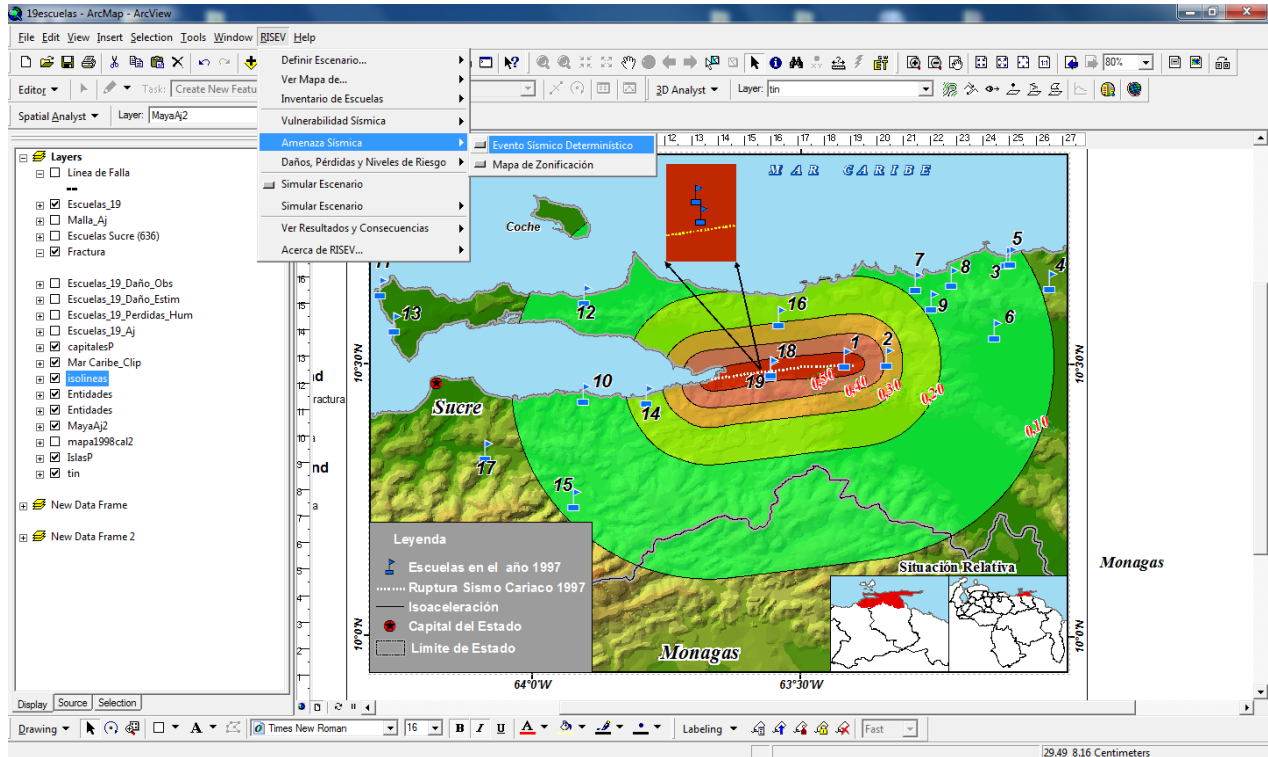


# Capítulo 2

## *Efectos de los Terremotos Sobre los Edificios Escolares de Venezuela*



## Reducción del Riesgo Sísmico en Edificaciones Escolares de Venezuela

Informe Técnico

Responsable: Oscar A. López (IMME–FI–UCV)

## **2.- EFECTOS DE LOS TERREMOTOS SOBRE LOS EDIFICIOS ESCOLARES DE VENEZUELA**

**Gustavo Coronel D. y Oscar A. López**

### **2.1.- Participantes**

En esta actividad del proyecto participaron las siguientes personas:

Prof. Gustavo Coronel D. (IMME-UCV)  
Prof. Oscar A. López (IMME-UCV)  
Dr. Ing. Salvador Safina (Sismometric C.A.)  
Geo. Nelson Betancourt (Geografía-UCV)  
Br. Jonathan Pérez (Ingeniería-UCV)  
Br. Ricardo Pereira (Geografía-UCV)

### **2.2.- Introducción**

En este capítulo se presenta una metodología simplificada que permite desarrollar curvas de fragilidad para caracterizar la vulnerabilidad sísmica de los edificios escolares venezolanos, estimar daños, pérdidas y niveles de riesgo, fundamentada en: i) información básica recopilada de las edificaciones consistente en: año de construcción, número de pisos, ubicación geográfica y población escolar, contenida en el inventario de edificios escolares y el Sistema de Información Geográfica (SIG) presentados en el Capítulo 1; ii) la hipótesis de que los edificios escolares fueron diseñados y construidos acorde a lo establecido en las normas vigentes para el momento de su construcción. Con base a esto se desarrollan curvas de capacidad bilineal sobre las cuales se han adoptado cinco estados de daños: sin daño, leve, moderado, severo y completo. Para cada estado de daño se determinan las curvas de fragilidad sísmica, las cuales representan la probabilidad de alcanzar o exceder el estado de daño dado un valor de la aceleración máxima del terreno. Para definir la curva de fragilidad se utiliza una distribución lognormal y mediante el método de los coeficientes se determinan los valores medios de aceleración del terreno asociados al inicio de cada estado de daño. Se adoptan valores de desviación estándar seleccionados de experiencias nacionales e internacionales. Se presenta la implementación de esta metodología en un programa computacional de ambiente gráfico y se comparan las curvas de fragilidad estimadas a través de esta metodología con las curvas utilizadas por el sistema HAZUS. Las comparaciones se realizan para edificios escolares construidos en distintas épocas, con distintos tipos de suelo, ubicados en diferentes regiones de Venezuela. Se calibraron algunos parámetros de la metodología a partir de la comparación entre los daños observados en edificios escolares luego del terremoto de Cariaco de 1997 y los predichos por el cálculo. Para la evaluación de escenarios sísmicos se desarrolló una herramienta computacional basada en un Sistema de Información Geográfica la cual permite estimar daños y pérdidas asociadas a eventos sísmicos particulares para lo cual se programaron algoritmos para la simulación de los escenarios sísmicos basados en relaciones de atenuación de aceptación internacional. Por otro lado el procedimiento desarrollado permite

determinar índices de pérdidas basado en mapas de amenaza sísmica, los cuales son asociados a niveles de riesgo sísmico que facilitan la tarea de priorización. Mediante esta herramienta se aplica la metodología a la evaluación de tres escenarios regionales: i) una muestra de 636 edificios escolares del Estado Sucre; ii) una muestra de 83 edificios escolares en la Ciudad de Cumaná, incorporando las características locales del suelo y; iii) una muestra de 569 escuelas de Área Metropolitana de Caracas en la cual se utilizó los recientes resultados del proyecto de microzonificación sísmica. Esta metodología permite apoyar el proceso de planificación y toma de decisiones con fines de prevención y mitigación del riesgo sísmico en Venezuela.

### 2.3.- Curvas de Capacidad

Las curvas de capacidad representan la relación entre la fuerza cortante ( $V$ ) en la base de un edificio y el desplazamiento ( $u$ ) en el tope del mismo. En la Figura 2.1 se presenta la idealización bilineal de la curva de capacidad empleada en este trabajo. Los parámetros que definen dicha curva se describen más adelante y se estiman a partir de la información básica recopilada en el inventario de edificios escolares de Venezuela y reconocidas referencias.

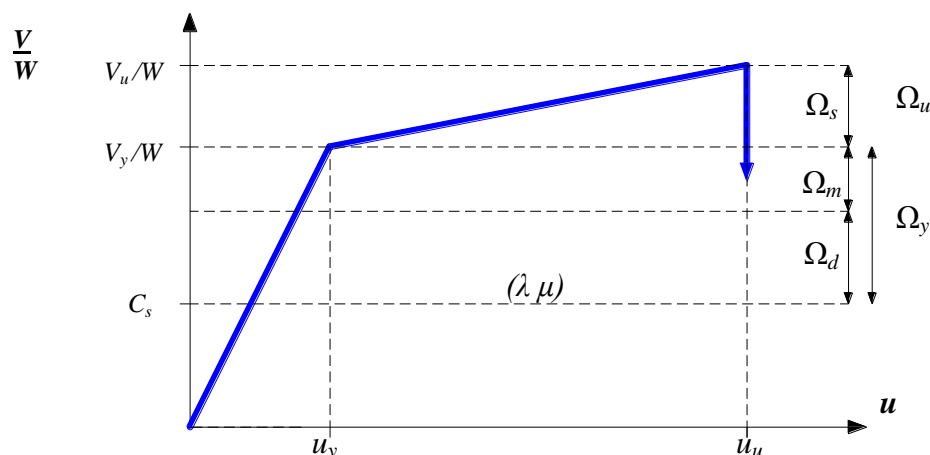


Figura 2.1. Representación bilineal y parámetros de la Curva de Capacidad.

#### 2.3.1.- Capacidad Resistente

Se parte de la hipótesis de que el edificio escolar fue diseñado y construido cumpliendo con los requerimientos normativos vigentes para el momento de su construcción; por tanto, la capacidad resistente está relacionada con la fuerza de diseño establecida en la norma correspondiente. En López (2009) se derivan de las siete normas nacionales (MOP, 1939; MOP, 1947; MOP, 1955; MOP, 1967; COVENIN, 1982; COVENIN, 1998a y COVENIN, 2001), expresiones para estimar el cortante basal a nivel cedente a partir de las fuerzas de diseño establecidas en cada norma.

Tabla 2.1. Expresiones para estimar  $C_s$  derivadas de las siete normas nacionales.

Norma	Coefficiente Sísmico	Descripción
MOP, 1939	$C_s = 1,33 \cdot C$	No incluye mapa de zonificación, $C=0,05$ para edificios de más de 3 pisos y para edificios con cualquier número de pisos ubicados en zonas montañosas de los Andes y de la costa. El peso $W_{norma}$ incorporaba el 100% de la carga variable: $W_{norma} = CP + CV$ .
MOP, 1947	$C_s = 1,5 \cdot C$	Mapa de zonificación sísmica con las zonas A, B y C. Para la zona A, $C=0,05$ , en la zona B, la más severa, $C=0,10$ las cual contempla áreas del Estado Sucre incluyendo Cumaná. En la zona C no se exigía el diseño sísmico. Se adoptó una resistencia del suelo $R_s < 2 \text{ kg/cm}^2$ . $W_{norma} = CP + 0,5CV$ .
MOP, 1955	$C_s = 1,5 \cdot C$ $C = \frac{0,30}{N + 4,5}$	El mapa de zonificación sísmica presenta las zonas A, B y C. El valor de $C$ está definido por la fórmula para la zona B la cual incluía Caracas. Para la Zona C se exigía el doble, donde se incluía el Estado Sucre. Para la Zona A no se exigía el diseño sísmico. Se aplicó la versión no oficial (Hernández, 2009) para el cálculo de $C$ . $W_{norma} = CP$ .
MOP, 1967	$C_s = 1,5 \cdot C$	El mapa presenta cuatro zonas (0, 1, 2 y 3). El valor de $C$ en la zona 3 varía entre 0,045 y 0,15 dependiendo del tipo estructural, el uso y tipo de suelo. Para las zonas 2 y 1 se multiplicaba por 0,5 y 0,25 respectivamente. El tipo de suelo se diferenciaba entre roca y aluvión. $W_{norma} = CP + 0,25CV$ .
COVENIN, 1982	$C_s = \mu_o \cdot A_d(T_a)$ $\mu_o = \frac{3}{2} \frac{(N+1)}{(2N+1)}$	Presenta un mapa de zonificación sísmica con las zonas 0, 1, 2, 3 y 4. $A_d(T_a)$ representa el espectro de diseño estipulado en esta norma para un factor de ductilidad $D=6$ . Define 3 formas espectrales S1, S2 y S3. Para escuelas el factor de importancia $\alpha = 1,25$ . $W_{norma} = CP + 0,25CV$ .
COVENIN, 1998	$C_s = \mu_o \cdot A_d(T_a)$ $\mu_o = 1,4 \frac{(N+9)}{(2N+12)}$	Presenta un nuevo mapa de zonificación sísmica con las zonas 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7. $A_d(T_a)$ representa el espectro de diseño estipulado en estas normas para un factor de reducción de respuesta $R = 6$ . Para escuelas $\alpha = 1,30$ . $W_{norma} = CP + 0,5CV$ .
COVENIN, 2001		Es la norma vigente para edificaciones sismorresistentes. Representa una versión mejorada de la norma anterior las cuales se diferencian entre sí sólo en los parámetros que definen las formas espectrales. Para escuelas $\alpha = 1,30$ .

En la Tabla 2.1 se presentan expresiones para estimar el coeficiente sísmico nominal a nivel cedente ( $C_s$ ) y se describen las condiciones impuestas en cada norma para las distintas zonas sísmicas. En las normas previas a 1982, las expresiones de  $C_s$  de la Tabla 2.1 incorporan la corrección necesaria para llevar los materiales hasta el nivel de cedencia, tomando en cuenta que el diseño se hacía con el método de los esfuerzos admisibles. En la Tabla 2.1  $N$  corresponde al número de pisos del edificio. El valor del periodo fundamental ( $T_a$ ) requerido para determinar los valores de  $A_d(T_a)$  del espectro de diseño en las normas COVENIN (1982), COVENIN (1998a) y COVENIN (2001), se estimó a partir de la fórmula aproximada de la norma COVENIN (2001) para edificios apertados de concreto reforzado.

La fuerza cortante ( $V_y$ ) necesaria para iniciar la cedencia en el sistema lineal representativo incorporando la sobrerresistencia, se estima a partir de:

$$V_y = \Omega_y \cdot C_s \cdot W_{norma} \quad (2.1)$$

donde  $\Omega_y$  es el factor de sobrerresistencia que conecta la fuerza nominal cedente a la fuerza real asociada con la cedencia global de la estructura (Figura 2.1),  $C_s$  está definido en la Tabla 2.1 y  $W_{norma}$  es el peso sísmico del edificio definido en la norma respectiva por la suma de la carga permanente (CP) y un porcentaje de la carga variable (CV) el cual varía de una norma a la otra (Tabla 2.1).

A efectos de normalizar la fuerza  $V_y$  en cada norma por el mismo valor del peso, se define el factor de corrección del peso ( $f_w$ ) a partir de:

$$f_w = \frac{W_{norma}}{W} \quad (2.2)$$

$$W = CP + 0,50 CV \quad (2.3)$$

$$W_{norma} = CP + \alpha_n CV \quad (2.4)$$

Donde  $W$  es el peso sísmico asociado a la norma COVENIN (2001) y  $\alpha_n$  es la fracción de carga variable considerada en cada norma y dada en la Tabla 2.1. A efectos de simplificar los cálculos se estima que  $CV=0,25(CP+CV)$  en todas las normas. Sustituyendo las Ecuaciones (2.3) y (2.4) en (2.2) y simplificando se obtiene la siguiente fórmula para el factor de corrección del peso ( $f_w$ ):

$$f_w = 1,1429 (0,75 + 0,25\alpha_n) \quad (2.5)$$

La Tabla 2.2 presenta los factores de corrección del peso para cada norma, los cuales varían entre 0,857 y 1,143.

**Tabla 2.2. Valores del factor de corrección del peso ( $f_w$ ).**

Número de piso ( $N$ )	Norma					
	1939	1947	1955	1967	1982	1998 y 2001
1	0,857					
2-4	1,143	1,00	0,857	0,929	0,929	1,00

Despejando  $W_{norma}$  de (2.2), sustituyendo en (2.1) y dividiendo entre  $W$  se obtiene la capacidad resistente a nivel cedente en forma adimensional:

$$\frac{V_y}{W} = \Omega_y \cdot C_s \cdot f_w \quad (2.6)$$

Para la capacidad resistente última se incorpora el factor de sobrerresistencia última ( $\Omega_u$ ) (Figura 2.1):

$$\frac{V_u}{W} = \Omega_u \cdot \frac{V_y}{W} \quad (2.7)$$

Los factores de sobrerresistencia cedente y última se adoptaron del rango de factores expuestos en (FEMA, 2003), donde se define una fuente de sobrerresistencia propiciada por el diseño ( $\Omega_d$ ), una debida a la sobrerresistencia de los materiales ( $\Omega_m$ ) y una sobrerresistencia debida a la redundancia del sistema estructural ( $\Omega_s$ ). A partir de éstos se definen los factores  $\Omega_y$  y  $\Omega_u$  como:

$$\Omega_y = \Omega_d \cdot \Omega_m \quad (2.8)$$

$$\Omega_u = \Omega_s \quad (2.9)$$

Los valores utilizados en este trabajo para los factores  $\Omega_y$  y  $\Omega_u$  se muestran en la Tabla 2.3; éstos corresponden a valores calibrados con la comparación con los daños observados en el terremoto de Cariaco de 1997 que se presenta más adelante, pero se encuentran dentro del rango sugerido por FEMA (2003) para pórticos de concreto con nivel de diseño especial, moderado y bajo, asociando de manera simplificada el nivel de diseño con las épocas indicadas en la Tabla 2.3. En la Figura 2.1, se muestran los parámetros de la representación bilineal adoptada en este trabajo para la curva de capacidad de los edificios escolares.

**Tabla 2.3. Valores adoptados de  $\Omega_y$  y  $\Omega_u$  para los periodos indicados.**

Antes de 1967		Entre 1967 y 1982		Después de 1982	
(Nivel de diseño bajo)		(Nivel de diseño medio)		(nivel de diseño especial)	
$\Omega_y$	$\Omega_u$	$\Omega_y$	$\Omega_u$	$\Omega_y$	$\Omega_u$
1,60	1,50	1,70	1,50	1,80	1,50

Se reconoce que la sobrerresistencia está asociada al nivel de diseño establecido en las normas para este fin. Una revisión detallada de la evolución de las normas de diseño para estructuras de concreto utilizadas en Venezuela puede consultarse en Grases et al (2004) y Hernández (2009). Con el fin de simplificar el número de combinaciones entre normas de diseño y normas sísmicas se definieron en la Tabla 2.3 dos periodos constructivos. La definición del periodo posterior a 1982, está asociado a la aparición de las normas para el diseño de edificaciones de concreto COVENIN 1753-81 (COVENIN, 1981) y para el diseño de edificaciones de acero COVENIN 1618-80 (COVENIN, 1980). Aunque se reconoce que estas normas en sus posteriores versiones COVENIN 1753-87 (COVENIN, 1987) y COVENIN 1618-98 (COVENIN, 1998b), incorporaron mayores exigencias sismorresistentes, se ha adoptado un mismo valor para efectos de estimar la sobrerresistencia.

2.3.2.- Desplazamientos Cedente y Último

El desplazamiento cedente ( $u_y$ ) en el último nivel de una estructura de pocos pisos, asociado a la fuerza cortante cedente en la base ( $V_y$ ), se puede determinar suponiendo que la respuesta dinámica está contenida en el modo fundamental (López, 2009):

$$u_y = \frac{\alpha_1 V_y}{\beta_1 W} g \left( \frac{T_e}{2\pi} \right)^2 \tag{2.10}$$

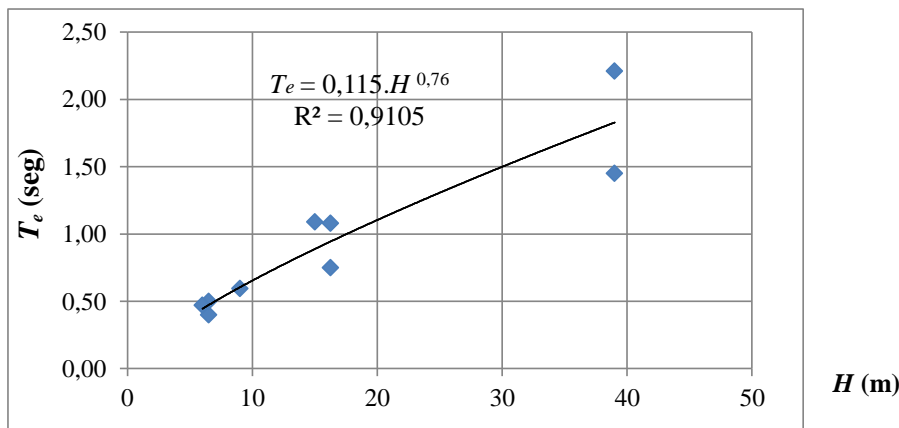
donde  $T_e$  es el periodo efectivo (FEMA, 2000),  $\alpha_1$  es el factor de participación del modo fundamental en el desplazamiento del último piso para el cual se adoptaron los valores de la Tabla 4, basados en (López y Cruz, 1996; FEMA, 2000). El parámetro  $\beta_1$  es la fracción de la masa del edificio contenida en el modo fundamental, la cual se adoptó igual al valor  $\mu_0$  dado por la Ecuación 2.11, definido de esta manera en la norma COVENIN (2001).  $V_y/W$  es la relación definida anteriormente (Ecuación 2.6) y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

$$\beta_1 = \mu_0 = 1.4 \frac{(N+9)}{(2N+12)} \tag{2.11}$$

En la Tabla 2.4, se presentan los valores adoptados en este trabajo para los parámetros  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ , altura total del edificio ( $H$ ), periodo elástico ( $T_a$ ) y periodo efectivo ( $T_e$ ), correspondientes a las edificaciones con 1, 2, 3 y 4 niveles ( $N$ ).

**Tabla 2.4. Parámetros  $H$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $T_a$  y  $T_e$  para edificaciones de  $N= 1$  a 4 pisos.**

$N$	$H(m)$	$\alpha_1$	$\beta_1$	$T_a$ (seg.)	Antes de 1982	Después de 1982
					$T_e$ (seg.)	$T_e$ (seg.)
1	3	1,00	1,00	0,16	0,34	0,27
2	6	1,15	0,96	0,27	0,58	0,45
3	9	1,20	0,93	0,36	0,79	0,61
4	12	1,25	0,91	0,45	0,99	0,76



**Figura 2.2. Relación entre el periodo efectivo y la altura del edificio (Tabla 2.4).**

Los valores adoptados para el periodo efectivo ( $T_e$ ) para edificios construidos después de 1982, provienen del ajuste de la Figura 2.2, el cual corresponde a los valores de periodo efectivo  $T_e$  definidos en los documentos que se resumen en la Tabla 2.5.  $T_e$  se ha aumentado un 30% para los edificios anteriores a 1982 (Tabla 2.4), acorde al aumento de exigencias tal como las dimensiones mínimas de las secciones de columnas requerida en las normas más recientes.

**Tabla 2.5. Valores del periodo efectivo  $T_e$  según distintos autores.**

Autor (referencia)	Tipo	Pisos	H(m)	$T_e$ (seg.)
HAZUS (FEMA-NIBS, 2009)	C1L (concreto)	2	6,50	0,40
HAZUS (FEMA-NIBS, 2009)	S1L (acero)	2	6,50	0,50
Barbat et al. (2008)	-	2	6,00*	0,47
Moreno (2006)	Concreto	3	9,00*	0,60
HAZUS (FEMA-NIBS, 2009)	C1M (concreto)	5	16,25	0,75
HAZUS (FEMA-NIBS, 2009)	S1M (acero)	5	16,25	1,08
Bonett (2003)	Concreto	5	15,00*	1,09
HAZUS (FEMA-NIBS, 2009)	C1M (concreto)	13	39,00	1,45
HAZUS (FEMA-NIBS, 2009)	S1M (acero)	13	39,00	2,21

\* Inferido.

El desplazamiento último ( $u_u$ ) en el tope de la estructura (Figura 2.1) se obtiene de:

$$u_u = \lambda \mu u_y \quad (2.12)$$

donde  $\mu$  es el factor de ductilidad nominal.

Los valores de  $\mu$  dados en la Tabla 2.6 son valores medios estimados a partir de una consulta a expertos (Anexo 2.2; Coronel, 2012) los cuales resultaron ser similares a los utilizados para el estudio de vulnerabilidad de la ciudad de Cumaná (Grases et al., 2004). Estos valores están asociados a la ocurrencia de daños que se encuentran entre leves y moderados y dependen del nivel de detallado sismorresistente utilizado. En la norma COVENIN 1756-01 (COVENIN, 2001) se admiten daños reparables para el sismo de diseño con probabilidad de excedencia de 10% en 50 años.

**Tabla 2.6. Valores medios del factor de ductilidad nominal  $\mu$  para distintas épocas.**

Antes de 1967	Entre 1967 y 1982	Entre 1982 y 1998 (ND3)	Después de 1998 (ND3)
2,0	3,0	4,0	4,5

Por otro lado, el factor  $\lambda$  permite llevar el desplazamiento hasta el estado último o de daño completo; en consecuencia el producto ( $\lambda \mu$ ) representa el factor de ductilidad última. En este trabajo a falta de valores analíticos o experimentales que permitan una mejor aproximación, se ha adoptado un valor de  $\lambda=3,0$  igual al valor de  $\lambda$  utilizado por HAZUS (Kircher et al., 1997 y

FEMA-NIBS, 2009). Un factor similar fue utilizado en Hernández (2009) para el estudio de edificaciones de Caracas.

Similar al caso de la sobrerresistencia, se definieron las cuatro épocas constructivas mostradas en la Tabla 2.6 con el fin de simplificar el número de combinaciones entre normas sísmicas y normas de diseño.

### 2.3.3.- Caso Particular de las Escuelas Rurales

Las Escuelas Rurales son aquellas construidas con sistemas Tipo “R” o similares (Ver Capítulo 4.13), de un sólo piso, donde la de estructura principal es de paredes de mampostería, bien sea estructuras con pequeños elementos confinantes de concreto reforzado (machones a menos de 4,0 metros de separación y vigas de corona) las cuales denominamos Mampostería Confinada o aquellas otras que no cumplen esta condición, con elementos de acero o simplemente bloques trabados que denominamos Mampostería No Confinada. A estas escuelas se les dará un trato especial reconociendo que usualmente no son diseñado con las normas de concreto o acero, que suelen ser más livianas que las estructuras diseñadas con las normas y se comportan como estructuras de mampostería debido a la gran rigidez y resistencia que aportan las paredes.

La resistencia media al cortante ( $V_r$ ) de una construcción de mampostería confinada se puede estimar a partir de (NTCM, 2004):

$$V_r = 0,50 V_m \cdot A_T + 0,30P \quad (2.13)$$

donde  $V_m$  es el esfuerzo resistente medio ( $\text{kg/cm}^2$ ) a compresión diagonal,  $A_T$  es el área total de la sección transversal del muro y  $P$  es la carga vertical total actuante sobre el muro.

