninguno de los parámetros analizados. Esto quiere decir que la probabilidad de daño fuerte es siempre más pequeña que la probabilidad de daño ligero o no daño y por ello no se alcanza en ninguno de los parámetros, un umbral en el que comience a distinguirse un comportamiento predominante del daño. Para las estructuras tipo C, dado el poco daño fuerte registrado en estos edificios, la función de probabilidad P_2 está prácticamente saturada al 100% y P_1 se sitúa siempre por debajo del 20% por lo que la convergencia de ambas funciones es poco apreciable y el umbral indicando el cambio de tendencia esperado, con los datos que se tienen, parece estar lejos de alcanzarse.
El análisis de los resultados para cada parámetro indica en general un comportamiento oscilante y similar de las funciones P_1 y P_2 , en el que pueden estimarse los siguientes valores umbrales de inicio del daño fuerte para las estructuras tipo A, dado por el máximo de la función P_1+P_2: aceleración máxima (pga) $\cong$ 0.14 g, velocidad máxima (pgv)$\cong$ 15 cm/s, intensidad de Arias (ia) $\cong$35 cm/s y velocidad absoluta acumulada (cav)$\cong$ 725 cm/s.

DISCUSION

Dada la complejidad de la clasificación inicial de observaciones de daño (15 tipos de edificios y 8 niveles de daño) ha resultado conveniente la agrupación en clases de vulnerabilidad A, B, C y 6 niveles de daño (0-5) según los criterios de las escalas macrosísmicas al uso (MSK-76, EMS-92). Por otra parte el no disponer de datos de movimiento registrado en los municipios dañados, ha hecho necesario estimar éstos, mediante una interpolación a partir de los datos de las estaciones acelerométricas (y también mediante leyes de atenuación), pero todavía no se han considerado posibles efectos locales que podrían tener mucha influencia. Teniendo en cuenta lo anterior, la metodología presentada, basada en la maximización de la probabilidad de daño moderado puede resultar adecuada para calibrar parámetros del movimiento del suelo como indicadores de daño.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del Proyecto Daños, financiado por CSN y ENRESA.
Los autores del trabajo desean agradecer al SSN de Italia su colaboración así como la cesión de los datos de daño con los que ha sido posible desarrollar el presente trabajo.

REFERENCIAS

1- D. Giardini (1993). *Teleseismic observation of the November 23 1980, Irpinia earthquake.* Annali di Geofisica Vol. 36 N-1. 1993. pp 17-25.
2- P. Bernard, A. Zollo, C-I. Trifu & A. Herrero (1993). *Details of the rupture kinematics and mechanisms of the 1980 Irpinia earthquake: new results and remaining questions.* Annali di Geofisica Vol. 36 N-1. 1993. pp 71-80.
3- F. Braga, M. Dolce, D. Liberatore (1982). *A Statisitical Study on damaged Buildings and an Ensuing Review of the MSK-76 Scale*. Proc. of the 7th ECEE. Athens. September 1982.
4- F. Braga, M. Dolce, D. Liberatore (1986). *Assessment of the Relationships between Macroseismic Intensity Type of Building and Damage, Based on the Recent Italy Earthquake Data*. Proc. of the 8th ECEE. Lisbon 1986.
5- F. Sabetta & A. Pugliese (1987). *Attenuation of Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Italian Strong-Motion Records.* BSSA V 77, No. 5, pp 1491-1513.
6- W.H.F. Smith & P. Wessel (1990). *Gridding with continuos curvature splines in tension*. Geophysics Vol. 55 N-3. March 1990. pp 293-205.
7- P. Wessel & W.H.F. Smith (1995). *New version of the Generic Mapping Tools released*. EOS Trans. Amer. Geophys. U. Vol 76 pp 329. 1995.
8- T. Iwata, H. Nakane, T. Tazo, K. Shimizu & S. Kataoka (1992). *Demonstrative evaluation of variables indicating severity of earthquake applicable to earthquakes sensors for control*. Proc. of the 10th WCEE. 1992. Balkema. Rotterdam. Vol. 1 pp 381-385.