Para mampostería no confinada se estima que  $V_r$  es aproximadamente un 60% del valor dado por la Ecuación 2.13 (NTCM, 2004).

Para efectos de este trabajo se adopta un valor de  $V_m = 2,5 \text{ kg/cm}^2$  el cual corresponde aproximadamente al valor medio último en (IMME, 2004) para bloques de arcilla.

Manteniendo el mismo criterio utilizado para las edificaciones diseñadas con las normas, se modifica la Ecuación 2.6 de la siguiente manera:

$$\frac{V_y}{W} = \Omega_y \cdot \frac{V_r}{W} \cdot f_w \quad (2.14)$$

Se estimó el peso  $W$  de una Escuela Rural típica (Figura 2.3) a partir de las características de estas edificaciones (FEDE, 2001), para la Mampostería Confinada se utilizó el peso de una estructura de concreto ( $\approx 12 \text{ Ton}$ ) y para la Mampostería No Confinada se utilizó el peso de una estructura de acero ( $\approx 3\text{Ton}$ ), se incorporó el peso de las columnas y paredes, luego se normalizó entre el área del techo  $A_p$  de  $140 \text{ m}^2$  aproximadamente y se determinó el peso normalizado por el área ( $W/A_p$ ) para un techo liviano de  $7 \text{ kg/m}^2$  y un techo pesado de  $200 \text{ kg/m}^2$  aproximadamente, esto condujo a los valores presentados en la Tabla 2.7.

Para la resistencia se consideró la dirección más corta con la presencia de tres (3) líneas resistentes de paredes de bloque de 15 centímetros de espesor y 5,90 metros de largo para un área total  $A_T = 26.550 \text{ cm}^2$ , se consideró despreciable el valor de la carga vertical  $P$  y para el caso de Mampostería Confinada se supone que existe un machón intermedio.

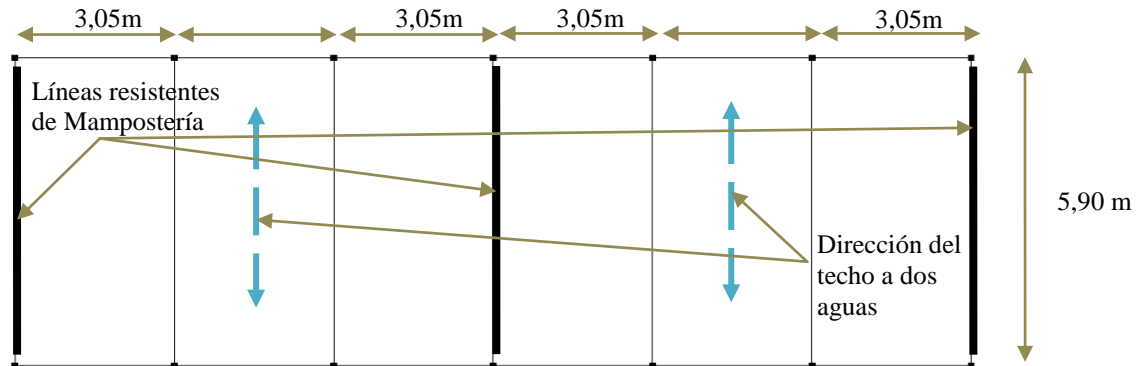


Figura 2.3. Esquema de planta típica de escuelas rurales.

Tabla 2.7. Valores utilizados para el cálculo de la resistencia cedente.

Tipo	Techo	$W/A_p$ ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	$V_m^*$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	$V_r$ (kg)	$V_r/W$	$\Omega_y$	$\Omega_u$	$V_y/W$	$T_e$ (seg)	$\mu$	$\lambda$
Mampostería Confinada	Liviano	480	2,50	39.825	0,63	1,50	1,50	0,94	0,20	1,5	2,0
	Pesado	730		39.825	0,41			0,62			
Mampostería No Confinada	Liviano	400		23.895	0,45	1,10	1,00	0,50	0,20	1,0	2,0
	Pesado	650		23.895	0,28			0,31			

#### 2.4.- Estados de Daño

El daño físico (estructural) debido a terremotos es caracterizado en este trabajo a través de estados de daño discretos asociados a distintos niveles de desplazamiento de la estructura. Se implementan cinco estados de daño ( $i$ ), denominados: 0) Sin Daño Estructural, 1) Daño Leve, 2) Daño Moderado, 3) Daño Severo y 4) Daño Completo. El inicio de cada estado de daño está asociado a los desplazamientos  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  y  $u_4$  respectivamente (Figura 2.4.a, Tabla 2.9), los cuales son función del desplazamiento cedente ( $u_y$ ) y último ( $u_u$ ) como se muestra en la Tabla 2.8:

Tabla 2.8. Desplazamientos asociados a cada límite de daño.

$i$	Límite de Daño	Estructura diseñada con norma	Estructura de Mampostería
1	Leve	$u_1 = 0,70 u_y$	$u_1 = 0,50 u_y$
2	Moderado	$u_2 = u_y$	$u_2 = 0,80 u_y$
3	Severo	$u_3 = u_y + 0,25(u_u - u_y)$	$u_3 = u_y + 0,25(u_u - u_y)$
4	Completo	$u_4 = u_u$	$u_4 = u_u$

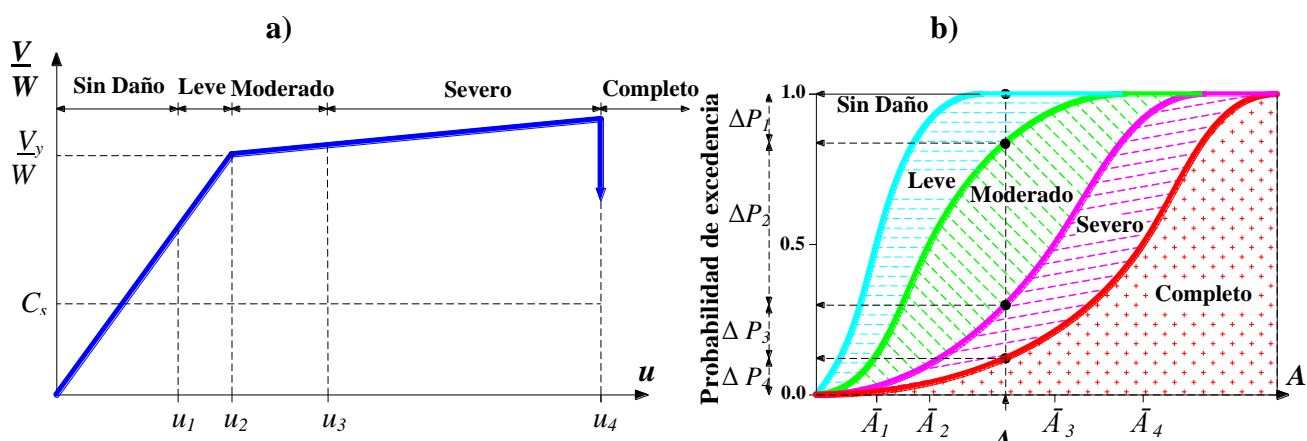


Figura 2.4. a) Límites de los estados de daños sobre la curva de capacidad;  
b) Curvas de fragilidad para cada estado de daño.

Tabla 2.9. Descripción de los estados de daño.

$i$	Estado de Daño	Descripción	Factor de pérdida $F_i$ (%)
0	Sin Daño Estructural	Sin daño estructural, con posible presencia de pequeños daños en componentes no estructurales.	0
1	Daño Leve	Presencia de pocas, localizadas y muy pequeñas grietas en elementos estructurales. Evidentes grietas en los elementos no estructurales, separación entre la tabiquería y los elementos.	2
2	Daño Moderado	Grietas evidentes en elementos estructurales con pérdida de recubrimiento en algunos casos. La mayoría de las paredes de tabiquería exhibe grandes grietas diagonales y horizontales y algunas pueden perder su estabilidad.	10
3	Daño Severo	Falla localizada de algunos elementos estructurales o sus conexiones sin pérdida de la estabilidad vertical del sistema. La mayoría de la tabiquería presenta grandes grietas y varias paredes pueden volcarse. La mayoría del mobiliario no anclado se ha volcado. La estructura presenta una deformación lateral permanente.	50
4	Daño Completo	Desplazamiento lateral excesivo. Pérdida de la estabilidad vertical. Representa el colapso parcial o total de la edificación.	100

Los límites utilizados para escuelas diseñadas con las normas fueron tomados de los propuestos inicialmente por Lagomarsino y Penna (2003) para su incorporación al proyecto de la comisión Europea (RISK UE, 2004) y han sido utilizados y discutidos en los trabajos de Bonett (2003), Giovinazzi et al. (2006) y Barbat et al. (2008) y se han presentado pequeñas variantes en Moreno (2006) y en Bermúdez et al. (2008). Estos estados de daños son descritos en la Tabla 2.9.

Para el caso de escuelas de mampostería de un sólo piso se propuso una reducción de los límites asociados al estado daño leve y moderado (Tabla 2.8) reconociendo que son más frágiles y mediante el cual se obtuvieron mejores resultados en la calibración del procedimiento que se presenta más adelante.

Se define el Factor de Pérdida ( $F_i$ ) como el porcentaje (%) del costo de la obra que se pierde durante el evento sísmico y que se puede correlacionar de manera aproximada con el estado de daño. En la Tabla 2.9 se muestran estos valores, para cada estado de daño, según la experiencia internacional (FEMA-NIBS, 2009; Hwang and Lin, 2002 y Blondet et al., 2005). El daño completo se interpreta como pérdida total.

## 2.5.- Demanda de Desplazamiento

Mediante el método de los coeficientes (FEMA, 2000; FEMA, 2005) se puede estimar la demanda de desplazamiento ( $u_d$ ) introducida por un sismo definido por un espectro elástico de aceleraciones  $S_a(T_e)$ , de la siguiente manera:

$$u_d = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a(T_e) \left( \frac{T_e}{2\pi} \right)^2 \quad (2.15)$$

Donde  $u_d$  es el desplazamiento en el último nivel de la estructura y  $S_a(T_e)$  es la aceleración espectral del sistema elástico equivalente de período efectivo  $T_e$  y amortiguamiento de 5%.

El coeficiente  $C_0$  es el factor de corrección que correlaciona el desplazamiento del último piso con el de un sistema de un grado de libertad, el cual es igual al factor  $\alpha_l$  definido anteriormente en la Tabla 2.4.  $C_1$  es el factor de corrección que correlaciona el máximo desplazamiento del sistema inelástico con el del sistema elástico. Este coeficiente es función de la intensidad del movimiento sísmico y está dado por:

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{b \cdot T_e^2} \quad R = \frac{S_a(T_e)/g}{V_y/W} \cdot C_m \quad (2.16 \text{ a,b})$$

donde  $R$  es el cociente entre la demanda elástica y la capacidad, en términos de la fuerza cortante basal a nivel cedente,  $b= 130, 90$  y  $60$  para roca sana, suelo muy duro y suelo denso, respectivamente, y  $C_m$  es la fracción de la masa participativa en el modo fundamental para la cual adoptamos los valores de  $\mu_0$  dados por la Ecuación 2.11. Para  $T_e < 0,2s$ ,  $C_1$  se toma igual al valor que tiene para  $T_e=0,2$ . Para  $T_e > 1s$ ,  $C_1=1$ .

$C_2$  es el factor de corrección que representa el efecto de la degradación de rigidez y de resistencia y el estrangulamiento de las curvas fuerza-deformación.  $C_2$  es también función de la intensidad del sismo (incorporada en  $R$ ) y está dado por:

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left( \frac{R-1}{T_e} \right)^2 \quad (2.17)$$

Para  $T_e < 0,2s$ ,  $C_2$  se toma igual al valor que tiene para  $T_e=0,2$ . Para  $T_e > 0,7s$ ,  $C_2=1$ . Por último el coeficiente  $C_3$  es el factor de corrección para representar los efectos P- $\Delta$  dinámicos. Para los edificios escolares de no más de cuatro pisos, adoptaremos  $C_3=1$ .

## 2.6.- Curvas de Fragilidad Sísmica

Las curvas de fragilidad permiten representar en términos probabilísticos la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones y proporcionan la probabilidad de que la respuesta de una estructura alcance o exceda determinado límite asociado al daño, como función de un parámetro indicador de la intensidad sísmica (Coronel y López, 2012a).

A partir de la curva de capacidad de cada edificio se estima la curva de fragilidad para el límite de cada estado de daño. Para definir la curva de fragilidad se adoptó una distribución lognormal, la cual se expresa como:

$$P [d \geq i / A] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{A_i}} \ln \left( \frac{A}{\bar{A}_i} \right) \right] \quad (2.18)$$

donde  $A$  es la aceleración horizontal del terreno dividida entre  $g$ , que llamamos aceleración normalizada, siendo  $g = 981 \text{ cm/seg}^2$ ,  $\bar{A}_i$  es su valor medio asociado al inicio del estado de daño ( $i=1$  a  $4$ ),  $\beta_{A_i}$  es la desviación estándar del  $\ln(A)$  para cada estado de daño,  $\Phi[.]$  es la función de distribución normal estándar acumulada y  $P[d \geq i/A]$  es la probabilidad de que el daño ( $d$ ) en la estructura alcance o supere el estado de daño ( $i$ ), condicionada a la ocurrencia de un valor de  $A$ .

En la Figura 2.4.b, se ejemplifican las cuatro curvas de fragilidad para cada estado de daño. Cada curva representa la probabilidad de alcanzar o exceder el estado de daño indicado en el área inferior a la curva. Para un valor fijo de  $A$ , la diferencia de ordenadas ( $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$ ,  $\Delta P_3$  y  $\Delta P_4$ ) entre las curvas representa la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño (1, 2, 3 y 4, respectivamente).  $\Delta P_0$ , no mostrada en la Figura 2.4.b por razones de escala, es la probabilidad de ocurrencia del estado "Sin Daño", la  $\sum \Delta P_i = 1$  para  $i = 0$  hasta 4.

Los valores medios de la aceleración normalizada del terreno ( $\bar{A}_1$ ,  $\bar{A}_2$ ,  $\bar{A}_3$  y  $\bar{A}_4$ ) asociados al inicio de cada estado de daño se estiman a partir de los desplazamientos ( $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  y  $u_4$ ) correspondientes. En la Ecuación 2.15 se fija el desplazamiento  $u_d$  igual a cada uno de los desplazamientos  $u_i$  de cada estado de daño ( $i$ ), se sustituye  $S_a(T_e)$  por la Ecuación 2.19 y se despeja la aceleración normalizada  $\bar{A}_i$ , dando origen a la Ecuación 2.20 (López, 2009).

$$S_a(T_e) = \bar{A}_i \cdot f(T_e) \cdot g \quad (2.19)$$

$$\bar{A}_i = \frac{u_i}{C_0 C_1(\bar{A}_i) C_2(\bar{A}_i) C_3 f(T_e) g \left( \frac{T_e}{2\pi} \right)^2} \quad (2.20)$$

El factor  $f(T_e)$  representa la forma espectral utilizada para caracterizar la respuesta sísmica. Esta puede variar de acuerdo a la información disponible y a lo que se desea representar, en algunos casos se utilizará la forma espectral de la norma COVENIN (2001), para Caracas se puede utilizar las formas espectrales provenientes del proyecto de microzonificación sísmica de (FUNVISIS, 2009) o para el caso de sismos particulares alguno de los espectros de las modernas relaciones de atenuación de la NGA: Abrahamson & Silva, 2008; Boore & Atkinson, 2008; Campbell & Bozorgnia, 2008; Chiou & Youngs, 2008; Idriss, 2008. Por otro

lado se observa que los coeficientes  $C_1(\bar{A}_i)$  y  $C_2(\bar{A}_i)$  dependen en algunos casos de  $\bar{A}_i$ , dando origen a una ecuación de característica no lineal, la cual es resuelta por métodos numéricos.

La desviación estándar  $\beta_{Ai}$ , asociada a los valores  $\bar{A}_i$  de cada estado de daño ( $i$ ), se estiman a partir de la experiencia nacional e internacional (Kircher et al., 1997; FEMA-NIBS, 2009; Bonet, 2003; Barbat et al., 2008; Marinilli, 2008 y Safina et al., 2008). En la Tabla 2.10, se presentan los valores de  $\beta_{Ai}$  adoptados para este trabajo.

**Tabla 2.10. Valores adoptados de  $\beta_{Ai}$  para cada estado de daño.**

Edificios	1) Leve	2) Moderado	3) Severo	4) Completo
Diseñado con Normas	0,40	0,45	0,50	0,60
Mampostería	0,50	0,55	0,60	0,70

## 2.7.- Índice de Pérdida y Daño Ponderado

Dado un evento sísmico caracterizado por una aceleración ( $A$ ) del terreno, la probabilidad de ocurrencia ( $\Delta P_i$ ) de un estado de daño ( $i$ ) se obtiene de la curva de fragilidad del edificio (Figura 2.4.b). Cada estado de daño tiene un factor de pérdida ( $F_i$ ) asociado al mismo (Tabla 2.9). El índice de pérdida ( $I_p$ ) de una edificación se define ponderando las probabilidades ( $\Delta P_i$ ) y los factores de pérdida ( $F_i$ ) para todos los estados de daño:

$$I_p = \sum_{i=0}^4 \Delta P_i \cdot F_i \quad (2.21)$$

El índice de pérdida representa la pérdida media esperada y adopta valores comprendidos entre 0% y 100%. El índice  $I_p$  permite una descripción cualitativa y cuantitativa de las pérdidas para efectos de comparar edificios y tomar decisiones hacia la prevención y reducción de los riesgos sísmicos. A título de ejemplo, la aplicación de la Ecuación (2.21) con las curvas de fragilidad de la Figura 2.4.b conduce a índices de pérdida  $I_p = 0,06, 0,19, 0,49$  y  $0,78$  para las aceleraciones  $\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3$  y  $\bar{A}_4$ , respectivamente, indicativos de una pérdida Baja, Moderada, Alta y Muy Alta, respectivamente.

**Tabla 2.11. Definición del Daño Ponderado.**

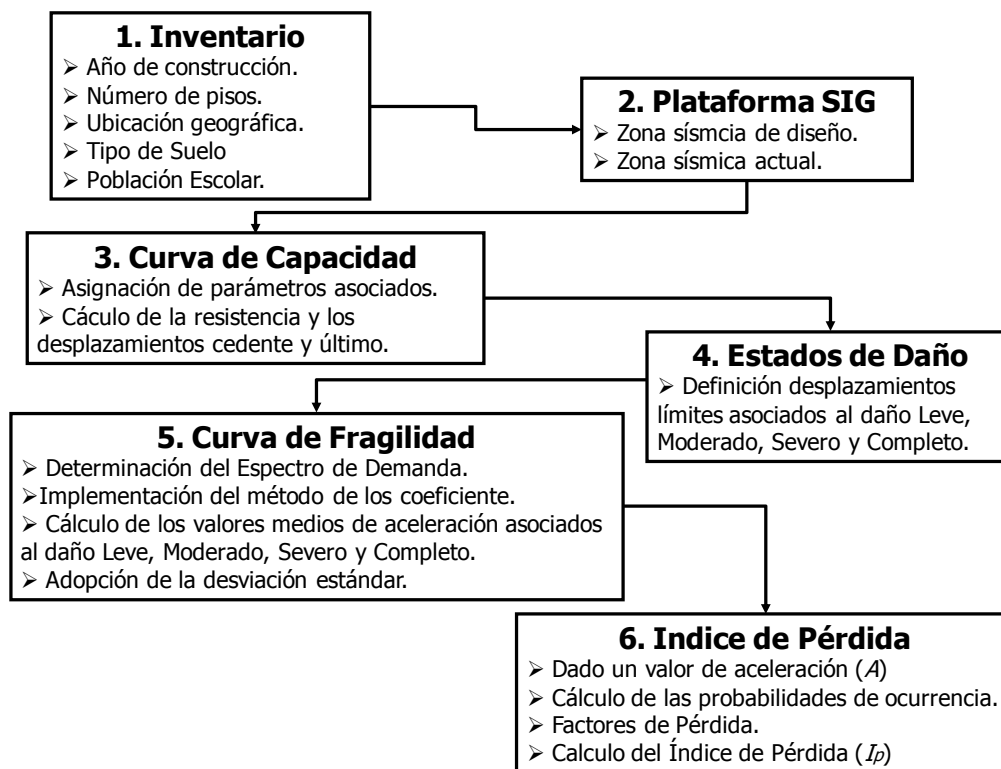
Daño Ponderado	Estado de Daño Asociado	Rangos de $I_p$
0	Sin Daño	0 – 2,5
1	Leve	2,5 – 10,5
2	Moderado	10,5 – 30,0
3	Severo	30,0 – 70,0
4	Completo	> 70,0

El valor de  $I_p$  permite representar un resultado discreto de cada edificación el cual denominamos daño ponderado. En la Tabla 2.11 se definen 5 tipos de daños ponderados asociados a rangos de valores del índice de pérdida. Esta representación discreta permite comparar posteriormente el daño ponderado, producto de aplicar esta metodología, con el

daño observado en varias escuelas durante el terremoto de Cariaco de 1997. Adicionalmente esta definición de daño ponderado facilita la interpretación de resultados expresados mediante mapas y gráficos.

## 2.8.- Implementación Computacional

La metodología antes planteada ha sido sistematizada mediante un programa computacional denominado CFSEV (Curvas de Fragilidad Sísmica para Escuelas de Venezuela) realizado bajo *Visual Basic 2008 Express Edition* (Microsoft Visual Studio, 2008). En la Figura 2.5 se muestra un esquema que resume la metodología planteada y los pasos seguidos para su programación (Coronel, 2012).



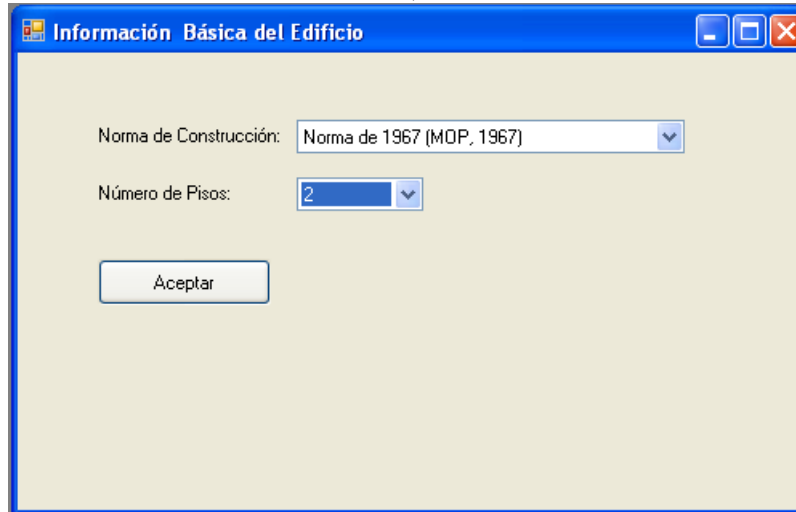
**Figura 2.5. Esquema resumen de la metodología.**

El programa contiene un ambiente visual de uso práctico mediante el cual se pueden modificar los parámetros presentes en el modelo, ajustándose así al criterio del usuario y facilitando la calibración de las curvas de fragilidad. En la Figura 2.6.a, se muestra la entrada de datos básicos (año de construcción y número de pisos) y en la Figura 2.6.b, el formulario para introducir los datos asociados a la norma. En este ejemplo se trata de un edificio a porticado de 2 pisos diseñado para la zona sísmica 3 de la norma del MOP (1967) en suelo de tipo aluvión.

El programa incorpora mediante formularios los desplazamiento asociados a cada estado de daño, el espectro de demanda el cual se puede seleccionar entre los espectros elástico de la

norma actual (COVENIN, 2001), los espectros de la microzonificación sísmica de Caracas y espectros particulares, así como la desviación estándar que se desea adoptar.

a)



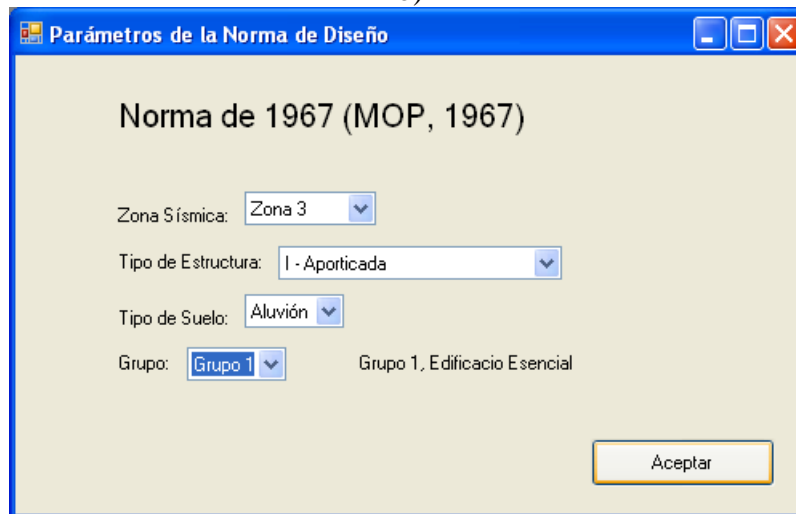
Información Básica del Edificio

Norma de Construcción: Norma de 1967 (MOP, 1967)

Número de Pisos: 2

Aceptar

b)



Parámetros de la Norma de Diseño

Norma de 1967 (MOP, 1967)

Zona Sísmica: Zona 3

Tipo de Estructura: I - Aporticada

Tipo de Suelo: Aluvión

Grupo: Grupo 1 Grupo 1, Edificio Esencial

Aceptar

**Figura 2.6. Ejemplo para un edificio de 2 pisos diseñado para la zona sísmica 3 de la norma MOP (1967): a) Entrada de datos básicos; b) Parámetros de la norma de diseño.**

En la Figura 2.7 se muestra el formulario de presentación de resultados del programa, donde se reportan los valores ingresados y los valores calculados, así como la representación gráfica de la curva de capacidad, las cuatro curvas de fragilidad para cada estado de daño y las probabilidades de excedencia y de ocurrencia de cada estado de daño para el valor de aceleración deseado, en este caso para  $0,40(g)$ .

En este ejemplo se obtiene que para un sismo que pueda ocasionar una aceleración de  $0,40g$  en donde se encuentra hipotéticamente esta escuela el  $I_p$  es de 61% lo cual corresponde según el procedimiento a un Daño Ponderado de 3 el cual está asociado al estado de Daño Severo; se observa que la probabilidad de ocurrencia del Daño Severo es  $\Delta P_3 = 0,565$  la cual es la más alta entre todas las probabilidades de ocurrencia de los otros niveles de daño.

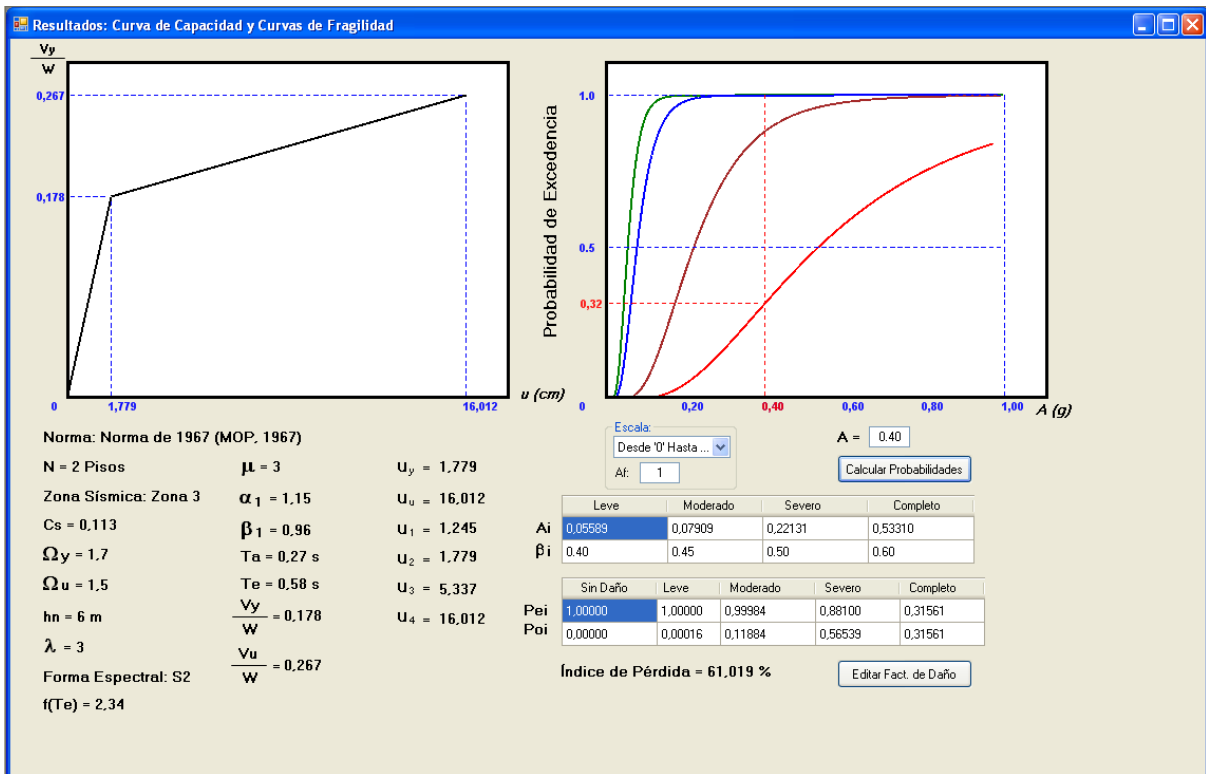


Figura 2.7. Formulario de representación de resultados del CFSEV.

## 2.9.- Comparación de Resultados

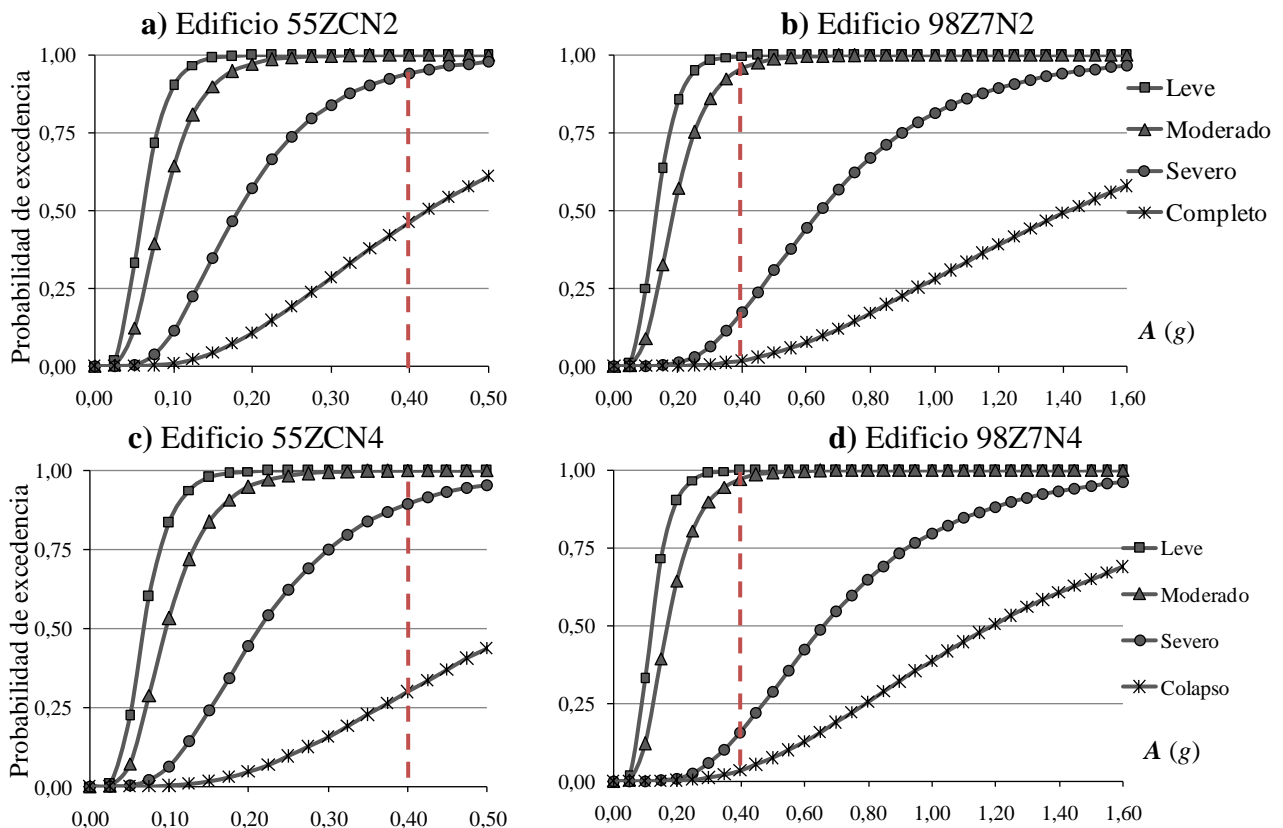
Para representar los resultados se le asigna a cada edificación un código que permite identificar la norma con la cual fue diseñado, la ubicación mediante la zona sísmica de la norma correspondiente y el número de pisos. En la Tabla 2.12 se ilustra el formato utilizado. A este código puede sumársele adicionalmente el tipo de suelo utilizado para el espectro de demanda según la norma COVENIN (2001), la cual presenta cuatro tipos S1, S2 y S3.

Tabla 2.12. Ejemplos de los códigos utilizados para identificar los edificios.

Código	Descripción
39Z1Nj	Diseñado con la norma MOP (1939), ubicado en la zona 1 (montañosa), de (Nj) pisos donde j=1, 2, 3 o 4.
47ZBNj	Diseñado con la norma MOP (1947), ubicado en la zona B (más severa), de (Nj) pisos de altura.
55ZCNj	Diseñado con la norma MOP (1955), ubicado en la zona C (más severa), de (Nj) pisos de altura.
67Z3Nj	Diseñado con la norma MOP (1967), ubicado en la zona 3 (más severa), de (Nj) pisos de altura.
82Z4Nj	Diseñado con la norma COVENIN (1982), ubicado en la zona 4 (más severa), de (Nj) pisos de altura.
98Z7Nj	Diseñado con la norma COVENIN (1998), ubicado en la zona 7 (más severa), de (Nj) pisos de altura.
01Z7Nj	Diseñado con la norma COVENIN (2001), ubicado en la zona 7 (más severa), de (Nj) pisos de altura.

### 2.9.1.- Ejemplos de Aplicación

En este ejemplo se suponen cuatro edificios escolares ubicados en la ciudad de Cumaná, Estado Sucre, aporticados de concreto reforzado, sobre un suelo caracterizado por el perfil S2 según COVENIN (2001), dos de ellos diseñados y construidos cumpliendo con lo exigido en la norma MOP (1955), uno de 2 y otro de 4 pisos y los otros dos diseñados y construidos con la norma COVENIN (2001), uno de 2 y otro de 4 pisos. El movimiento sísmico a considerar que actúa sobre los edificios está definido por el valor de la aceleración del terreno  $A$  y por la forma espectral dada en COVENIN (2001) para un suelo S2.



**Figura 2.8. Curvas de fragilidad para los cuatro estados de daño en cuatro edificios ubicados en Cumaná sobre un suelo tipo S2.**

Al aplicar la metodología antes expuesta se obtienen los resultados indicados en la Tabla 2.13 y las curvas de fragilidad que se muestran en la Figura 2.8.

Al comparar las Figura 2.8.a y 2.8.b, así como las Figuras 2.8.c y 2.8.d, se confirma que las edificaciones antiguas son relativamente más vulnerables que las modernas en términos de la probabilidad de alcanzar y exceder cada estado daño para un valor dado de aceleración  $A$ . Por otro lado al comparar las Figuras 2.8.a y 2.8.c y las Figuras 2.8.b y 2.8.d se nota una ligera reducción de la vulnerabilidad para daño completo al aumentar la altura de 2 a 4 pisos en los edificios diseñados con ambas normas.

**Tabla 2.13. Parámetros de la curva de capacidad y aceleraciones para el inicio de cada estado de daño en cuatro edificios escolares.**

Edificio	$N$	$V_y / W$	$T_e$ (seg)	$u_y$ (cm)	$u_u$ (cm)	$\bar{A}_1(g)$	$\bar{A}_2(g)$	$\bar{A}_3(g)$	$\bar{A}_4(g)$
55ZCN2	2	0,190	0,58	1,9	11,4	0,060	0,085	0,182	0,423
55ZCN4	4	0,145	0,99	4,9	29,1	0,068	0,096	0,214	0,550
01Z7N2	2	0,413	0,45	2,5	33,6	0,131	0,184	0,643	1,420
01Z7N4	4	0,332	0,76	6,5	88,4	0,119	0,169	0,661	1,909

Dado un valor de  $A= 0,40(g)$ , se obtienen las probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño y los índices de pérdida que se muestran en la Tabla 2.14. Se aprecia un aumento de entre 3,7 y 4,1 veces del índice de pérdida en los edificios de 1955 con respecto a los de 2001.

**Tabla 2.14. Probabilidades de ocurrencia ( $\Delta P_i$ ) e índice de pérdida ( $I_p$ ) para  $A=0,40(g)$ .**

Edificio	$\Delta P_0$	$\Delta P_1$	$\Delta P_2$	$\Delta P_3$	$\Delta P_4$	$I_p$
55ZCN2	0,00000	0,00028	0,05793	0,48162	0,46017	70,7 %
55ZCN4	0,00000	0,00078	0,10486	0,59629	0,29806	60,7 %
01Z7N2	0,00264	0,04008	0,78623	0,15405	0,01700	17,3 %
01Z7N4	0,00126	0,02745	0,81504	0,15172	0,00453	16,2 %

Para las mismas condiciones de sitio del ejemplo anterior se muestran los resultados para las escuelas de mampostería en las Tablas 2.15 y 2.16. Se aprecia que las escuelas de mampostería no confinada con techo pesado son las más vulnerables, le siguen las de techo liviano las cuales son tan vulnerables como las escuelas diseñadas con la norma de 1955 (Tabla 2.14).

**Tabla 2.15. Parámetros de capacidad y fragilidad para escuelas de mampostería.**

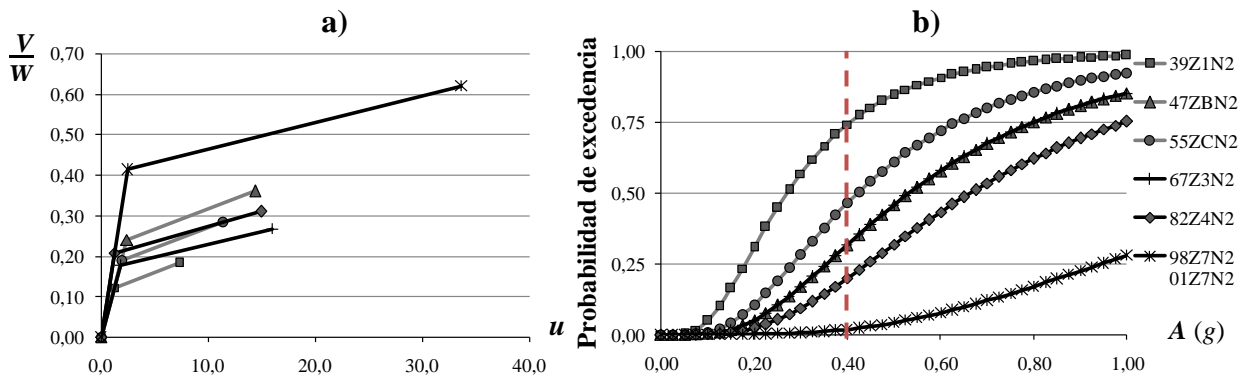
Tipo	Techo	$V_y / W$	$u_y$ (cm)	$u_u$ (cm)	$\bar{A}_1(g)$	$\bar{A}_2(g)$	$\bar{A}_3(g)$	$\bar{A}_4(g)$
Mampostería Confinada	Liviano	0,945	0,939	2,818	0,2283	0,3381	0,5487	0,8767
	Pesado	0,615	0,611	1,834	0,1486	0,2200	0,3571	0,5705
Mampostería No Confinada	Liviano	0,495	0,492	0,984	0,1196	0,1771	0,2511	0,3522
	Pesado	0,308	0,306	0,612	0,0744	0,1102	0,1562	0,2192

**Tabla 2.16. Probabilidades de ocurrencia ( $\Delta P_i$ ) e índice de pérdida ( $I_p$ ) para escuelas de mampostería para  $A=0,40(g)$  y perfil de suelo S2.**

Tipo	Techo	$\Delta P_0$	$\Delta P_1$	$\Delta P_2$	$\Delta P_3$	$\Delta P_4$	$I_p$
Mampostería Confinada	Liviano	0.13136	0.25073	0.31986	0.16882	0.12924	25,07%
	Pesado	0.02385	0.11622	0.28851	0.26640	0.30503	46.94%
Mampostería No Confinada	Liviano	0.00798	0.06146	0.15121	0.20793	0.57142	69,17%
	Pesado	0.00039	0.00925	0.04974	0.13828	0.80234	87,66%

### 2.9.2. Influencia de la Norma de Diseño y Construcción

Para observar la influencia del año de construcción del edificio sobre la estimación de daños, se presentan en las Figura 2.9.a las curvas de capacidad y en la Figura 2.9.b las curvas de fragilidad para el Estado de Daño Completo en edificaciones de dos pisos ubicadas en la ciudad de Cumaná bajo un suelo S2, diseñadas y construidas en los periodos correspondientes a cada norma. Se observa la influencia de la edad del edificio tanto en la capacidad como en la fragilidad estimada mediante la metodología expuesta.



**Figura 2.9. Edificaciones de 2 pisos ubicadas en Cumaná; a) Curvas de capacidad ( $u$  en centímetros); b) Curvas de fragilidad para el estado de Daño Completo.**

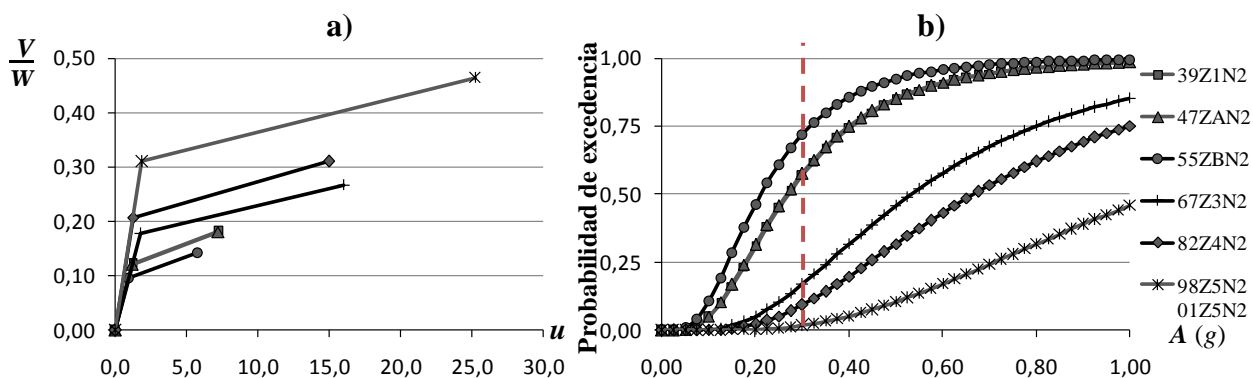
**Tabla 2.17. Probabilidad de ocurrencia para Daño Completo ( $\Delta P_4$ ) e Índice de Pérdida ( $I_p$ ) para  $A=0,40(g)$  en edificios diseñados para la Ciudad de Cumaná.**

Norma	1939	1947	1955	1967	1982	2001 (1998)
$\Delta P_4$	0,7422	0,3121	0,4602	0,3156	0,1976	0,0170
$I_p$ (%)	86,8	60,2	70,7	61,0	48,6	17,3

Por ejemplo, para  $A= 0,40g$ , valor de diseño estipulado en la norma actual para la ciudad de Cumaná, se obtienen probabilidades de exceder el Estado de Daño Completo que tienden a crecer con la antigüedad de la construcción, a excepción de la norma de 1947 (47ZBN2) con la

cual se obtiene valores menores que con la norma del 1955 (55ZCN2). En la Tabla 2.16 se muestran las probabilidades de ocurrencia y los índices de pérdida obtenidos.

En las Figuras 2.10.a y 2.10.b, se presenta un ejemplo similar al anterior pero para edificios ubicados en la Ciudad de Caracas y un suelo tipo S2. Aquí se puede notar la influencia de la ubicación del edificio en su vulnerabilidad sísmica bajo la hipótesis de cumplimiento de las normas. Se obtienen probabilidades de exceder el Estado de Daño Completo que tienden a crecer con la antigüedad de la construcción, con la excepción en este caso de la norma de 1955 (55ZBN2) con la cual se obtienen probabilidades más altas debido a que dicha norma exigía para Caracas menores fuerzas de diseño que las normas previas de 1947 y 1939.



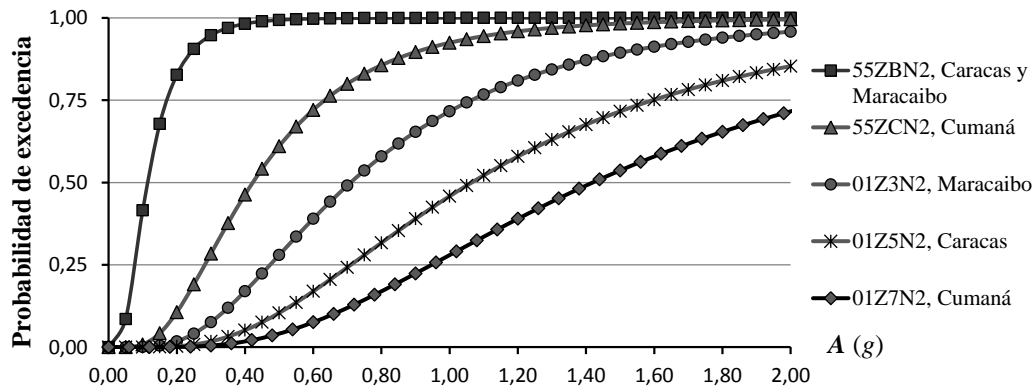
**Figura 2.10. Edificaciones de 2 pisos ubicadas en Caracas; a) Curvas de capacidad ( $u$  en centímetros); b) Curvas de fragilidad para el estado de Daño Completo.**

Dada una aceleración  $A=0,30g$ , valor de diseño estipulado en la norma actual para Caracas, los valores de la probabilidad de ocurrencia del Daño Completo ( $\Delta P_d$ ) y del Índice de Pérdida ( $I_p$ ) se muestran en la Tabla 2.17 para cada norma. Se observa que la probabilidad aumenta 33, 34, 42, 10 y 5 veces en edificios diseñados con las normas de 1939, 1947, 1955, 1967 y 1982, respectivamente, en relación a aquellos diseñados con la norma de 1998 (2001); los correspondientes índices de pérdida aumentan 4, 4, 5, 3 y 2 veces.

**Tabla 2.18. Probabilidad de ocurrencia para Daño Completo ( $\Delta P_d$ ) e Índice de Pérdida ( $I_p$ ) para  $A=0,30(g)$  en edificios diseñados para la Ciudad de Caracas.**

Norma	1939	1947	1955	1967	1982	2001 (1998)
$\Delta P_d$	0,5675	0,5754	0,7190	0,1685	0,0918	0,0170
$I_p$ (%)	77,2	77,6	85,6	47,4	34,7	17,3

En la Figura 2.11 se presentan las curvas de fragilidad para el Estado de Daño Completo de seis edificaciones de similares características, dos pisos, fundadas sobre un suelo tipo S2, tres de ellas diseñadas y construidas con la norma MOP (1955) y las tres restantes con la norma COVENIN (2001), diferenciándose entre sí por estar ubicadas en diferentes regiones de Venezuela (Cumaná, Caracas y Maracaibo).



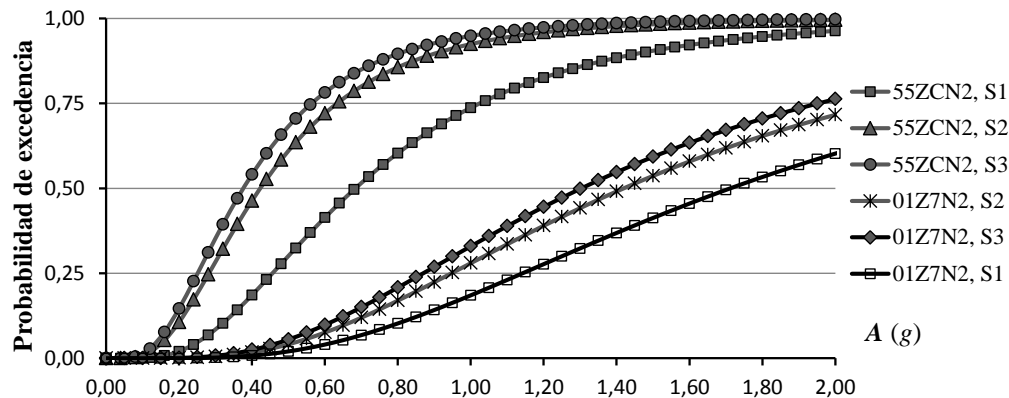
**Figura 2.11. Curvas de fragilidad para Daño Completo para edificios diseñados y construidos en Cumaná, Caracas y Maracaibo con las normas de 1955 y 2001.**

Condicionado a un valor fijo de  $A$ , se corrobora en la Figura 2.11 que son relativamente menos vulnerables las edificaciones construidas en zonas de muy alta amenaza como Cumaná que las construidas en zonas de alta y mediana amenaza como Caracas y Maracaibo, respectivamente. Esto es debido a que en las normas consideradas de 1955 y 1998 (2001) las fuerzas de diseño son mayores para Cumaná que para Caracas (Tabla 2.1). Para Maracaibo, estas fuerzas son menores que para Caracas en la norma de 2001 pero similares en la norma de 1955.

### 2.9.3.- Influencia del Tipo de Suelo

En la Figura 2.12 se presentan las curvas de fragilidad para el Estado de Daño Completo de seis edificaciones ubicadas en Cumaná, fundadas sobre suelos caracterizados como S1, S2 y S3 según COVENIN (2001). Los edificios son de similares características, de dos pisos, tres de ellos diseñados y construidos con la norma MOP (1955) en la cual no se contemplaba el tipo de suelo para el diseño, y los otros tres con la norma COVENIN (2001) tomando en cuenta la forma espectral correspondiente a cada tipo de suelo.

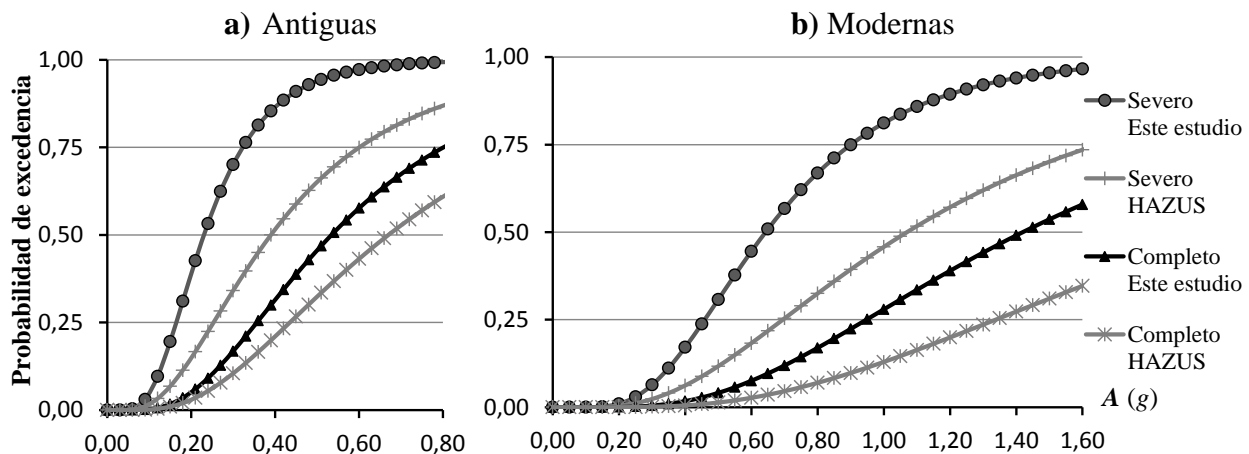
Se puede notar en la Figura 2.12 la influencia importante del tipo de suelo sobre las edificaciones antiguas diseñadas con la norma MOP (1955). Se obtiene que tienden a ser relativamente más vulnerables los edificios ubicados en suelos blandos (S3) que los ubicados en suelos densos (S2) y duros (S1). Como era de esperarse, el tipo de suelo tiene una menor influencia en la fragilidad de los edificios diseñados con la norma COVENIN (2001) dado que sus efectos son tomados directamente en consideración en el diseño.



**Figura 2.12. Curvas de fragilidad para Daño Completo estimadas para edificios diseñados y construidos en Cumaná con las normas MOP (1955) y COVENIN (2001).**

2.9.4.- Comparación con HAZUS (FEMA-NIBS, 2009)

Se comparan a continuación las curvas de fragilidad para los estados de Daño Severo y Daño Completo desarrolladas en este trabajo para edificios de 2 pisos, con las curvas implementadas en el sistema HAZUS (FEMA-NIBS, 2009) para edificios bajos (1-3 pisos), aperticados, de concreto reforzado (CL1) (FEMA-NIBS, 2009). En la Figura 2.13.a se comparan los edificios venezolanos antiguos diseñados con la norma de 1947 con las respectivas de HAZUS para un nivel de diseño bajo. En la Figura 2.13.b se comparan las curvas para edificios venezolanos modernos diseñados con la norma de 1998 (2001) con las respectivas de HAZUS para un nivel de diseño alto.



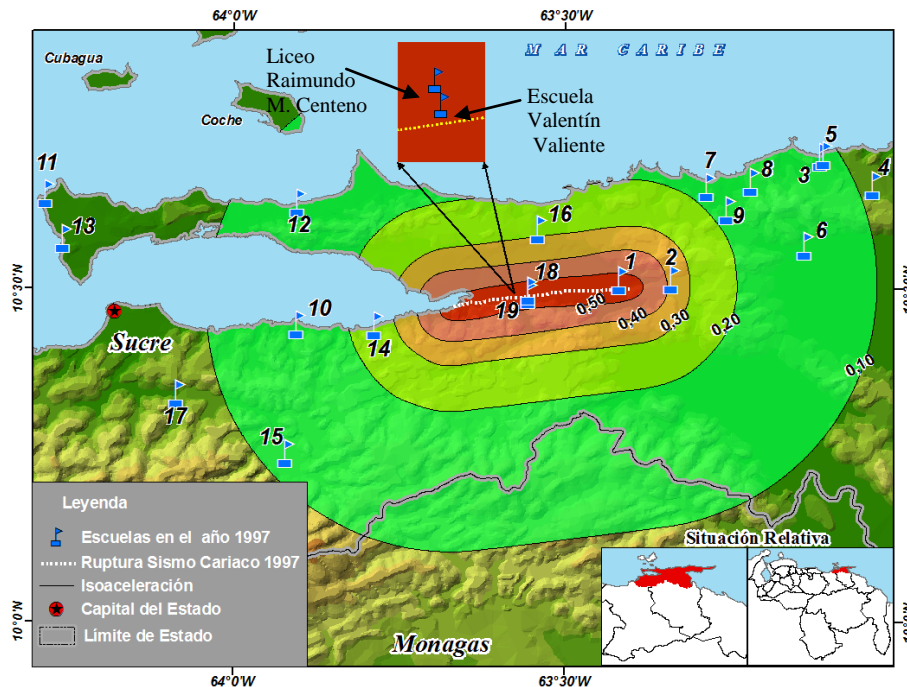
**Figura 2.13. Comparación de las curvas fragilidad para Daño Severo y Daño Completo: a) 47ZBN2 vs HAZUS (nivel de diseño bajo); b) 98Z7N2 vs HAZUS (nivel de diseño alto).**

Para el estado de Daño Severo, las curvas de este estudio indican una mayor vulnerabilidad que la obtenida con la metodología HAZUS; las medianas de la aceleración del terreno son aproximadamente un 45% mayores en HAZUS. Las diferencias entre ambos métodos se reducen para el estado de Daño Completo en el caso de escuelas antiguas, observándose

todavía una ligera mayor vulnerabilidad con la metodología de este estudio respecto a la de HAZUS.

### 2.9.5.- Evaluación de Edificios Escolares en el Sismo de Cariaco de 1997

Se seleccionaron 19 escuelas existentes para el año 1997 en el Estado Sucre, de las cuales se contó con información de su ubicación georeferenciada, características estructurales básicas, daño observado y en la mayoría de ellas las características de suelo a partir de los información recopilada como se comentó en el Capítulo 1 de este informe (FEDE, 1997; Alonso y Figuera, 1997; De Santis, 1997). Estas 19 escuelas son expuestas al evento sísmico que representa una simulación del terremoto de Cariaco de 1997 caracterizado por una magnitud ( $M_w = 6,9$ ) una profundidad focal de 10 km, con ruptura superficial de aproximadamente 30 kilómetros. Se realizó una aproximación lineal a la ruptura tomando en cuenta la geometría reportada por Audemard (2006).



**Figura 2.14. Distribución espacial de la muestra de 19 escuelas presentes en Sucre en momentos del sismo de Cariaco de 1997.**

En la Figura 2.14 se presenta la distribución espacial de las 19 escuelas seleccionadas y las curvas de isoaceleración desarrolladas utilizando la relación de atenuación de Abrahamson & Silva (1997). Se observa que tanto la Escuela Valentín Valiente (N° 18) como el Liceo Raimundo Martínez Centeno (N° 19) se encuentran en una zona con aceleraciones cercanas a 0,50g lo cual se corresponde con el valor de 0,53g reportado en (López et al., 2007).

Para la evaluación que sigue a continuación se han utilizado las más modernas relaciones de atenuación disponibles a nivel internacional, las denominadas *Next Generation Attenuation* (NGA) las cuales incorporan parámetros más detallados para distintas características del suelo (Abrahamson & Silva, 2008; Boore & Atkinson, 2008; Campbell & Bozorgnia, 2008; Chiou & Youngs, 2008; Idriss, 2008).

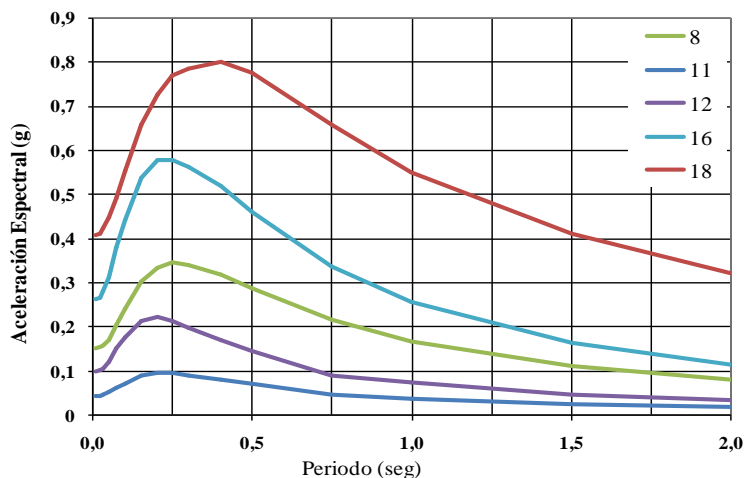
Para el uso de las relaciones de atenuación NGA se asoció de forma simplificada en la Tabla 2.19, la clasificación de la norma nacional (COVENIN 2001) con los valores de velocidad promedio de la onda de corte en los primeros 30 metros ( $V_{s30}$ ) y la profundidad de sedimentos hasta la roca  $Z_{1,0}$  y  $Z_{2,5}$  definidas éstas como las profundidades a la que se alcanzan velocidades de onda de corte de 1,0 y 2,5 km/seg, respectivamente. En este trabajo se supone que ambas profundidades son iguales, a efectos de simplificar el procedimiento.

**Tabla 2.19. Parámetros medios asociados a cada perfil de suelo de la norma COVENIN (2001).**

Perfil de Suelo	$V_{s30}$	$Z_{1,0} = Z_{2,5}$
S1	760	0
S2	325	100
S3	200	200

Se utilizó el Sistema de Información Geográfica para determinar la distancia ( $R_{rup}$ ) a la traza de ruptura superficial a la que se encontraba cada escuela y con ella se calculó la media de las aceleración máxima del terreno ( $A_j$ ) y la media de la forma espectral obtenidas de promediar las cinco relaciones de atenuación de la NGA para el sismo de Cariaco. En la Figura 2.15 se muestran los resultados para el caso particular de las escuelas 8, 11, 12, 16 y 18. La escuela número 18 corresponde al Liceo Raimundo Martínez Centeno; se puede notar que la media de valores de los NGA conlleva a aceleraciones algo menores que las estimadas previamente con las relaciones de atenuación de la anterior generación (Figura 2.14).

En la Tabla 2.20 se presentan las características de las 19 escuelas seleccionadas: Los parámetros de la curva de capacidad, el tipo de suelo, la distancia  $R_{rup}$  y la demanda en términos de aceleración del terreno ( $A_j$ ) y valor de forma espectral,  $f(T_e)$ .



Escuela	Suelo	$R_{rup}$ (km)	$A_j$ (g)
8	S3	26,10	0,15
11	S1	69,45	0,04
12	S1	30,50	0,10
16	S2	10,81	0,26
18	S3	0,47	0,41

**Figura 2.15. Formas espectrales promedio de las NGA para las escuelas 8, 11, 12, 16 y 18.**

**Tabla 2.20. Identificación de las 19 escuelas y sus parámetros de capacidad y demanda.**

Núm	Nombre	Código	$C_s$	$V_y/W$	$T_e$	$u_y$ (cm)	$u_u$ (cm)	Suelo	$R_{rup}$ (km)	$A_j(g)$	$f(T_e)$
1	U.E. José María Carrera	67Z3N3-S3	0,113	0,178	0,79	3,6	32,0	S3	0,81	0,40	1,572
2	Escuela Río Casanay	MCTL-S3	0,630	0,945	0,20	0,9	2,8	S3	6,76	0,30	1,989
3	U.E. Juan Pablo Rojas Paúl	47ZAN2-S2	0,075	0,120	0,27	1,2	7,2	S2	37,71	0,11	1,397
4	U.E. Chacaracual	55ZCN2-S2	0,138	0,190	0,58	1,9	11,4	S2	43,20	0,09	1,408
5	U.E. Carlos Francisco Grisanti	55ZCN2-S2	0,138	0,190	0,58	1,9	11,4	S2	38,38	0,10	1,398
6	U.E. Miguel Sánchez Pesquera	55ZCN2-S2	0,138	0,190	0,58	1,9	11,4	S2	29,40	0,13	1,386
7	Unidad Educativa Playa Grande	82Z4N2-S2	0,124	0,207	0,45	1,2	15,0	S2	20,43	0,18	1,750
8	U.E. Eustaquia Soledad Luiggi	47ZAN2-S3	0,075	0,120	0,58	1,2	7,2	S3	26,10	0,15	1,565
9	E.B. Santa Catalina	67Z3N3-S3	0,113	0,178	0,79	3,6	32,0	S3	19,96	0,18	1,593
10	U.E. Jesús A. Marcano	67Z3N3-S2	0,113	0,178	0,79	3,6	32,0	S2	25,53	0,15	1,191
11	E.B. Dr. Luis Napoleón Blanco	MNCTL-S1	0,450	0,495	0,20	0,5	1,0	S1	69,45	0,04	2,201
12	E.B. Nuestra Señora Del Rosario	MNCTL-S1	0,450	0,495	0,20	0,5	1,0	S1	30,50	0,10	2,240
13	U.E. Salvador Córdoba	67Z3N3-S1	0,090	0,142	0,79	2,8	25,6	S1	64,94	0,05	1,121
14	U.E. Francisco Alemán Parra	82Z4N3-S1	0,118	0,197	0,61	2,4	28,2	S1	12,95	0,21	0,967
15	E.B. Diego De Vallenilla	67Z3N3-S2	0,113	0,178	0,79	3,6	32,0	S2	36,52	0,11	1,250
16	U.E. Pedro Camejo	MCTL-S2	0,630	0,945	0,20	0,9	2,8	S2	10,81	0,26	2,192
17	E.B. Antonio Lemus Pérez	67Z3N3-S1	0,090	0,142	0,79	2,8	25,6	S1	47,58	0,09	1,250
18	Escuela Valentín Valiente	55ZCN2-S3	0,138	0,190	0,58	1,9	11,4	S3	0,47	0,41	1,705
19	Liceo Raimundo Martínez Centeno	67Z3N3-S3	0,113	0,178	0,79	3,6	32,0	S3	0,81	0,40	1,572

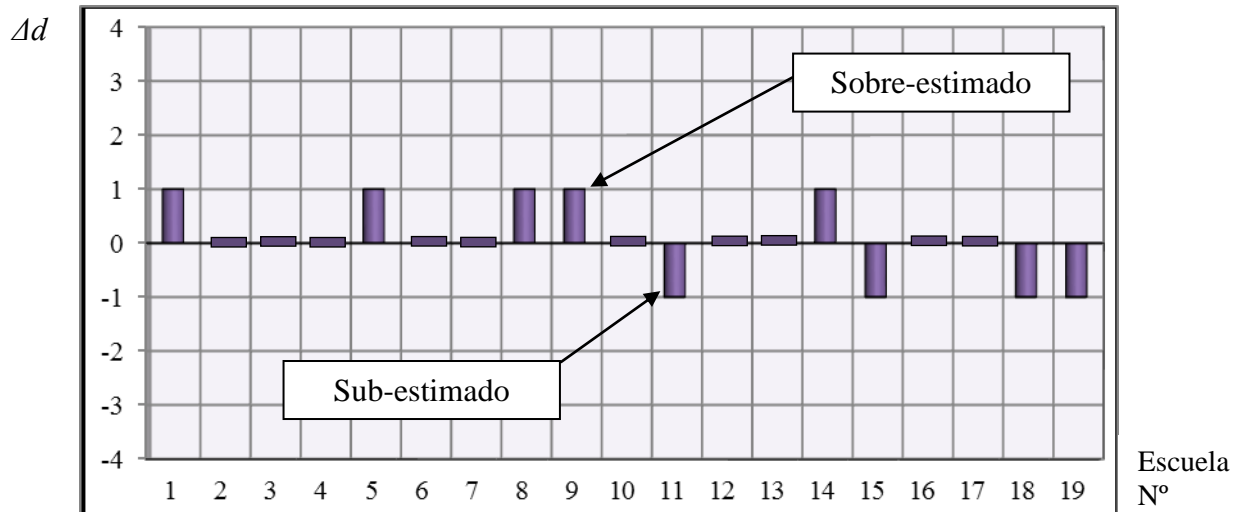
En la Tabla 2.21 se muestran los parámetros de las curvas de fragilidad, las probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño para las aceleraciones estimadas en cada escuela, el índice de pérdida y el Daño Ponderado obtenido. También se muestran el Daño Observado obtenido de la interpretación de los informes de inspección recopilados (FEDE, 1997; Alonso y Figuera, 1997; De Santis, 1997). Se define  $\Delta d$  por la diferencia entre el daño ponderado y el daño observado.

$$\Delta d = \text{Daño Ponderado} - \text{Daño Observado} \quad (2.22)$$

**Tabla 2.21. Parámetros de la fragilidad, probabilidades de ocurrencia de daño, Índice de Pérdida y comparación entre el daño ponderado y el observado.**

Num	$\bar{A}_1(g)$	$\bar{A}_2(g)$	$\bar{A}_3(g)$	$\bar{A}_4(g)$	$\Delta P_0$	$\Delta P_1$	$\Delta P_2$	$\Delta P_3$	$\Delta P_4$	$I_p$	Daño Ponderado	Daño Observado	$\Delta d$
1	0,09	0,12	0,35	0,93	0,00006	0,00409	0,38559	0,53099	0,07927	38,3	3	2	1
2	0,28	0,40	0,63	0,96	0,46017	0,24867	0,18181	0,06189	0,04746	10,2	1	1	0
3	0,06	0,09	0,19	0,45	0,08379	0,24256	0,54441	0,11960	0,00964	12,9	2	2	0
4	0,10	0,14	0,30	0,70	0,59871	0,24021	0,15354	0,00725	0,00030	2,4	0	0	0
5	0,10	0,14	0,31	0,71	0,50000	0,28230	0,20515	0,01201	0,00054	3,3	1	0	1
6	0,10	0,14	0,31	0,71	0,26435	0,31882	0,37502	0,03956	0,00226	6,6	1	1	0
7	0,09	0,12	0,40	0,89	0,03593	0,16452	0,74475	0,05101	0,00379	10,7	2	2	0
8	0,06	0,08	0,17	0,38	0,00755	0,07321	0,51795	0,34309	0,05821	28,3	2	1	1
9	0,08	0,12	0,34	0,92	0,03005	0,15401	0,71741	0,09526	0,00326	12,6	2	1	1
10	0,11	0,16	0,47	1,28	0,23885	0,32077	0,42878	0,01143	0,00017	5,5	1	1	0
11	0,12	0,19	0,27	0,39	0,98745	0,00999	0,00184	0,00000	0,00013	0,1	0	1	-1
12	0,12	0,18	0,27	0,38	0,64431	0,22003	0,08412	0,02412	0,02743	5,2	1	1	0
13	0,10	0,14	0,40	1,13	0,94845	0,03868	0,01286	0,00002	0,00000	0,2	0	0	0
14	0,15	0,22	0,08	1,90	0,22065	0,31918	0,45537	0,00468	0,00012	5,4	1	0	1
15	0,11	0,15	0,44	1,22	0,48006	0,29029	0,22701	0,00261	0,00003	2,9	1	2	-1
16	0,24	0,36	0,59	0,94	0,45224	0,27351	0,18734	0,05329	0,03362	8,4	1	1	0
17	0,09	0,12	0,36	1,01	0,45620	0,29870	0,24229	0,00277	0,00003	3,1	1	1	0
18	0,08	0,12	0,25	0,56	0,00003	0,00252	0,15131	0,54111	0,30503	59,1	3	4	-1
19	0,09	0,12	0,35	0,93	0,00006	0,00409	0,38559	0,53099	0,07927	38,3	3	4	-1

Los resultados mostrados en la Tabla 2.21 y graficados en la Figura 2.16 resaltan que de las 19 escuelas evaluadas el estado de Daño Ponderado de 10 de ellas coincide con el Daño Observado lo que representa el 53% aproximadamente, mientras que el modelo sobre-estima el daño en 5 escuelas (26%) y lo sub-estima en 4 escuelas de la muestra (21%), siendo éste el resultado más balanceado y con una pequeña tendencia a sobre estimar. Se puede apreciar que todas las escuelas que resultaron sobre-estimadas o sub-estimadas se encuentran sin embargo con una diferencia de daño  $\Delta d$  no mayor a uno. Conviene mencionar que estos resultados fueron obtenidos luego de realizar algunos ajustes a los valores de la sobrerresistencia cedente y de las desviaciones estándar del modelo, pero los valores resultantes de dichos parámetros se mantienen dentro de los rangos propuestos en FEMA (2003) tal como se indica en las Tablas 2.3 y 2.10.



**Figura 2.16. Diferencia entre el Daño Ponderado y el Daño Observado en una muestra de escuelas afectadas por el terremoto de Cariaco de 1997.**

Cabe destacar que la Escuela Valentín Valiente y el Liceo Raimundo Martínez Centeno, identificados por los números 18 y 19 respectivamente en las Tablas 2.20 y 2.21, resultaron estar subestimadas por el modelo el cual estima como más probable el daño Severo siendo en la realidad que ambas escuelas colapsaron. Sin embargo se puede notar en la Tabla 2.21 que para la Valentín Valiente existe una probabilidad de ocurrencia del daño completo de 30,5% y en el Raimundo Martínez Centeno de 9,5%, con lo cual se pone de manifiesto que el modelo probabilístico reconoce en cierta medida la posibilidad del colapso.

### 2.10.- Pérdidas Sociales y Económicas

Se asocian las pérdidas sociales al número de víctimas humanas clasificadas como Pérdidas Heridos Leves ( $P_{HL}$ ), Heridos Graves ( $P_{HG}$ ) y Fallecidos o Muertos ( $P_{FM}$ ). Estas pérdidas se calculan ponderando las probabilidades de ocurrencia para cada estado de daño con factores de pérdidas sociales ( $F_{HL}$ ,  $F_{HG}$  y  $F_{FM}$ ) como se muestra en las Ecuaciones 2.23, 2.24 y 2.25 e incorporando la población escolar ( $P_{esc}$ ) y un factor de ocupación ( $F_{ocu}$ ):

$$P_{HL} = P_{esc} F_{ocu} \cdot \sum_{i=0}^4 P_i \cdot F_{HL} \quad (2.23)$$

$$P_{HG} = P_{esc} F_{ocu} \cdot \sum_{i=0}^4 P_i \cdot F_{HG} \quad (2.24)$$

$$P_{FM} = P_{esc} F_{ocu} \cdot \sum_{i=0}^4 P_i \cdot F_{FM} \quad (2.25)$$

Para estimar las pérdidas sociales se adoptaron factores de pérdidas sociales ( $F_{HL}$ ,  $F_{HG}$  y  $F_{FM}$ ) con base en los propuestos en el ATC-13 (ATC, 1985) que han sido internacionalmente adoptados (Tabla 2.22). Los factores finalmente adoptados para este trabajo se muestran en la Tabla 2.23.

**Tabla 2.22. Factores de pérdidas sociales (heridos y fallecidos) para distintos estados de daño (tomado y procesado del ATC-13 (ATC, 1985)).**

Estado de daño	Factor de pérdida %	Factores de Pérdidas Sociales					
		Heridos Leves ( $F_{HL}$ )		Heridos Graves ( $F_{HG}$ )		Fallecidos o Muertos ( $F_{FM}$ )	
		Fracción	%	Fracción	%	Fracción	%
1	0,0		0		0		0
2	0,5	3 / 100000	0,003	1 / 250000	0,0004	1 / 1000000	0,0001
3	5,0	3 / 10000	0,03	1 / 25000	0,004	1 / 100000	0,001
4	20,0	3 / 1000	0,3	1 / 2000	0,05	1 / 10000	0,01
5	45,0	3 / 100	3	1 / 250	0,4	1 / 1000	0,1
6	80,0	3 / 10	30	1 / 25	4	1 / 100	1
7	100,0	2 / 5	40	2 / 5	40	1 / 5	20

**Tabla 2.23. Factores de pérdidas sociales (heridos y fallecidos) adoptados para cada estado de daño de este trabajo.**

Estado de daño	Factor de pérdida %	Factores de Pérdidas Sociales		
		Heridos Leves ( $F_{HL}$ )	Heridos Graves ( $F_{HG}$ )	Fallecidos o Muertos ( $F_{FM}$ )
		%	%	%
S/D	0	0	0	0
Leve	2	0,012	0,002	0,0005
Moderado	10	0,12	0,03	0,005
Severo	50	5,0	0,5	0,1
Completo	100	40	40	20

La población escolar ( $P_{esc}$ ) fue recopilada mediante el Registro Escolar Nacional 2007-2008 como se presentó en el Capítulo 1 y el factor de ocupación ( $F_{ocu}$ ) se asocia a la hora y época del año escolar en la que ocurra el terremoto.

Las Pérdidas Económicas Directas ( $P_{ECO}$ ) causadas por un terremoto particular son estimadas en bolívares a partir de la Ecuación 2.26:

$$P_{ECO} = A_c C_{uni} I_p \quad (2.26)$$

$$A_c = P_{esc} I_{ocu} \quad (2.26)$$

donde a partir de la población escolar ( $P_{esc}$ ) y un índice de ocupación nominal ( $I_{ocu}$ ) en  $m^2$ /persona, se estima el área total de construcción ( $A_c$ ) de una escuela, ya que el inventario de edificaciones no contempla este dato. El área es multiplicada por el costo unitario de construcción  $C_{uni}$  estimado en (Bs/ $m^2$ ) para estimar el costo total y luego por el índice de pérdida de cada escuela calculado para ese terremoto particular. Para el  $I_{ocu}$  se ha adoptado un valor de 3  $m^2$ /persona para zonas urbanas y 4  $m^2$ /persona para zonas rurales.

## 2.11.- Niveles de Riesgo Sísmico

Se definen cinco niveles de riesgo sísmico (Muy Bajo, Bajo, Moderado, Alto y Muy Alto) asociado a los rangos del índice de pérdida ( $I_p$ ) correspondiente al sismo de diseño con probabilidad de ocurrencia de 10% en 50 años o periodo medio de retorno de 475 años aproximadamente. Para determinar  $I_p$  en este caso se determinan las  $P_i$  de cada estado de daño ( $i$ ) a partir de las curvas de fragilidad para el valor de aceleración máxima del terreno ( $A_o$ ), correspondiente a la ubicación de cada escuela determinada simplificada a partir de un mapa de zonificación asociado a cierta probabilidad de ocurrencia o periodo de retorno, para ello se utiliza el Sistemas de Información Geográfica en el cual se han incorporado los mapas de zonificación sísmica. En la Tabla 2.23 se presentan los criterios utilizados para definir los niveles de riesgo (Coronel et al., 2010b, Coronel, 2012).

**Tabla 2.24. Definición de niveles de riesgo sísmico.**

Riesgo Ponderado	Nivel de Riesgo	$I_p$ (%)
0	Muy bajo	< 2,5
1	Bajo	2,5 – 10,5
2	Moderado	10,5 – 30,0
3	Alto	30,0 – 70,0
4	Muy alto	> 70,0

El resultado de niveles de riesgo sísmico está orientado a la priorización de edificaciones, ya que permite hacer comparaciones relativas asociadas a un evento sísmico con similar probabilidad de ocurrencia. Así mismo este resultado sirve de apoyo en la gestión del riesgo sísmico y la toma de decisiones.

## 2.12.- RiSEV: Herramienta para la Evaluación de Escenarios Sísmicos Basada en SIG

Para la estimación de daños, pérdidas y niveles de riesgo sísmico en las escuelas de Venezuela con base en el procedimiento antes descrito, se ha desarrollado una herramienta computacional en forma integrada dentro de la plataforma del Sistema de Información Geográfica (SIG) conocido como ArcGIS 9.2 (ESRI, 2009) a partir de la programación en el entorno del *Visual Basic Application* propio del sistema, la cual hemos llamado RiSEV referente a “Riesgo Sísmico en Escuelas de Venezuela”.

En la Figura 2.17, se observa en forma general la planificación y organización de la herramienta desarrollada (Coronel et al., 2010a; Coronel, 2012).

Una primera fase de entrada de datos o pre-proceso está fundamentada en una interfaz gráfica compuesta de un menú principal (Figura 2.18, 2.19a y 2.19b) y de ventanas dentro del sistema mediante las cuales se puede manejar el inventario de edificios, seleccionar y modificar los parámetros propios de la metodología tanto de la amenaza (Figura 2.19a) como de la vulnerabilidad (Figura 2.19b).

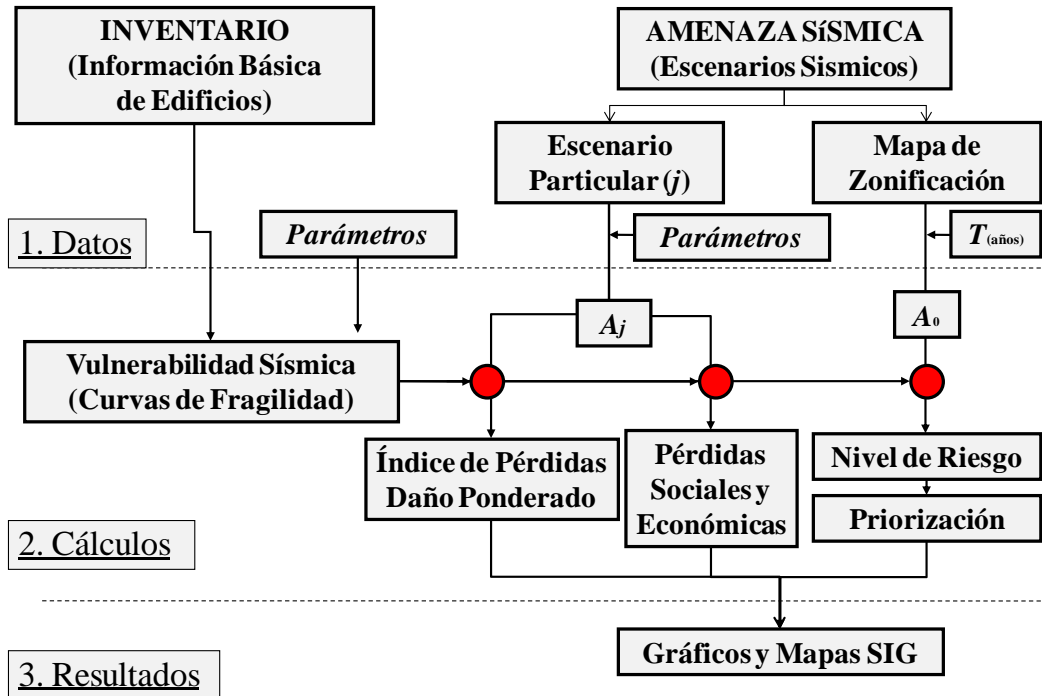


Figura 2.17. Esquema general de desarrollo de la herramienta RiSEV.

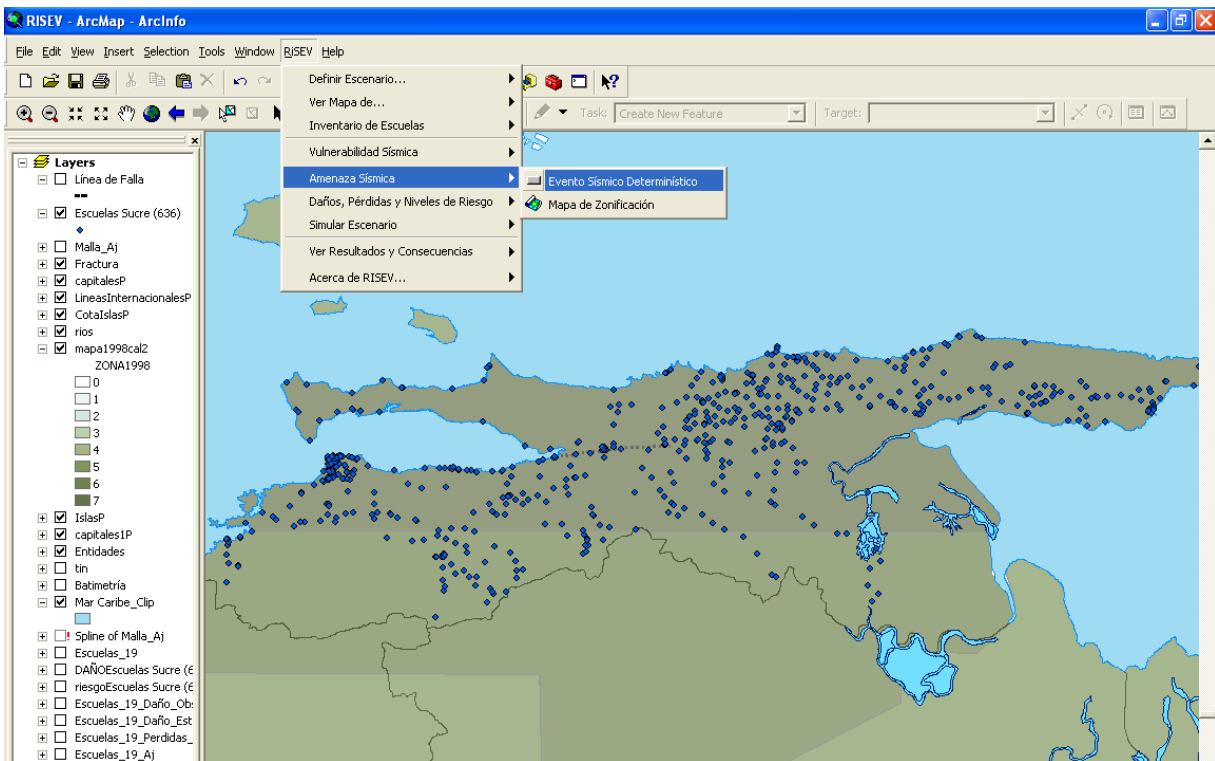
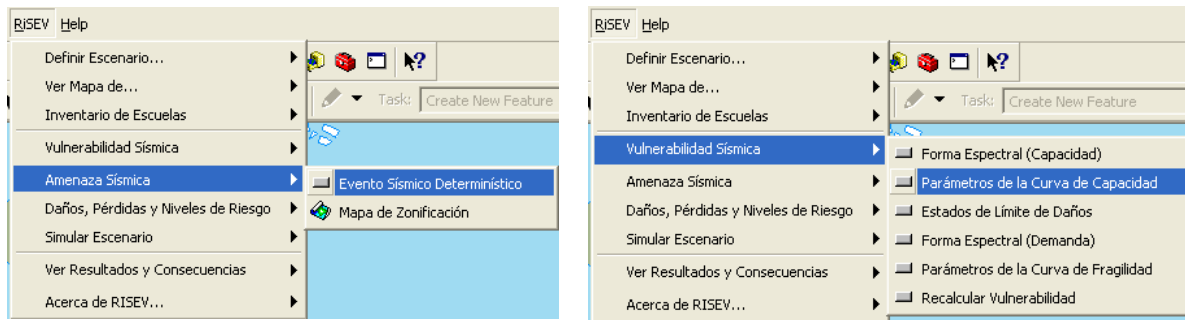


Figura 2.18. Entorno de trabajo y menú principal de la herramienta computacional.

a)

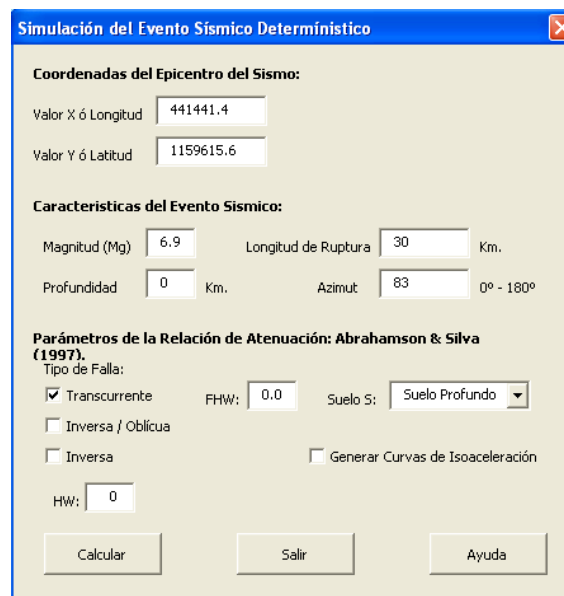
b)



**Figura 2.19. Menú Principal: a) Amenaza Sísmica; b) Vulnerabilidad Sísmica.**

La segunda fase de cálculo o proceso está dividida en tres aspectos: amenaza, vulnerabilidad y consecuencias.

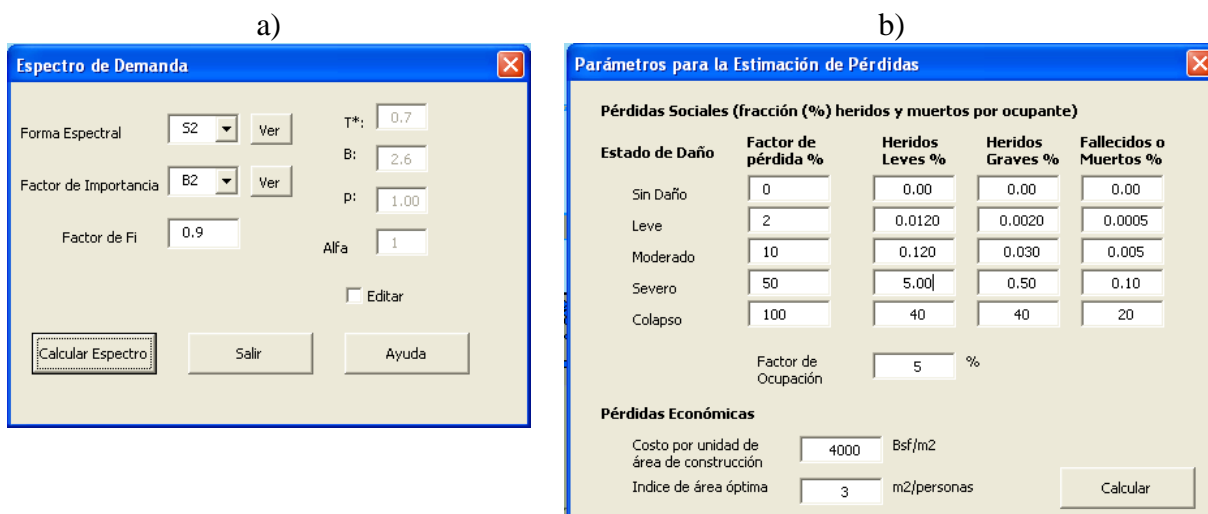
Para la amenaza se deben definir los parámetros propios de los eventos sísmicos tales como la magnitud, coordenadas de ubicación del epicentro o punto medio de la ruptura, longitud de ruptura, profundidad focal, características locales, entre otros (Figura 2.20). Mediante distintos módulos de programación se dibuja la traza de la ruptura, se determinan las distancias de cada escuela a la ruptura, se estiman las aceleraciones en cada sitio y se calculan curvas de isoaceleración.



**Figura 2.20. Simulación de un evento sísmico particular.**

Para la vulnerabilidad se deben definir los parámetros necesarios para la capacidad y el espectro de demanda (Figura 2.21a), entre otros, mediante los cuales se determinan las curvas de capacidad y las curvas de fragilidad de cada edificación.

A partir de la aceleración en cada escuela y las curvas de fragilidad se estiman las probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño. Posteriormente de acuerdo al escenario definido se determinan índices de pérdida, daños ponderados, pérdidas sociales y económicas o niveles de riesgo sísmico. Un ejemplo de datos asociados a pérdidas sociales se muestra en la Figura 2.21b.



**Figura 2.21. Manejo de parámetros: a) Espectro de demanda; b) Pérdidas sociales y económicas**

Cada sub-proceso de cálculo ha sido programado mediante módulos que permiten un mejor manejo de la información que es manejada mediante bases de datos y representada en mapas temáticos mediante el SIG.

Finalmente se tiene una tercera fase de resultados o post-proceso en la cual se representan los resultados obtenidos a través de mapas temáticos y gráficos (Coronel et al., 2010a; Coronel, 2012). En el Anexo 2.4 se presenta con más detalle la herramienta RiSEV desarrollada como parte de este proyecto.

### 2.13.- Escenarios Sísmicos para 636 Escuelas del Estado Sucre

Se evalúa sobre una muestra de 636 escuelas del Estado Sucre los efectos de dos escenarios sísmicos: i) un evento sísmico determinístico que representa una simulación del terremoto de Cariaco de 1997, cuyas características fueron descritas anteriormente, y; ii) el sismo de diseño con probabilidad de ocurrencia de 10% en 50 años o período medio de retorno de 475 años aproximadamente, para el cual se utilizó el mapa de zonificación sísmica de la norma con coeficiente de aceleración  $A_0$  de 0,35g y 0,40g para las zonas 6 y 7 respectivamente. Para el primero de ellos se determinan daños y pérdidas sociales y económicas y para el segundo niveles de riesgo sísmico (Coronel y López, 2012b).

#### 2.13.1.- Aceleraciones para el Terremoto de Cariaco de 1997.

El escenario del terremoto de Cariaco de 1997 de magnitud  $M_w=6,9$ , da origen a aceleraciones del terreno en suelo levemente mayores a 0,50g en las zonas cercanas. Se ha supuesto una distribución homogénea de suelo para todo el escenario al no poseer información más detallada. Al implementar relaciones de atenuación (Abrahamson & Silva, 1997) se obtiene una distribución de aceleraciones uniforme entorno a la ruptura superficial como se observa en la Figura 2.22.

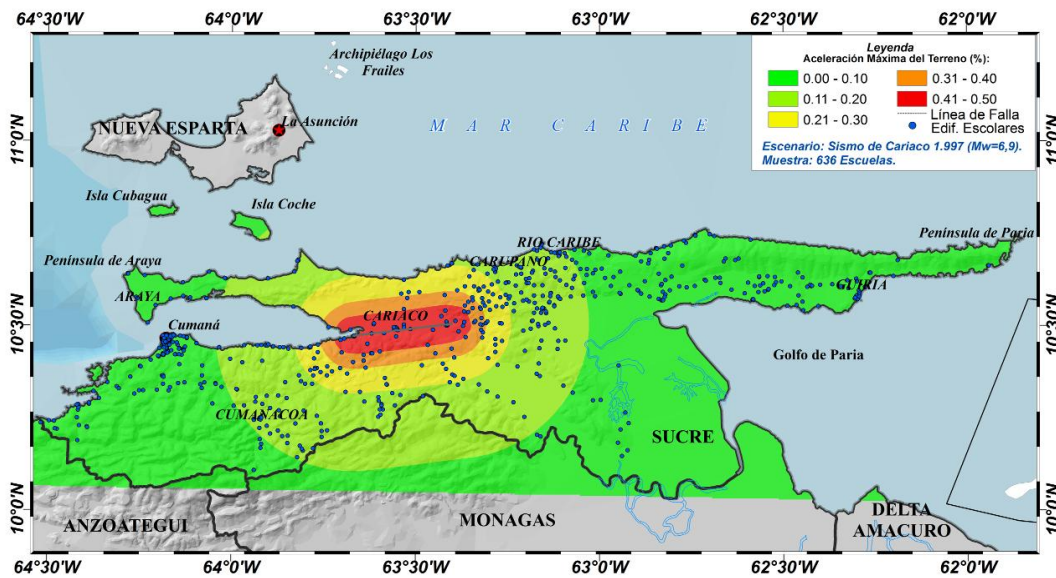


Figura 2.22. Distribución Espacial de las Aceleraciones Máximas del Terreno para el Sismo de Cariaco de 1997.

### 2.13.2.- Índices de Pérdida: Terremoto de Cariaco 1997

Para el escenario planteado se determinaron los índices de pérdida mediante la aplicación de la herramienta RiSEV. En la Figura 2.23 se presenta la distribución espacial del  $I_p$  mediante una representación puntal con cinco rangos: a) de 0 y 20%; b) entre 21 y 40%; c) 41 y 60%; d) 61 y 80% y; e) mayores a 80%. Se encontró para cada rango los siguientes porcentajes de escuelas respecto al total: a) 71,1%; b) 10,8%; c) 5,0%; d) 4,7% y; e) solo un 0,3%. Otra representación de este resultado se muestra en la Figura 2.24 haciendo uso de las herramientas del SIG. Se observan zonas de colores que permiten identificar los lugares de concentración de los  $I_p$  más altos. Esta distribución espacial es útil para la planificación.

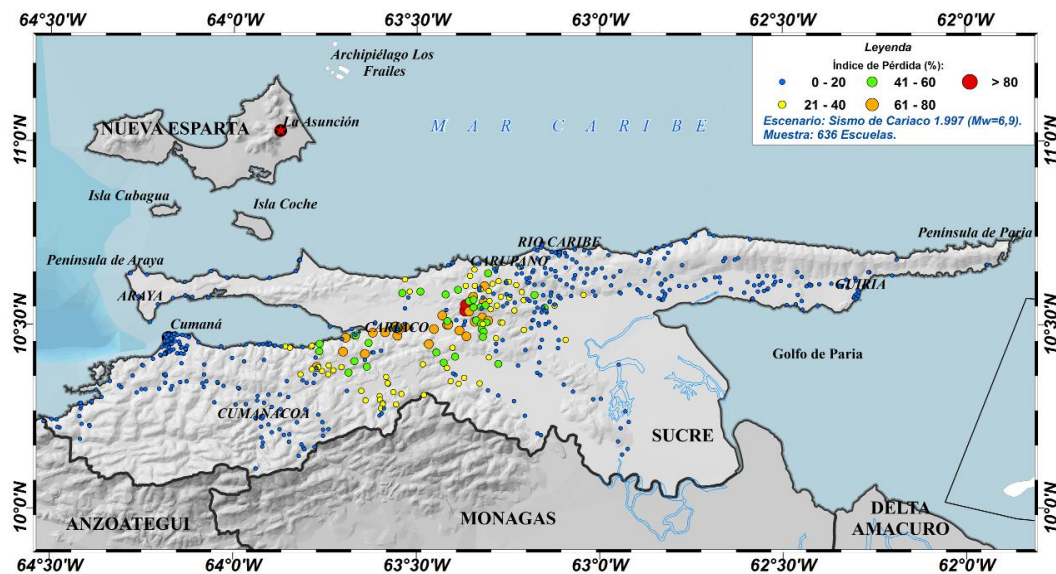


Figura 2.23. Distribución espacial del Índice de Pérdida por Escuela para el Escenario del Sismo de Cariaco de 1997.

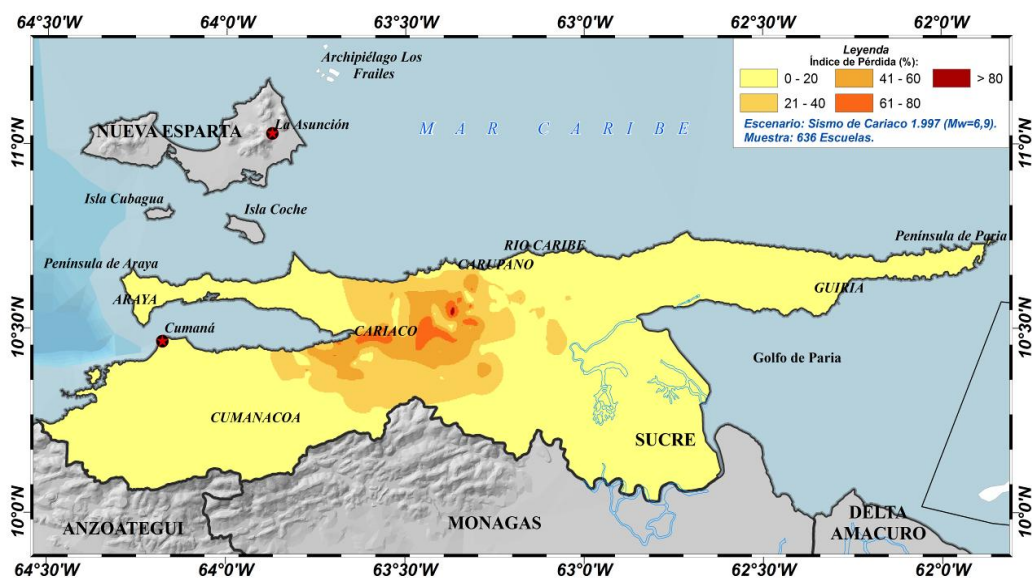
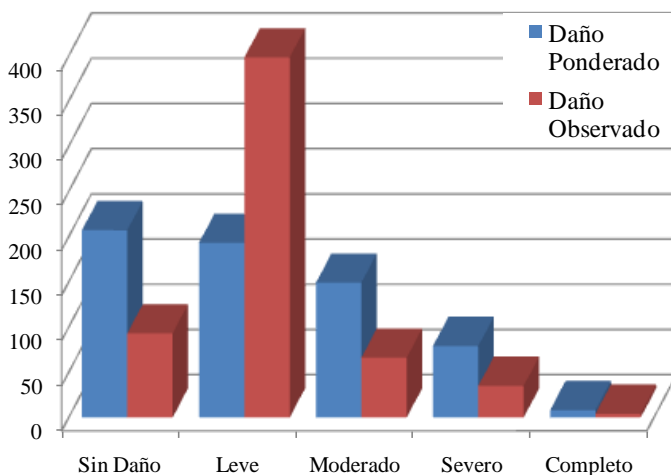


Figura 2.24. Distribución espacial del Índice de Pérdida por Zonas para el Escenario del Sismo de Cariaco de 1997.

### 2.13.3.- Daño Ponderado y Daño Observado

Como elemento de comparación y verificación se contrastan y analizan los resultados obtenidos de Daño Ponderado en la muestra de 636 escuelas con los daños observados en el sismo de Cariaco de 1997 de un grupo de 596 escuelas inspeccionadas (FEDE, 1997; Alonso y Figuera, 1997). En la Figura 2.25 se presentan las cantidades y porcentajes de escuelas por nivel de daño.



		Sin Daño	Leve	Moderado	Severo	Completo	
Daño Ponderado	Cant.	207	193	149	79	8	636 en total
	%	32,5%	30,3%	23,4%	12,4%	1,3%	
Daño Observado	Cant.	93	398	66	35	4	596 en total
	%	14,6%	62,6%	10,4%	5,5%	0,6%	

Figura 2.25. Distribución porcentual de los daños ponderados y daños observados debidos al sismo de Cariaco de 1997.

De la Figura 2.25 se puede resaltar una aproximación aceptable en el nivel de daño completo, con leves diferencias para los daños moderados y severos e importantes diferencias en los niveles de daño leve y sin daño.

Estos resultados pueden interpretarse con las descripciones de daño de la Tabla 2.9, en la que se acepta que para el estado Sin Daño Estructural en ciertos casos pudieran existir pequeños daños en elementos no estructurales, por lo que algunos edificios pudieron ser catalogados como de Daño Leve debido a la presencia de daños no estructurales.

En la Figura 2.26 se presenta la distribución espacial del Daño Ponderado, donde se observa la concentración de daño en el poblado de Cariaco debido a la cercanía a la traza de la falla.

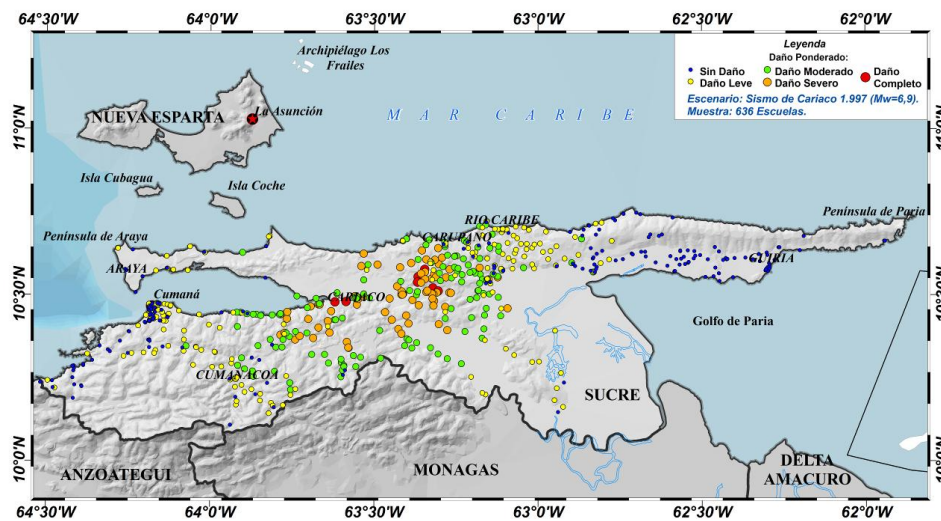


Figura 2.26. Distribución espacial del Daño Ponderado.

#### 2.13.4.- Probabilidades de Daño

Se presenta en la Figura 2.27 la distribución espacial de la probabilidad de ocurrencia del Daño Completo por escuela, observándose valores mayores a 60% en las cercanías de Cariaco.

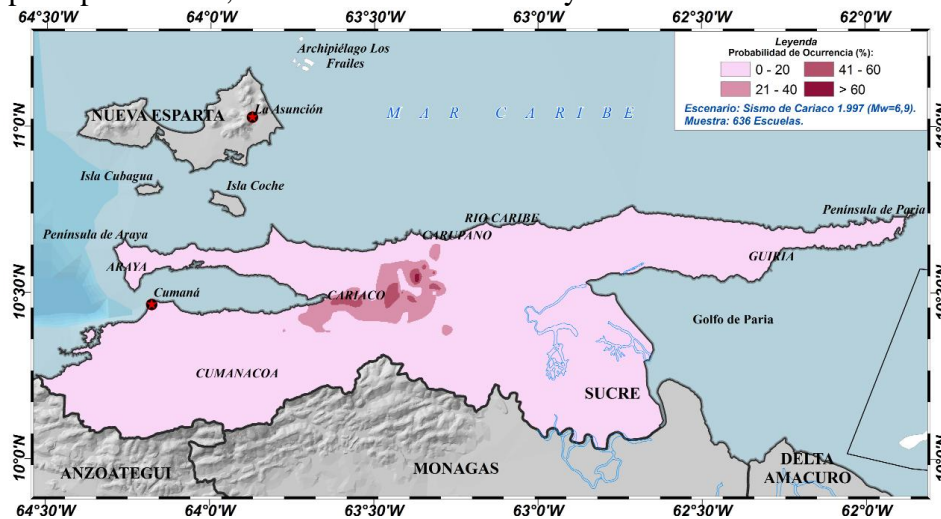


Figura 2.27. Distribución espacial de probabilidad de ocurrencia del Daño Completo.

2.13.5.- Pérdidas Sociales y Económicas

Se estimaron pérdidas sociales en términos de posibles heridos leves, heridos graves y fallecidos. En la Figura 2.28 se muestra la distribución espacial de las posibles pérdidas sociales fatales si se repitiera un sismo como el escenario de Cariaco de 1997. Se observan zonas cercanas a la ruptura en las que pudiera existir al menos 2 fallecidos por escuela.

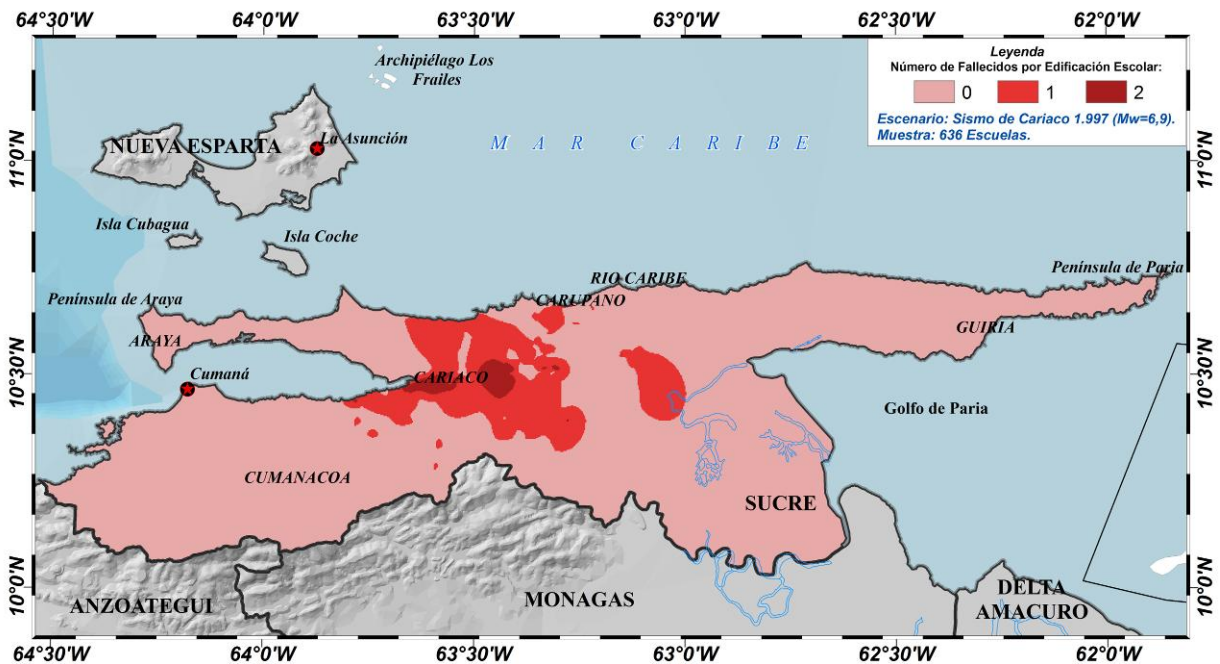


Figura 2.28. Distribución espacial de pérdidas sociales como posibles fallecidos por edificio escolar.

Totalizando los resultados de pérdidas sociales se obtiene el gráfico de la Figura 2.29, donde se observa que pudieran producirse hasta 92 heridos leves, 82 heridos graves y 41 posibles pérdidas fatales (fallecidos o muertos), para un total de 215 afectados. En el terremoto de Cariaco se reconoce fallecieron 23 personas en las edificaciones escolares colapsadas, con lo cual se puede decir que lo predicho en este trabajo representa un número aceptable a fin de que sea utilizado con fines de planificación, prevención y atención de emergencias.

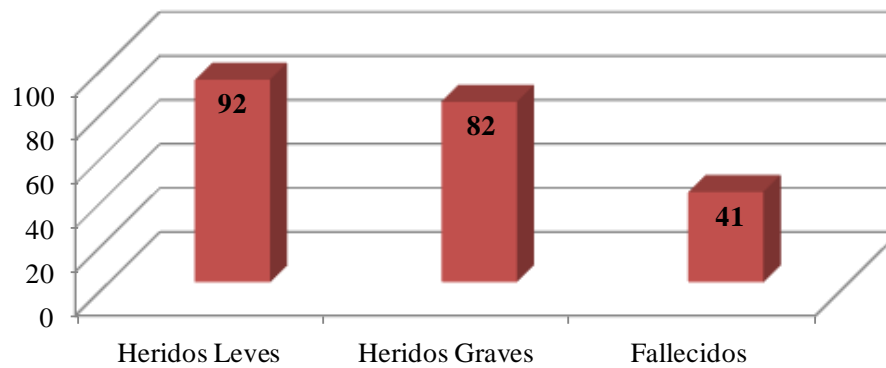


Figura 2.29. Distribución porcentual de pérdidas sociales.

Para esta aplicación, en una muestra de 636 escuelas del Estado Sucre, se estimó que las pérdidas económicas totales debidas a daños directos sobre la planta física escolar de la zona pudieran ser en el orden de 190 millones de Bolívares. En la Figura 2.30 se puede observar un mapa de distribución espacial de pérdida económica por escuela. Se puede observar las zonas más oscuras donde se estiman la pérdidas de 3 millones en algunas escuelas.

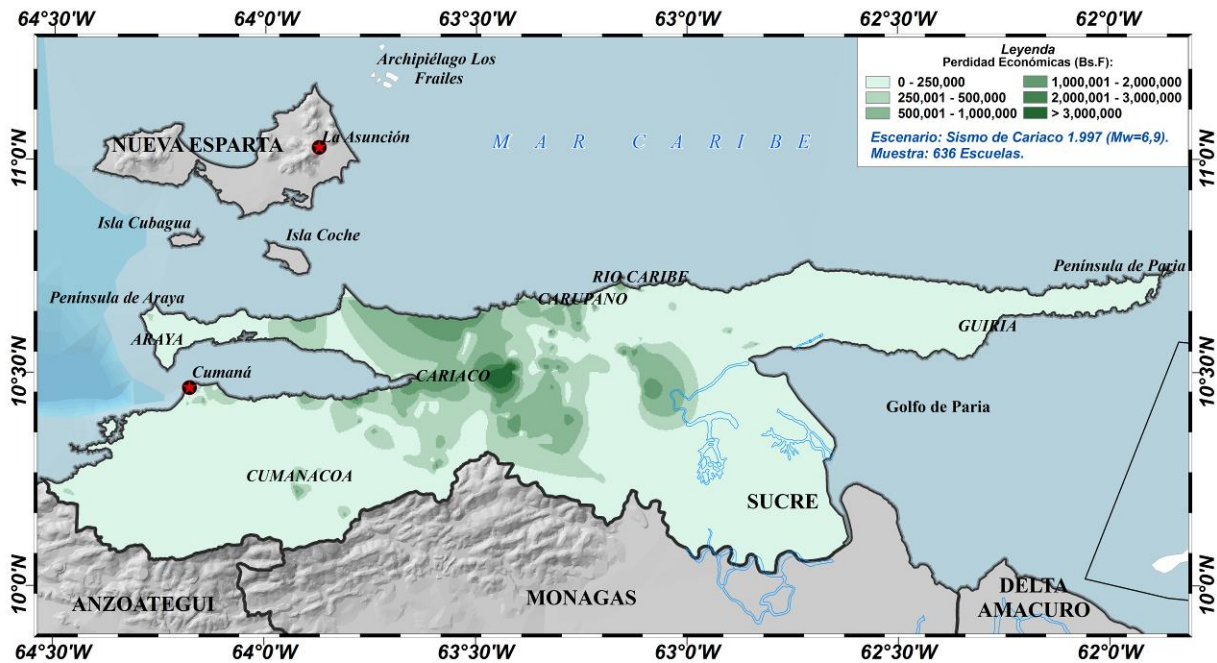


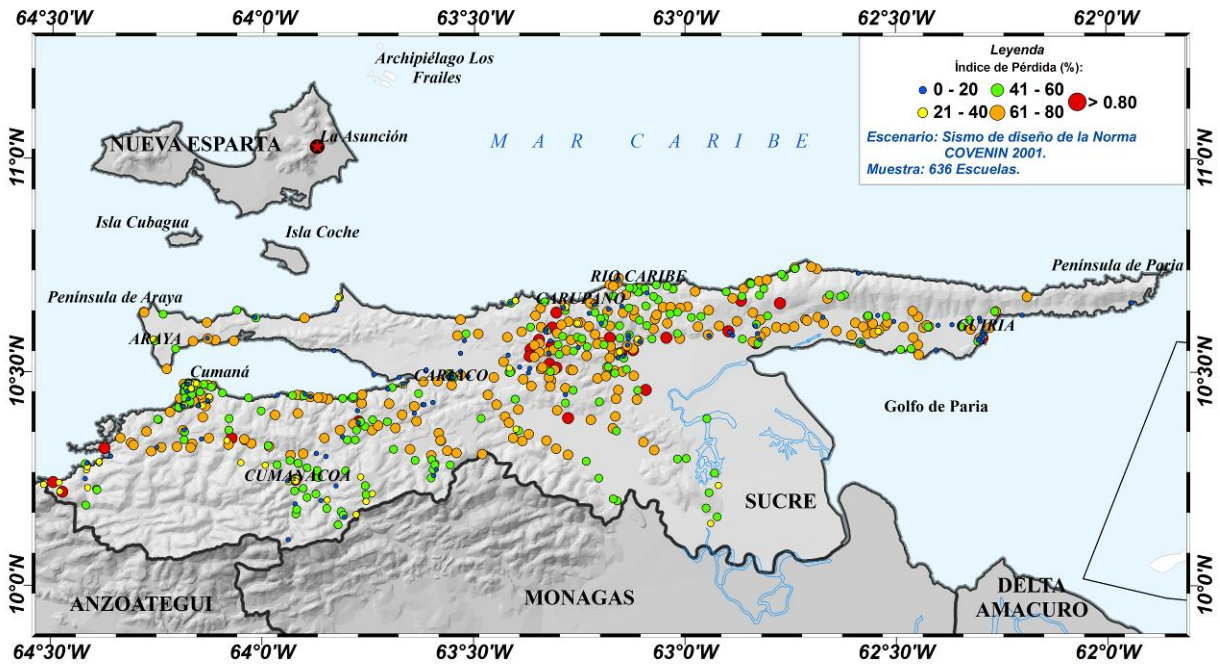
Figura 2.30. Distribución espacial de pérdidas económicas en Bolívares.

#### 2.13.6.- Índices de Pérdida y Niveles de Riesgo: Sismo de Diseño COVENIN (2001)

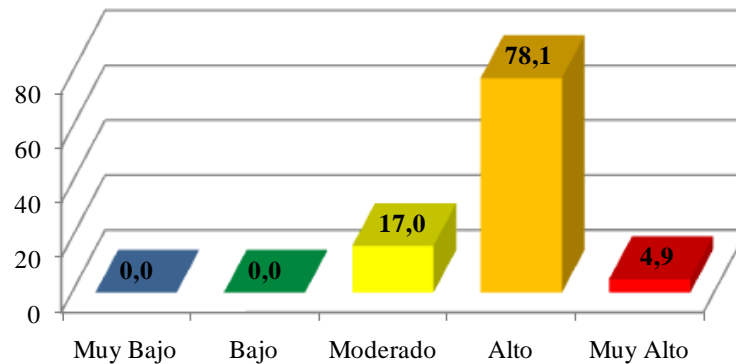
Con el objetivo de priorizar futuras acciones orientadas a la gestión de riesgo sísmico en las escuelas de Sucre, se presentan los  $I_p$  para el escenario del sismo de diseño de la norma COVENIN (2001) el cual está asociado a un periodo medio de retorno de 475 años aproximadamente. Esto se logra incorporando los valores de aceleración  $A_o$  de 0,35g y 0,40g para las zonas 6 y 7 respectivamente.

Los resultados de este escenario muestran que 31 escuelas (4,9%) del total presentan un valor crítico del  $I_p$  el cual supera el 80% por lo que se consideran prioritarias para pasar a la fase de evaluación detallada. Luego se encuentra un segundo grupo en el orden de prioridad de 251 escuelas (39,5%) con valores de  $I_p$  en el rango  $0,61 < I_p < 0,80$ . La distribución espacial de estos resultados puede verse en la Figura 2.31 en el cual se nota que al utilizar un nivel de amenaza uniforme se obtiene resultados distribuidos espacialmente y acorde a las características de vulnerabilidad de cada edificación.

Luego agrupando los resultados en los rangos antes asociados a niveles de riesgo sísmico (Tabla 2.24) podemos observar en el gráfico de la Figura 2.32 que 4,9% son clasificadas en riesgo sísmico Muy Alto, un alarmante 78,1% en riesgo Alto y finalmente un 17,0% como Moderado. En total un 83% presentan niveles de riesgo de Alto a Muy Alto.



**Figura 2.31. Distribución espacial de Índices de Pérdida por Escuela para el Escenario del Sismo de diseño de la norma COVENIN (2001).**



**Figura 2.32. Distribución Porcentual de Niveles de Riesgo Sísmico para el Escenario del Sismo de Diseño de la Norma COVENIN (2001).**

Estos resultados son complementados en el Anexo 2.5 en el cual se muestran los mapas de resultados de ambos escenarios.

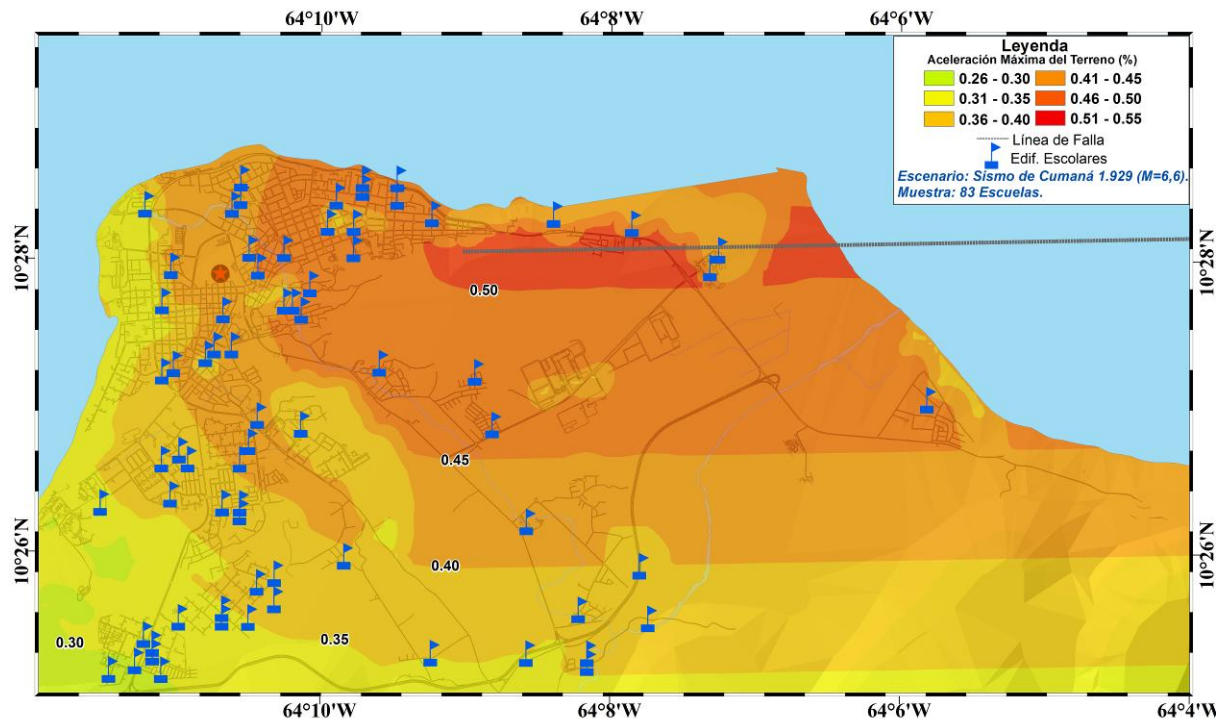
#### 2.14.- Escenarios Sísmicos para 83 Escuelas de la Ciudad de Cumaná

Se expone una muestra de 83 escuelas de la Ciudad de Cumaná a dos escenarios sísmicos: i) un evento sísmico determinístico que representa una simulación del terremoto de Cumaná de 1929 de magnitud 6,6 cuya ruptura atravesó la ciudad, y; ii) el sismo de diseño con probabilidad de ocurrencia de 10% en 50 años o período medio de retorno de 475 años aproximadamente, para el cual se utilizó el mapa de zonificación sísmica de la norma con

coeficiente de aceleración  $A_o$  de 0,40g para la Zona 7. Se han incorporado las características locales de suelo a partir del mapa reportado por Grases et al., (2004). Para el primero de ellos se determinan daños y pérdidas sociales y económicas y para el segundo niveles de riesgo sísmico (Coronel y López, 2012b).

#### 2.14.1.- Aceleraciones para el Terremoto de Cumaná de 1929.

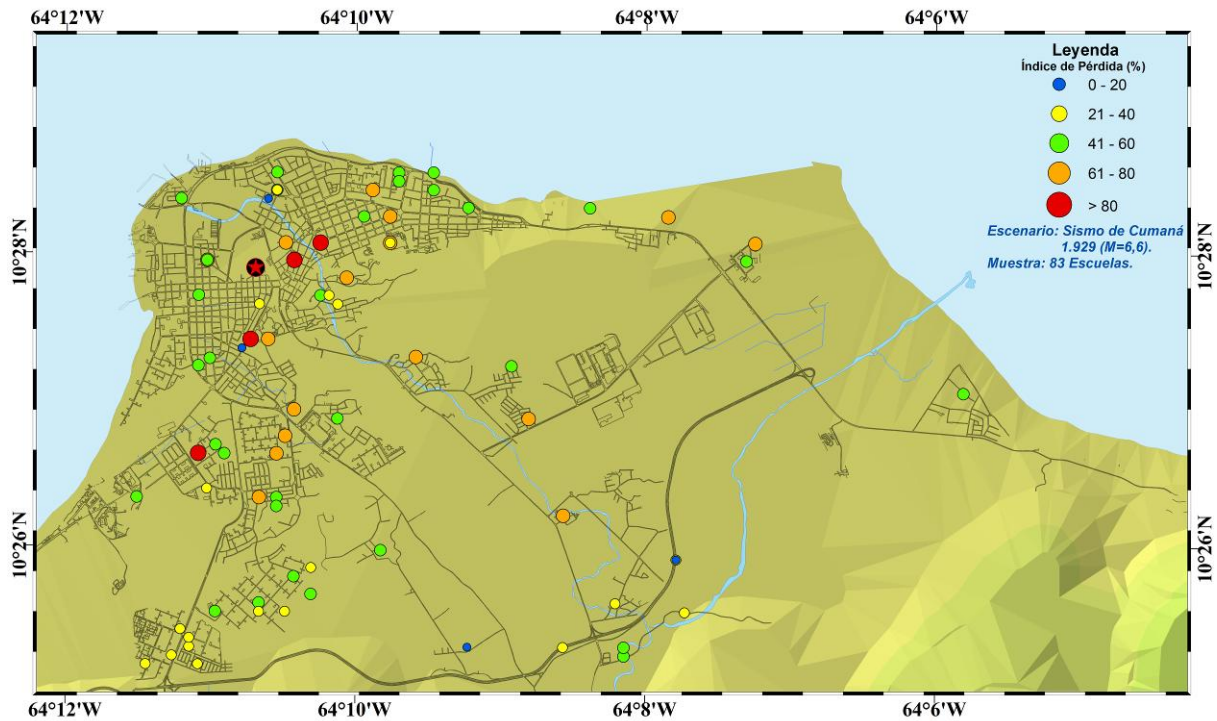
El escenario del terremoto de Cumaná de 1929 de magnitud 6,6, cuya ruptura superficial entró cerca de 4 km en la Ciudad (Audemard, 2007) da origen a aceleraciones del terreno de levemente mayores a 0,50g en las zonas cercanas (Figura 2.33) para las condiciones de suelo S1, S2 y S3 conocidas en cada sitio por el mapa publicado por Grases et al., (2004), el cual se presentó en el Capítulo 1. Se han ajustado la aceleraciones  $A_j$  y formas espectrales al promedio de las relaciones de atenuación de la NGA (Abrahamson & Silva, 2008; Boore & Atkinson, 2008; Campbell & Bozorgnia, 2008; Chiou & Youngs, 2008; Idriss, 2008). Al implementar relaciones de atenuación se obtiene una distribución de aceleraciones uniforme alrededor de la traza de ruptura superficial como se observa en la Figura 2.22, tomando en cuenta las características de suelo. En el Anexo 2.6 se muestra la distribución de aceleraciones en roca.



**Figura 2.33. Distribución Espacial de las Aceleraciones Máximas del Terreno para el Escenario del Sismo de Cumaná de 1929.**

#### 2.14.2.- Índices de Pérdida: Terremoto de Cumaná de 1929.

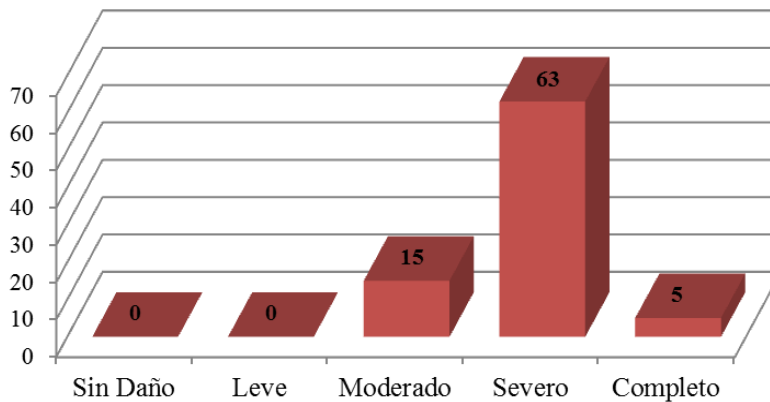
En la Figura 2.34 se muestran los valores del Índice de Pérdida ( $I_p$ ) (Tabla 2.11) donde se destaca que cinco escuelas presentan un  $I_p$  mayor de 80%, asociadas a un Daño Completo.



**Figura 2.34. Distribución Espacial del Índice de Pérdida por Escuela para el Escenario del Sismo de Cumaná de 1929.**

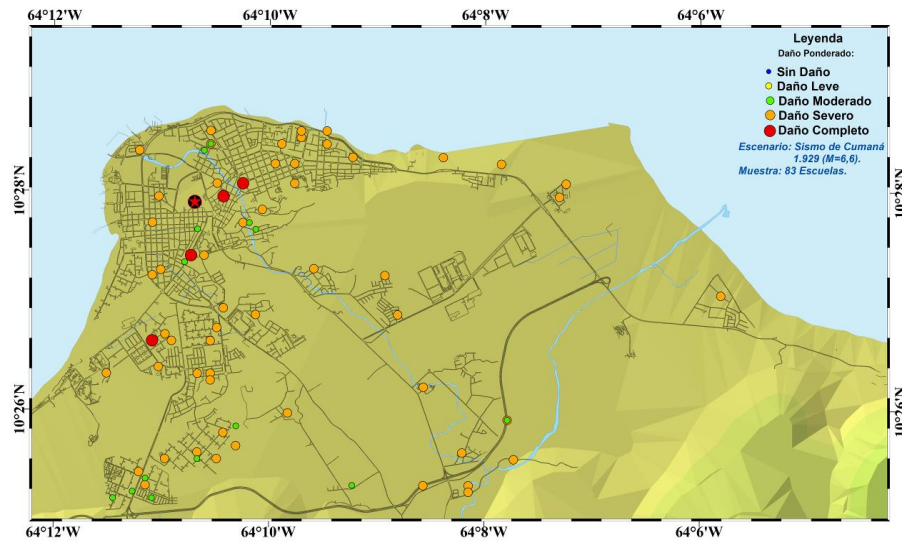
2.14.3.- Daño Ponderado

En el gráfico de la Figura 2.35 se muestra la distribución porcentual de daño ponderado y en la Figura 2.36 la distribución espacial.



**Figura 2.35. Distribución porcentual del Daño Ponderado.**

Se observa que de 83 escuelas solo 5 (6%) resultarían probablemente con daño completo, mientras que la mayoría de ellas representadas por un 75% (63 escuelas) resultarían con daño severo.

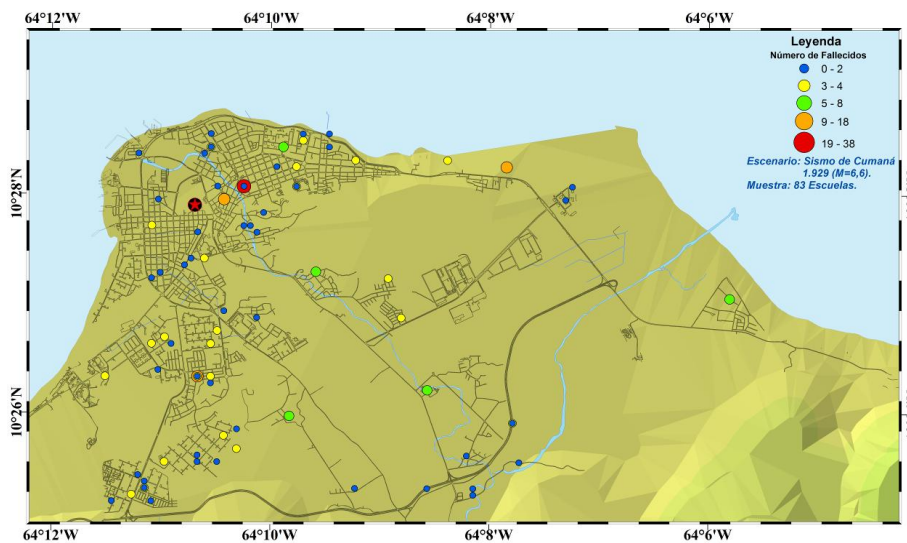


**Figura 2.36. Distribución Espacial del Daño Ponderado por Escuela para el Escenario del Sismo de Cumaná de 1929.**

#### 2.14.4.- Pérdidas Sociales y Económicas

En términos de pérdidas sociales se estima que pudieran resultar afectadas 1.116 personas de las cuales 469 serían posibles heridos leves, 432 heridos graves y 215 fallecidos o muertos. En la Figura 2.37 se muestra la distribución espacial de posibles fallecidos por escuela donde se resaltan tres escuelas, en una de ellas se estiman más de 19 pérdidas de vidas y las otras dos entre 9 y 18, el resto de estos mapas se pueden consultar en el Anexo 2.6 de este mismo Capítulo.

Para este escenario se estimó que las pérdidas económicas totales debidas a daños directos sobre la planta física escolar de la zona sería en el orden de 250 millones de Bolívares, solamente sobre la muestra de las 83 escuelas consideradas.



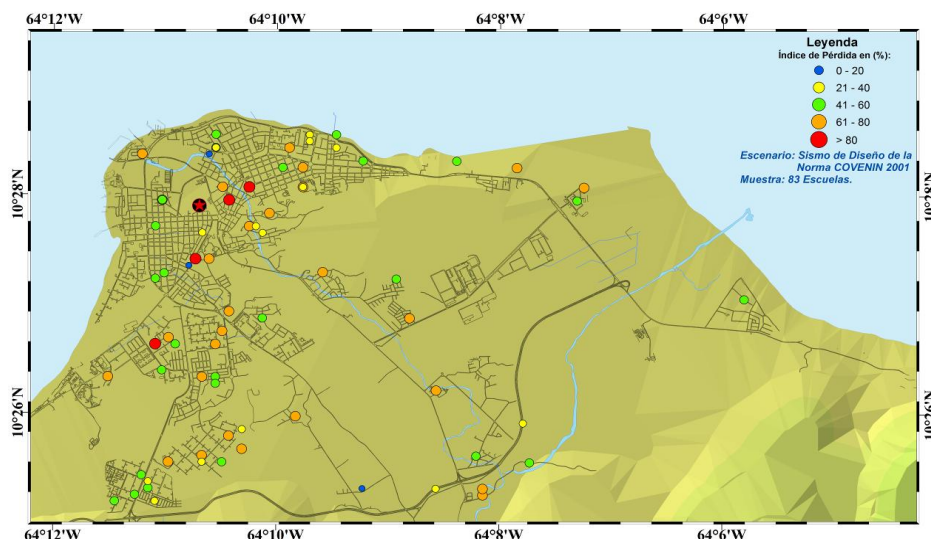
**Figura 2.37. Distribución Espacial de Posibles Fallecidos debido a un Sismo similar al de Cumaná de 1929.**

### 2.14.5.- Índices de Pérdida y Niveles de Riesgo: Sismo de Diseño COVENIN (2001)

A fin de priorizar futuras acciones de gestión de riesgo sísmico en este grupo de 83 escuelas de la Ciudad de Cumaná, se presentan los valores del Índice de Pérdida ( $I_p$ ) para el escenario del sismo de diseño de la norma COVENIN (2001) el cual está asociado a un periodo medio de retorno de 475 años aproximadamente. Para el caso de Cumaná se utilizó el valor de aceleración  $A_o$  de 0,40g correspondiente a la Zona 7.

Los resultados de este escenario son muy similares al del sismo de 1929 dado que las aceleraciones que este evento produce en el entorno de Cumana son muy similares a las del sismo de la norma. Las mismas 5 escuelas resultan ser las que requieren atención prioritaria, mientras que 30 de las 83, cerca de un 36%, presentan un  $I_p$  en el rango  $0,61 < I_p < 0,80$ .

Analizando los niveles de riesgo se encuentra que se obtiene un resultado similar al escenario del sismo de 1929. En riesgo Muy Alto están las cinco escuelas antes resaltadas, en un nivel de riesgo Alto están un 75% de las escuelas y en riesgo Moderado solo están un 15% de ellas.



**Figura 2.38. Distribución Espacial de Índices de Pérdida por Escuela para el Escenario del Sismo de diseño de la norma COVENIN (2001).**

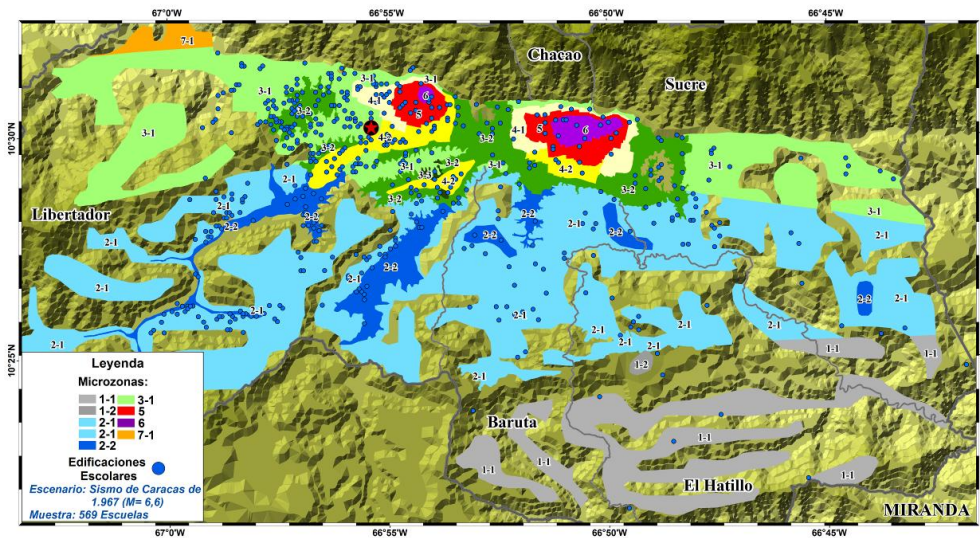
### 2.15.- Escenarios Sísmicos para 569 Escuelas del Área Metropolitana de Caracas

Se expone una muestra de 569 escuelas del Área Metropolitana de Caracas a dos escenarios sísmicos: i) un evento sísmico determinístico que representa una simulación del terremoto de Caracas de 1967 de magnitud 6,6 cuya ruptura estuvo a aproximadamente 25 km de la ciudad, y; ii) el sismo de diseño con probabilidad de ocurrencia de 10% en 50 años o período medio de retorno de 475 años, para el cual se utilizó el mapa de zonificación sísmica de la norma con coeficiente de aceleración  $A_o$  de 0,30g para las Zona 5 y se incorporó el mapa de microzonificación sísmica de Caracas (FUNVISIS, 2009) el cual presenta valores de  $A_o$  iguales a 0,265g, 0,28g y 0,30g dependiendo de la ubicación de la escuela. Se han incorporado las características de suelo, los efectos locales y las formas espectrales de la microzonificación

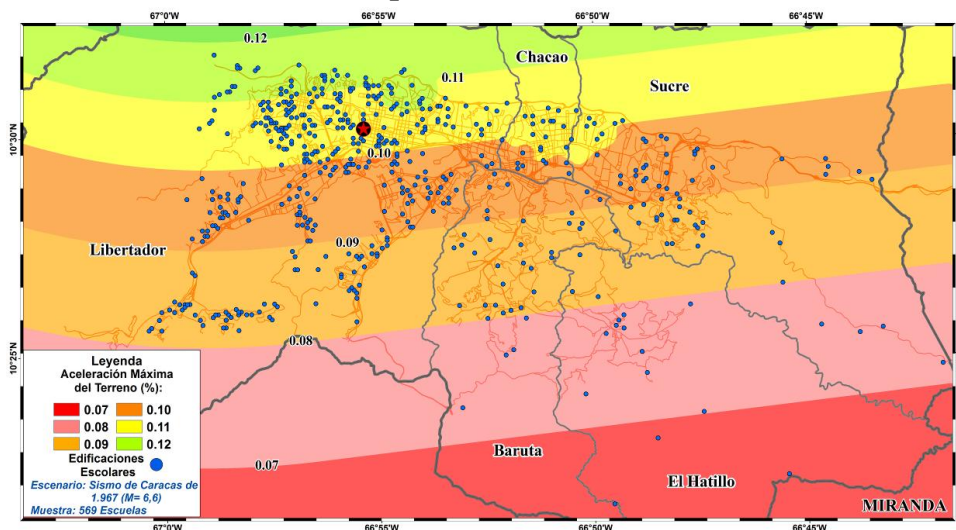
sísmica. Para el primero de ellos se determinan daños y pérdidas sociales y económicas y para el segundo niveles de riesgo sísmico (Coronel y López, 2012b).

*2.15.1.- Aceleraciones para el Terremoto de Caracas de 1967.*

Al simular el escenario del Terremoto de Caracas de 1967 se han considerado los efectos de sitio a partir de la información suministrada por el mapa de microzonificación sísmica (Figura 2.39). En el Anexo 2.7 se puede consultar la distribución espacial de aceleraciones máximas en roca obtenidas a partir de las relaciones de atenuación. Para esta aplicación se ha utilizado la aceleración en superficie la cual se puede observar en la Figura 2.40 donde se puede notar la amplificación en los sectores de Los Palos Grandes y San Bernardino producto de las grandes profundidades de los depósitos aluviales.



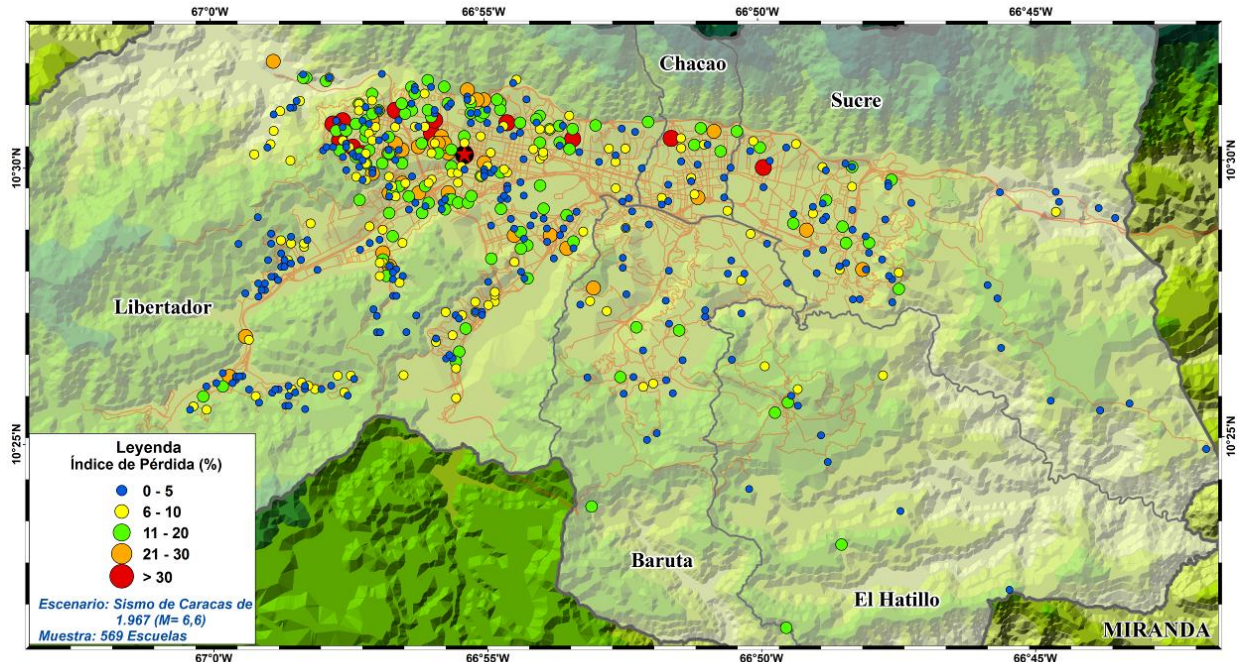
**Figura 2.39. Distribución Espacial de la Muestra de 569 Escuelas en el Área Metropolitana de Caracas.**



**Figura 2.40. Distribución Espacial de las Aceleraciones Máximas del Terreno para el Escenario del Sismo de Caracas de 1967.**

### 2.15.2.- Índices de Pérdida: Terremoto de Caracas de 1967.

Se obtuvo como resultado de la aplicación que 2,3% de las escuelas presentarían un Índice de Pérdida ( $I_p$ ) mayor de 30%, mientras que 6% tendrían un  $I_p$  entre 20 y 30%. En la Figura 2.41 se observa la distribución espacial de los índices de pérdida asociados a este escenario donde se observa la concentración de valores más altos al noroeste de la ciudad con algunos otros al noreste, prevaleciendo el sector norte debido a las mayores aceleraciones y el sector oeste por prevalecer edificaciones escolares más antiguas.

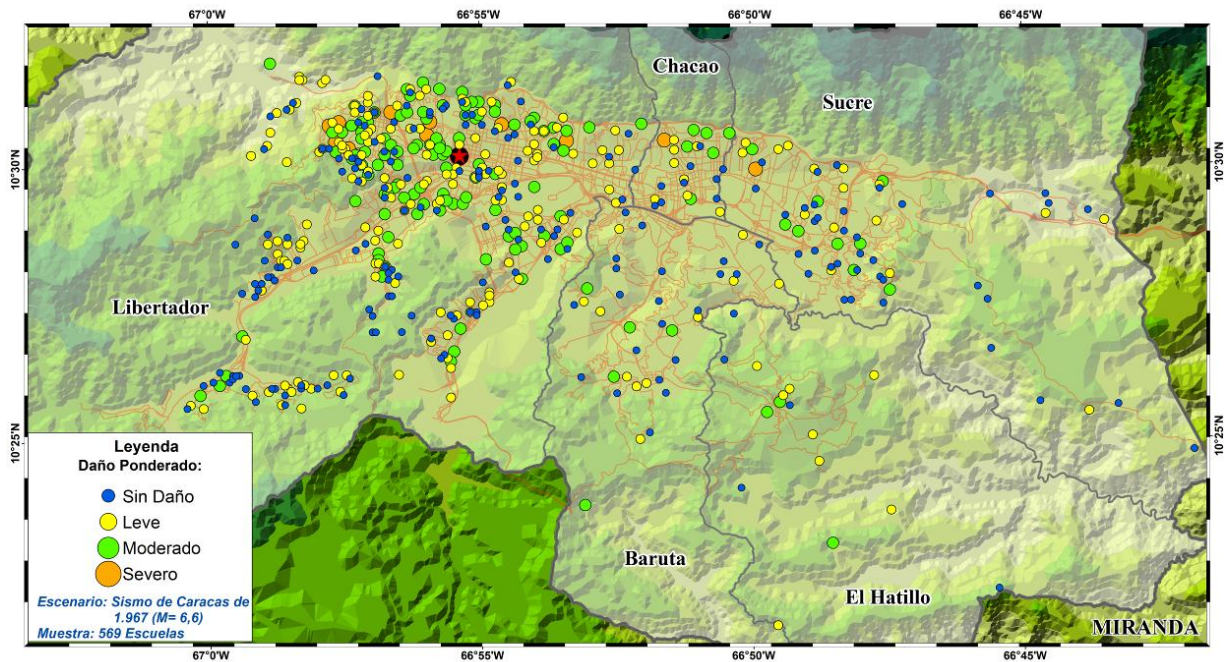


**Figura 2.41. Distribución Espacial de Índices de Pérdida por Escuela para el Escenario del Sismo de Caracas de 1967.**

### 2.15.3.- Daño Ponderado

En términos de daño ponderado se resalta que ninguna escuela llega al daño completo, pero 13 (2,3%) de ellas resultarían severamente dañadas. Luego 134 con daño moderado (23,6%), 207 con daño leve, representando un 36,4%, y finalmente 215 sin daño para un 37,8%.

En la Figura 2.42 se muestra la distribución espacial del Daño Ponderado en la cual se nota que las edificaciones con mayores daños se concentran hacia el norte dada la mayor cercanía a la ruptura sísmica y en mayor medida al oeste de Caracas en el Municipio Libertador debido a la antigüedad de sus edificaciones, con la leve excepción de una escuela al norte del Municipio Chacao y otra al norte del Municipio Sucre.



**Figura 2.42. Distribución Espacial del Daño Ponderado por Escuela para el Escenario del Sismo de Caracas de 1967.**

#### 2.15.4.- Pérdidas Sociales y Económicas

Se estima que el impacto social en términos de pérdidas humanas pudiera resultar en cerca de 120 personas afectadas de las cuales 59 serían posibles heridos leves, 41 heridos graves y 20 posibles fallecidos. En el Anexo 2.7 se muestra la distribución espacial de pérdidas sociales por escuela.

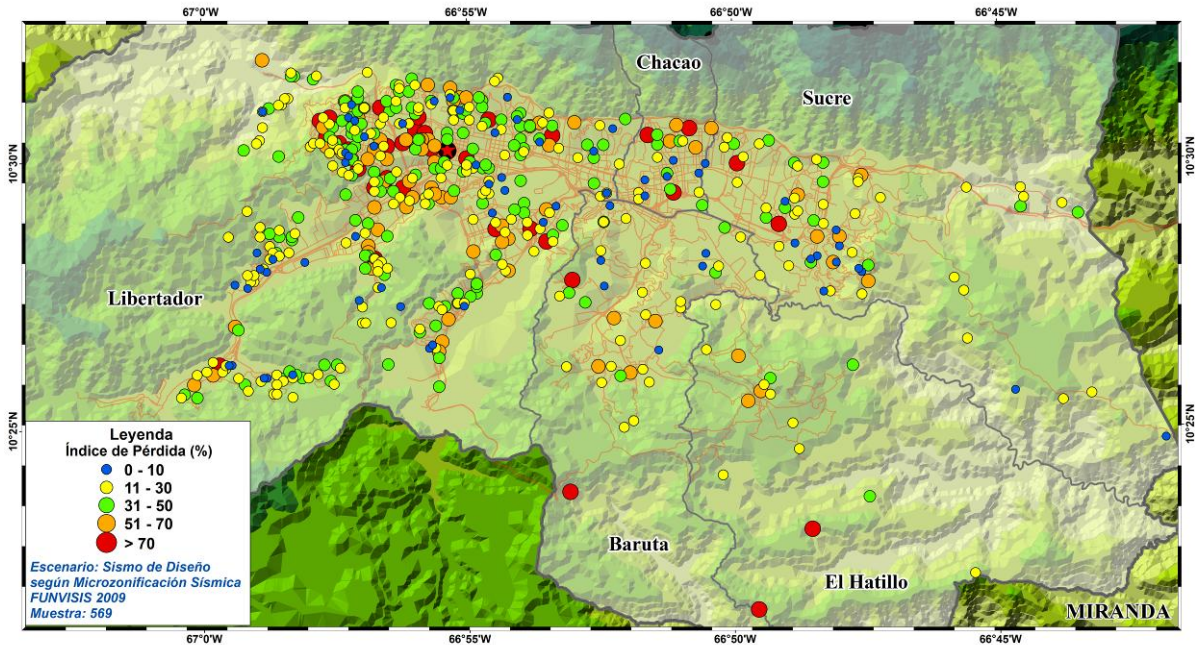
Para este escenario se estimó que las pérdidas económicas totales debidas a daños directos sobre la planta física escolar de la zona sería en el orden de 275 millones de Bolívares, solamente sobre la muestra de las 569 escuelas consideradas en el Área Metropolitana de Caracas.

#### 2.15.5.- Índices de Pérdida y Niveles de Riesgo: Sismo de Diseño (FUNVISIS, 2009)

Para la priorización con fines de gestión de riesgo sísmico en la muestra de 569 escuelas de la Ciudad de Caracas se utilizó en este caso los resultados del proyecto de microzonificación sísmica (FUNVISIS, 2009) el cual presenta un mapa de macrozonas con coeficientes de aceleración máxima del terreno  $A_0$  de 0,265, 0,28 y 0,30g para periodo medio de retorno de 475 años aproximadamente. Esto permite refinar más la priorización en comparación a utilizar el único valor que presenta la norma COVENIN (2001) para toda Caracas de 0,30g.

De esta aplicación se obtuvo que un 0,9% (5 escuelas) son las más prioritarias ya que se encuentran en un nivel de riesgo sísmico Muy Alto, luego 272 escuelas (47,8%) con nivel de riesgo Alto, 199 escuelas (35 escuelas) en riesgo Moderado y 16,3% (93 escuelas) en riesgo Bajo. Cabe destacar que ninguna de las escuelas de la muestra está en un nivel de riesgo Muy Bajo. En la Figura 2.43 se muestra la distribución espacial del  $I_p$  para el caso del sismo de diseño donde se nota una principal concentración de edificaciones con  $I_p$  mayores a 70% al

noroeste de la Ciudad de Caracas siendo estas escuelas las más prioritarias, seguidas de 36 escuelas (6,3%) con  $I_p$  entre 51 y 70%.



**Figura 2.43. Distribución Espacial de Índices de Pérdida por Escuela para el Escenario del Sismo de Diseño, según la Microzonificación Sísmica FUNVISIS (2009).**

#### 2.15.6.- Escenario Sísmico Nacional

Esta estrategia se enfoca en la aplicación a escala nacional de la metodología logrando obtener como resultado niveles de riesgo sísmico y una priorización de las regiones del país que requieren de mayor dedicación y orientación de recursos para la gestión del riesgo sísmico. Se basa en aplicar sistemáticamente la metodología para evaluación de niveles de riesgo sísmico, asumiendo simplificada como amenaza la aceleración con fines de diseño asociada al mapa de zonificación sísmica de Venezuela de la norma COVENIN (2001), donde los valores de  $A_0$  son de 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,30, 0,35 y 0,40 para las zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 respectivamente. Para la aplicación se utilizó un valor de 0,05 para la zona 0 el cual no está contemplado en la norma.

Para ello se utilizó un inventario con la información más completa sobre los edificios escolares de toda Venezuela presentado en el Capítulo 1. En total 10.730 escuelas fueron analizadas mediante la herramienta desarrollada sobre el SIG (RiSEV).

Se obtuvo como resultado para todo el país que sólo un 0,26% son Muy Prioritarias (Riesgo Muy Alto), luego un 26% resultan Prioritarias (Riesgo Alto), mientras un 35,6% son de Conveniente Evaluación (Riesgo Moderado), un 37,7% Poco Prioritarias (Riesgo Bajo) y finalmente sólo un 0,23% serían de Innecesaria Evaluación. Este resultado fue totalizado por región, es decir por estado, con la finalidad de obtener una priorización regional. La totalización se hizo ponderando la cantidad de escuelas por cada nivel de prioridad dándole mayor peso a las Muy Prioritarias y menor a las Innecesarias. El resultado se muestra

gráficamente en la Figura 2.44, en la cual la mayor prioridad regional (mayor riesgo sísmico) la obtuvieron los estados Miranda, Portuguesa, Anzoátegui, Sucre, Carabobo y Lara. Siendo el menos prioritario (Riesgo Muy Bajo) el estado Amazonas como era de esperar. Ello relega la importancia de la amenaza, asociada al mapa de zonificación, y de la vulnerabilidad de los edificios, asociada a las características estructurales básicas de las edificaciones escolares como el año de construcción y el número de pisos.

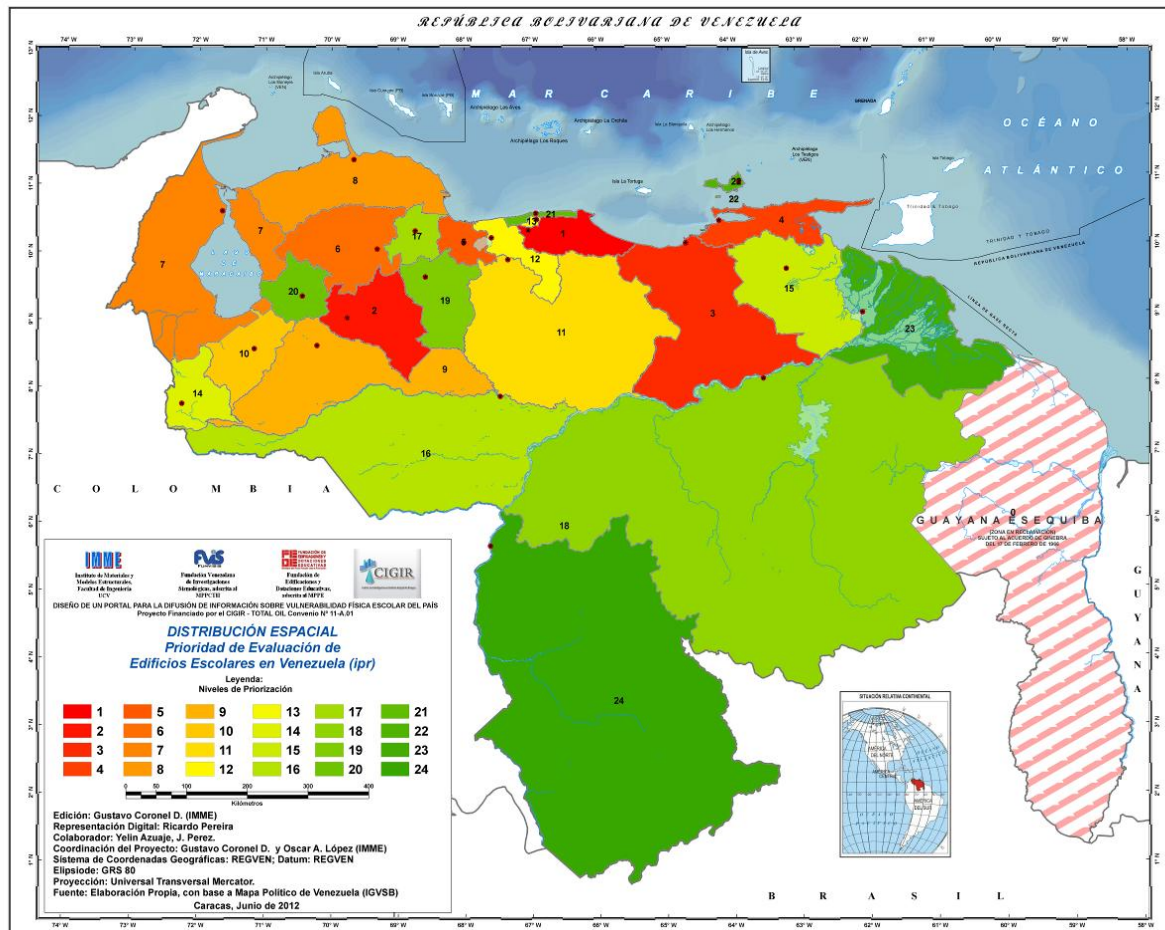


Figura 2.44. Prioridad (Nivel de Riesgo) por Regiones.

## 2.16.- Conclusiones

1- Se desarrolló una metodología para la determinación de curvas de fragilidad de edificios escolares que suministra la probabilidad de excedencia de un estado de daño prefijado dada la ocurrencia de un evento sísmico. Se encontró que las curvas de fragilidad son bastante sensibles a los valores del período efectivo de vibración, del factor de ductilidad última y del factor de sobrerresistencia cedente, parámetros básicos seleccionados para cuantificar el desempeño sismorresistentes de las estructuras escolares bajo la hipótesis de que fueron diseñadas y construidas en cumplimiento con las normas vigentes en la época de la construcción. Un índice de pérdida del edificio es definido ponderando las probabilidades de

ocurrencia y los factores de pérdida económica para todos los estados de daño. La metodología descrita fue sistematizada mediante un programa computacional en *Visual Basic* que permite actualizar y modificar información en la medida que se mejore la cantidad y calidad de la misma, y visualizar inmediatamente resultados en forma gráfica facilitando la calibración y ajuste de los modelos.

2- Las curvas de fragilidad fueron calibradas y ajustadas a partir de la información proveniente de los efectos del sismo de Cariaco de 1997 sobre las escuelas localizadas en el estado Sucre.

3- Las curvas de fragilidad ponen de manifiesto que los edificios escolares más antiguos poseen un mayor grado de vulnerabilidad que aquellos construidos con las normas modernas. Para un evento sísmico con una aceleración de 0,40g, valor de diseño estipulado en las zonas de mayor amenaza del país, la probabilidad de alcanzar el estado de Daño Completo de edificios en la Ciudad de Cumaná de 2 pisos, aperticados de concreto armado, sobre suelo denso (S2), diseñados con las normas de 1939, 1947, 1955, 1967 y 1982 es 90, 35, 56, 36 y 16 veces mayor que la probabilidad del mismo edificio construido con la norma de 1998 (2001). Para edificios con similares características ubicados en la Ciudad de Caracas y una aceleración de 0,30g, la probabilidad de alcanzar el estado de Daño Completo de cada edificio si fue diseñado con las normas de 1939, 1947, 1955, 1967 y 1982 es 69, 68, 91, 19 y 7 veces mayor que la probabilidad del mismo edificio construido con la norma de 1998 (2001).

4- Para un evento sísmico con una aceleración de 0,30g, la probabilidad de alcanzar el estado de Daño Completo de un edificio diseñado con las normas de 1939, 1947, 1955, 1967 y 1982 para la Ciudad de Caracas, con similares características es 69, 68, 91, 19 y 7 veces mayor que la probabilidad del mismo edificio construido con la norma de 2001 (1998).

5- Las curvas de fragilidad obtenidas son similares a las desarrolladas con una metodología distinta y presentadas en HAZUS (FEMA-NIBS, 2009) para el caso de un nivel de Daño Completo en escuelas antiguas, pero indican una mayor vulnerabilidad para el caso de un nivel de Daño Severo.

6- Las curvas de fragilidad estimadas mediante esta metodología permiten representar de forma aproximada la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones escolares. En aquellos casos particulares de escuelas tipo en los que se tenga resultados de estudios detallados, se desarrollaran curvas de fragilidad específicas, independientemente que hayan cumplido o no con la norma de construcción vigente para la época. Estas curvas serán utilizadas para estimar daños en los edificios escolares de Venezuela debidos a la ocurrencia de futuros terremotos, a través de su implementación en un programa integrado a una plataforma SIG, con la finalidad de servir de apoyo en la gestión del riesgo sísmico.

7- Se desarrolló una herramienta computacional integrada en un SIG que permite estimar daños y pérdidas sociales y económicas en cada escuela dado un escenario sísmico particular, y permite también el cálculo de niveles de riesgo con base a mapas de zonificación sísmica, todo ello basado en las curvas de fragilidad aquí desarrolladas.

8- Se expuso una muestra de 639 edificaciones escolares del Estado Sucre a una simulación del sismo de Cariaco de 1997 ( $M_w=6,9$ ). Se concluye que probablemente un 1,3% de escuelas resultarían completamente dañadas, un 12,4% resultarían severamente dañadas, un 23,4%

resultarían con daños moderados y un 30,3% y un 32,5% con daño leve y sin daño respectivamente, lo cual representa un resultado aceptable al comparar con los daños observados luego de ese terremoto. En pérdidas sociales resultarían posiblemente afectadas 215 personas de las cuales habrían cerca de 92 heridos leves, 82 heridos graves y 41 pérdidas fatales. Las pérdidas económicas oscilarían en el orden de los 190 millones de bolívares. Por otro lado se obtuvo que un 4,9% representativo de 31 escuelas resultarían con valores críticos del Índice de Pérdida lo cual las hace prioritarias para una evaluación detallada de su vulnerabilidad y la eventual toma de medidas de refuerzo estructural.

9.- Se evaluó una muestra de 83 escuelas en la ciudad de Cumaná bajo una simulación del terremoto de Cumaná de 1929 ( $M=6,6$ ). Como resultado se tendría un daño completo de al menos 5 escuelas y otras 63 con daño severo, esto debido a la cercanía a la traza de ruptura de la falla, dando origen a pérdidas sociales en el orden de 1.116 personas de las cuales 469 serían posibles heridos leves, 432 heridos graves y 215 fallecidos o muertos. El impacto económico sobre la infraestructura educativa se estima en cerca de 250 millones de Bolívares. Se obtuvo que 5 escuelas resultarían ser las de atención prioritaria debido al muy alto riesgo, seguidas de otras 30 escuelas en riesgo alto.

10.- Se expuso una muestra de 569 edificios escolares del Área Metropolitana de Caracas a la simulación del terremoto de Caracas de 1967 ( $M_w=6,6$ ). Se concluye que al menos 13 escuelas resultarían severamente dañadas pero sin llegar al colapso, para un 2,3% del total. Cerca de 59 personas podrían resultar heridas levemente, 41 gravemente y pudiera haber algunos pocos fallecidos como pérdidas sociales. Las pérdidas económicas ascenderían a 275 millones de Bolívares. Finalmente con fines de priorización se obtuvo que tan solo 5 escuelas (0,88%) presentaron un nivel de riesgo sísmico Muy Alto, siendo éstas las más prioritarias, seguidas de 272 escuelas clasificadas con un nivel de riesgo Alto.

11.- Se aplicó la metodología a escala nacional para ello se utilizó en inventario con la información más completa sobre edificios escolares de toda Venezuela, en total 10.730 escuelas fueron analizadas mediante la herramienta computacional desarrollada sobre un SIG. Se obtuvo como resultado para todo el país que sólo un 0,26% son Muy Prioritarias (Riesgo Muy Alto), un 26% resultan Prioritarias (Riesgo Alto) y un 35,6% de Conveniente Evaluación o Riesgo Moderado. Esta información permite orientar la planificación y la atención a los estados que requerirían prioritariamente mayor dedicación y recurso para la Gestión del Riesgo Sísmico en las Escuelas.

12.- Finalmente se puede sintetizar, resaltar y concluir que de los 28.878 planteles educativos en Venezuela, las estadísticas nos indican que cerca de la mitad (49,5%) se encuentran en zonas de elevada amenaza sísmica (zonas 5,6 y 7) y de las cuales un 21% pudieron haber sido construidas antes de 1967 con normas menos exigentes y posiblemente sean vulnerables. Esto nos permite concluir que aproximadamente un 10% (~2800) de las escuelas del país pudieran estar en riesgo y deben ser consideradas como prioritarias, para las cuales se recomienda una pronta inspección y evaluación detallada. Por otro lado de las 552 escuelas de tipo Antiguo I, Antiguo II y Cajetón conocidas por su elevada vulnerabilidad, encontramos que 304 de ellas se encuentra en las zonas de elevada amenaza lo cual se traduce en un riesgo sísmico latente, para lo cual se recomienda el desarrollo de proyecto de refuerzo estructural y sismorresistente y su pronta ejecución.

13.- Estos resultados son un aporte para la toma de decisiones, la planificación y la gestión del riesgo sísmico en las escuelas de Venezuela, en la respuesta y atención de emergencia, la priorización para la reducción del riesgo, así como para la divulgación y socialización de este conocimiento con fines de fortalecer la cultura de prevención sísmica en las escuelas y la resiliencia en las comunidades del país.

## 2.17.- Referencias

1. Abrahamson N.A. and Silva W. J. (2008). *Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations*. Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, pages 67-97.
2. Abrahamson N.A. and Silva W. J. (1997). *Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes*. Seismological Research Letters, 68, N° 1, 1.997, 94-127.
3. Alonso J. L. y Figuera F. (1997). *Evaluación Estructural de Centros Educativos Dañados Durante el Terremoto de Cariaco del 9 de Julio de 1997, Estado Sucre*. Informe Técnico Vol. I y II realizado para FEDE, Caracas, Septiembre de 1997.
4. ATC (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California*. ATC-13. Applied Technology Council, Redwood City, California. USA.
5. Audemard F. (2007). *Revised seismic history of the El Pilar fault, Northeastern Venezuela, from the Cariaco 1997 earthquake and recent preliminary paleoseismic results*. Journal of Seismology, DOI 10.1007/s10950-007- 9054-2.
6. Audemard F. (2006). *Surface Rupture of the Cariaco July 09, 1997 Earthquake on the El Pilar Fault, Northeastern Venezuela*. Tectonophysics 424 (2006), pages 19–39.
7. Barbat A. H., Pujades L.G., Lantada N. (2008). *Seismic Damage Evaluation in Urban Areas Using the Capacity Spectrum Method: Application to Barcelona*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28 (2008), pp. 851–865.
8. Bermúdez C. A., Barbat A. H., Pujades L. G. and González-Drigo J. R. (2008). *Seismic Vulnerability and Fragility of Steel Buildings*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. October 12-17, 2008, Beijing.
9. Blondet M., Muñoz A., Velásquez J. y León H. (2005). *Estimación de pérdidas sísmicas en edificaciones educativas Peruanas*. IX Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Concepción, Chile, 2005.
10. Bonett R. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Tesis Doctoral. UPC. Barcelona. España.
11. Bonilla R., López O. A., Castilla E., Torres R., Marinilli A., Annicchiarico W., Garcés F., Maldonado Z. (2000). *El Terremoto de Cariaco del 9 de julio de 1997*. BT IMME V. 38, 2, p 1-50.
12. Boore D. and Atkinson M. (2008). *Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s*. Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, pages 99-138.

13. Campbell K. and Bozorgnia Y. (2008). *NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s*. Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, pages 139-171.
14. Castilla E. and Marinilli A. (2000). *Structural Behavior of Raimundo Martínez Centeno Highschool on 07/09/1.997 Cariaco Earthquake*. XII WCEE, New Zealand.
15. Chiou B. and Youngs R. (2008). *An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra*. Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, pages 173-216.
16. Coronel D. G. y Betancourt N., Báez S. V. y López O. A. (2010a). *RiSEV: un Sistema para la Evaluación de Riesgo Sísmico en Escuelas de Venezuela Basado en SIG*. Presentado y publicado en las memorias del I Congreso Venezolano de Sistemas de Información Geográfica (COVESIG 2010), del 29 de septiembre al 01 de octubre, Mérida, Venezuela.
17. Coronel D. Gustavo, López Oscar A. y Betancourt Nelson (2010b). *Evaluación de Niveles de Riesgo Sísmico en Escuelas de Venezuela Mediante Curvas de Fragilidad*. Presentado y publicado en las memorias del X Congreso Chileno de Ingeniería Antisísmica. Mayo 22-27, 2010 Santiago, Chile.
18. Coronel D. Gustavo (2012). *Estimación de Daños y Pérdidas en Escenarios Regionales: Aplicación a Edificios Escolares de Venezuela*. Trabajo de Grado de Maestría en Ingeniería Sismorresistente. Facultad de Ingeniería de la UCV. Tutor: O. A. López A (A ser presentado).
19. Coronel D. G. y López O. A. (2012a). *Curvas de Fragilidad Sísmicas para Edificios Escolares de Venezuela*. Boletín Técnico del IMME (Sometido).
20. Coronel D. G. y López O. A. (2012b). *Regional Seismic Damage, Loss and Risk Scenarios of Venezuelan School Buildings*. 15th World Conference on Earthquake Engineering (submitted).
21. COVENIN (1980). *Estructuras de Acero para Edificaciones. Proyecto, Fabricación y Construcción*. Norma COVENIN MINDUR 1618:80. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Caracas, Venezuela.
22. COVENIN (1981). *Estructuras de Concreto Armado para Edificaciones; Análisis y Diseño*. Norma COVENIN MINDUR 1753:81. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Caracas, Venezuela.
23. COVENIN (1982). *Edificaciones Antisísmicas*. Norma COVENIN 1756:82. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Caracas, Venezuela.
24. COVENIN (1987). *Estructuras de Concreto Armado para Edificaciones; Análisis y Diseño*. Norma COVENIN MINDUR 1753:87. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Caracas, Venezuela.
25. COVENIN (1998a). *Edificaciones Sismorresistentes*. Norma COVENIN 1756:98. Comisión Venezolana de Normas Industriales, COVENIN, FONDONORMA, MINDUR y FUNVISIS. Caracas, Venezuela.

26. COVENIN (1998b). *Estructuras de Acero para Edificaciones. Método de los Estados Límites*. Norma COVENIN MINDUR 1618:98. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Caracas, Venezuela.
27. COVENIN (2001). *Edificaciones Sismorresistentes*. Norma COVENIN 1756:01. Comisión Venezolana de Normas Industriales. COVENIN, FONDONORMA y FUNVISIS. Caracas, Venezuela.
28. ESRI (2009). *Sistema de Información Geográfica, ArcGIS 9.2, versión académica*. Environmental Systems Research Institute (ESRI). <http://www.esri.com/>.
29. FEDE (1997). *Evaluación de los Centros Educativos del Edo. Sucre Reporte de Fallas por Plantel*. Fundación de Edificaciones y Dotaciones Educativas (FEDE), Caracas 19 de agosto de 1997.
30. FEDE (2001). *Planteles Construidos con Sistemas "R"*. Fundación de Edificaciones y Dotaciones Educativas (FEDE).
31. FEMA (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. FEMA 356. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C.
32. FEMA (2003). *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*. FEMA 450. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C.
33. FEMA (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. FEMA 440. ATC-55 Project, Washington D.C.
34. FEMA-NIBS (2009). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS-MH MR4, Advance Engineering Building Module, Technical and User's Manual*. Federal Emergency Management Agency (FEMA) and National Institute of Building Sciences (NIBS). Washington D.C.
35. Fernández N. (1998). *Estudio de la Sensibilidad de las Causas que Provocaron el Colapso de la Escuela Valentín Valiente en el Sismo de Cariaco del 9 de Julio de 1.997*. Trabajo Especial de Grado de Ing. Civil, F. de Ing., Universidad Central de Venezuela, Tutor: Prof. E. Castilla.
36. Giovinazzi S., Lagomarsino S., Pampanin S. (2006). *Vulnerability Methods and Damage Scenario for Seismic Risk Analysis as Support to Retrofit Strategies: an European Perspective*. 2006 NZSEE Conference.
37. Grases J., Malaver A., Montes L., Gonzales M., Herrera C., Acosta L., Lugo M., Madriz J., Hernández J. y Vargas R. (2004). *Amenazas Naturales y Vulnerabilidad en Cumaná*. Boletín Técnico IMME, Vol. 42, N. 3, pp 57-80.
38. Hernández J. J. (2009). *Confiabilidad Sísmica-estructural de Edificaciones Existentes de Caracas*. Proyecto pensar en Venezuela. Colegio de Ingenieros de Venezuela. Capítulo DMC. Jornadas 18 y 19 de septiembre de 2009. Caracas, Venezuela.

39. Hwang H., and Lin, Y. K. (2002). *Seismic Loss Assessment of Memphis City School Buildings*. Proceedings of the Seventh U. S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston, 2002.
40. Idriss I. M. (2008). *An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated By Shallow Crustal Earthquakes*. Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, page 217.
41. IMME (2004). *Evaluación de Muros Portantes del Proyecto de Investigación “Desarrollo de Sistema de Muros de Mampostería Estructural Confinada de Rápido Montaje para la Vivienda de Bajo Costo”*. Informe N° 209790-A del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la Facultad de Ingeniería de la UCV. Responsables: Fernández N. y Marinilli A., pp. 1-42, Caracas, Venezuela.
42. Kircher, Charles A., Aladdin A. Nassar, Onder Kustu and William T. Holmes (1997). *Development of Building Damage Functions for Earthquake Loss Estimation*. Earthquake Spectra, Vol. 13, No. 4, (Oakland, California: Earthquake Engineering Research Institute).
43. Lagomarsino, S., Penna, A. (2003). *Guidelines for the Implementation of the II Level Vulnerability Methodology*. WP4: Vulnerability assessment of current buildings. Risk-UE Project: An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Application to different European Towns.
44. López O. A. (2009). *Indicadores de Riesgo Sísmico en Edificios Escolares de Venezuela*. Boletín Técnico IMME, Vol. 47, N. 1, pp 17-46.
45. López O. A. y Espinoza L. F. (2007). *Derrumbe del Liceo RMC durante el Terremoto de Cariaco de 1.997*. Boletín Técnico IMME, Vol. 45, N. 2, pp 35-57.
46. López O. A., Cruz M. (1996). *Number of Modes for the Seismic Design of Buildings*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol. 25, No 8, p837-855.
47. López O. A., Hernández J. J., Del Re G., Puig J. and Espinoza L. (2007). *Reducing Seismic Risk of School Buildings in Venezuela*. Earthquake Spectra, Vol. 23, N. 4, pp 771-790.
48. López O. A., Marinilli A., Bonilla R., Fernández N., Domínguez J., Coronel D. G., Baloa T. y Vielma R. (2010). *Evaluación Sismorresistente de Edificios Escolares en Venezuela*. Rev. Fac. de Ing. de la UCV, Vol. 25, No. 4, 2010.
49. Marinilli A., Fernández N., López O. A. y Coronel D. G. (2010). *Seismic Inspection of School Buildings in Venezuela*. 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering (9USN/10CCEE). July 25-29, Toronto, Canada.
50. Marinilli, Angelo. *Simplified Stochastic Analysis of Reinforced Concrete Frames under Seismic Loads*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. October 12-17, 2008, Beijing.
51. Microsoft Visual Studio (2008). *Visual Basic 2008 Express Edition*. Disponible en <http://www.microsoft.com/express/windows/>.
52. MOP (1939). *Norma para el Cálculo de Edificios*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Edificios. Caracas, Venezuela.

53. MOP (1947). *Norma para el Cálculo de Edificios*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Edificios e Instalaciones Industriales. Caracas, Venezuela.
54. MOP (1955). *Norma para el Cálculo de Edificios*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Edificios e Instalaciones Industriales. Caracas, Venezuela.
55. MOP (1967). *Norma Provisional para Construcciones Antisísmicas*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Edificios. Caracas, Venezuela.
56. Moreno R., (2006). *Evaluación del Riesgo Sísmico en Edificios Mediante Análisis Estático No Lineal: Aplicación a Diversos Escenarios Sísmicos de Barcelona*. Tesis Doctoral UPC.
57. NTCM (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*. Comité de Normas del Distrito Federal, México, D. F.
58. RISK-UE (2004). *The European Risk-UE Project: An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios*. (2001-2004). [www.risk-ue.net](http://www.risk-ue.net).
59. Safina Salvador, Andrade Mónica, Schmitz Michael, Jraige Cristian and Espinosa Luis (2008). *Seismic Response of Reinforced Concrete Buildings in Caracas, Venezuela*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.
60. SINACOES (2008). *Sistema Nacional de Control de Estudio*. Anteriormente llamado SIGEDUN. Ministerio del Poder Popular para la Educación. <http://planteles.me.gob.ve/>.
61. Wells, Donal L. and Coppersmith, Kevin J. *New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002, August 1994.

## **Anexo 2.1**

### Notación y Simbología

A continuación se presentan las notaciones y/o simbología empleada este Capítulo del Informe y su descripción:

- $A$  » coeficiente de aceleración horizontal correspondiente al cociente entre la aceleración máxima del terreno y la aceleración de gravedad.
- $\bar{A}_1$  » coeficiente de aceleración del terreno asociada al inicio del estado de daño (1) denominado "daño leve".
- $\bar{A}_2$  » coeficiente de aceleración del terreno asociada al inicio del estado de daño (2) denominado "daño moderado".
- $\bar{A}_3$  » coeficiente de aceleración del terreno asociada al inicio del estado de daño (3) denominado "daño severo".
- $\bar{A}_4$  » coeficiente de aceleración del terreno asociada al inicio del estado de daño (4) denominado "daño completo".
- $A_C$  » área de construcción de la edificación, en metros cuadrados.
- $A_c$  » Área de construcción de la escuela en metros cuadrados. Estimada a partir del índice de ocupación nominal y la población escolar.
- $\bar{A}_i$  » coeficiente de aceleración del terreno asociada al inicio del estado de daño ( $i$ ), para cada estado de daño desde  $i=1$  hasta 4.
- $A_j$  » coeficiente de aceleración máxima del terreno estimada en un sitio determinado mediante relaciones de atenuación apropiadas y debida a la ocurrencia de un evento sísmico ( $k$ ).
- $A_o$  » coeficiente de aceleración máxima del terreno estimada en un sitio determinado mediante mapas de zonificación sísmica asociados a determinado periodo de retorno.
- $C_s$  » coeficiente sísmico de diseño establecido en las normas como una fracción del peso ( $W$ ).
- $C_{uni}$  » costo estimado de construcción unitario (Bolívares por metro cuadrado).
- $d$  » daño sobre la estructura debido a un sismo.
- $F_i$  » factor de pérdida asociado al estado de daño  $i$ , como el porcentaje (%) del costo de la obra que se pierde durante el evento sísmico.

- $F_{FM}$  » factor de afectación sobre los ocupantes en términos de fallecidos o muertos asociado al estado de daño  $i$ .
- $F_{HG}$  » factor de afectación sobre los ocupantes en términos de heridos graves asociado al estado de daño  $i$ .
- $F_{HL}$  » factor de afectación sobre los ocupantes en términos de heridos leves asociado al estado de daño  $i$ .
- $F_{ocu}$  » Factor de ocupación de la edificación al momento de la ocurrencia de un sismo. Está asociado en edificios escolares a la hora de ocurrencia y a la época del año escolar.
- $g$  » aceleración de la gravedad tomada como 980 cm/seg<sup>2</sup>.
- $H = h_n$  » Altura total de la edificación, medid desde el nivel base hasta el tope.
- $i$  » índice que representa los estados de daños discretos, definidos como: ( $i=0$ ) sin daño ( $i=1$ ) daño leve; ( $i=2$ ) daño moderado; ( $i=3$ ) daño severo; ( $i=4$ ) daño completo.
- $I_{ocu}$  » Índice de ocupación nominal es el área nominal que ocupa un estudiante en una escuela respecto al área de construcción total.
- $I_p$  » Índice de Pérdida
- $I_R$  » índice de riesgo, referido al daño físico (estructural).
- $j$  » índice que representa a cada evento sísmico, definido de forma determinística.
- $L_{rup}$  » longitud de ruptura.
- $M_w$  » magnitud de momento.
- $N$  » Número de pisos de la edificación.
- $P[d>i/A]$  » probabilidad de que el estado de daño sobre la estructura ( $d$ ) exceda determinado estado de daño ( $i$ ) dado el coeficiente de aceleración  $A$ .
- $P_1$  » probabilidad de ocurrencia del estado de daño ( $1$ ) denominado "leve", para la aceleración del terreno  $A$ .
- $P_2$  » probabilidad de ocurrencia del estado de daño ( $2$ ) denominado "moderado", para la aceleración del terreno  $A$ .

- $P_3$  » probabilidad de ocurrencia del estado de daño (3) denominado "severo", para la aceleración del terreno A.
- $P_4$  » probabilidad de ocurrencia del estado de daño (4) denominado "completo", para la aceleración del terreno A.
- $P_{ECO}$  » pérdida económica en termino de costo de reposición estimado en Bolívares.
- $P_{esc}$  » Población escolar que habita la escuela, obtenido del Registro Escolar Nacional 2007-2008.
- $P_{FM}$  » pérdida en número estimado de personas muertas o fallecidas.
- $P_{HG}$  » pérdida en número estimado de personas con heridas graves.
- $P_{HL}$  » pérdida en número estimado de personas con heridas leves.
- $P_i$  » probabilidad de ocurrencia del estado de daño ( $i$ ) para cada estado de daño desde  $i=1$  hasta 4.
- $P_{IS}$  » pérdida indirecta en términos de impacto social en la educación.
- $R$  » factor de reducción de respuesta.
- $T$  » periodo medio de retorno asociado a la ocurrencia de sismos.
- $T^*$  » periodo característico del espectro elástico definido por COVENIN (2001).
- $T^+$  » periodo característico del espectro de diseño definido por COVENIN (2001).
- $T_a$  » periodo de la edificación (en segundos) estimado con base a relaciones empíricas, según la norma COVENIN (2001). Es utilizado en este trabajo para estimar el coeficiente sísmico en los casos donde es requerido.
- $T_e$  » Periodo efectivo de la estructura.
- $T_o$  » periodo característico del espectro elástico definido por COVENIN (2001).
- $u_1$  » desplazamiento en el tope de la estructura asociado al inicio del estado de daño (1) denominado en este trabajo "daño leve".
- $u_2$  » desplazamiento en el tope de la estructura asociado al inicio del estado de daño (2) denominado en este trabajo "daño moderado".

- $u_3$  » desplazamiento en el tope de la estructura asociado al inicio del estado de daño (3) denominado en este trabajo "daño severo".
- $u_4$  » desplazamiento en el tope de la estructura a asociado al inicio del estado de daño (4) denominado en este trabajo "daño completo".
- $u_d$  » demanda de desplazamiento en el tope de la estructura inducida por un sismo determinado. En este trabajo es determinada a partir del método de los coeficientes (FEMA, 2005).
- $u_i$  » desplazamiento en el tope de la estructura a asociado al inicio del estado de daño ( $i$ ), para cada estado de daño desde  $i=1$  hasta 4.
- $u_u$  » desplazamiento en el tope de la estructura asociado al agotamiento, daño completo o colapso parcial o total de la estructura.
- $u_y$  » desplazamiento en el tope de la estructura adoptado para representar la cedencia generalizada de la edificación.
- $V$  » fuerza cortante en la base.
- $V_u$  » fuerza cortante última del sistema elastoplástico representativo.
- $V_y$  » fuerza cortante cedente del sistema elastoplástico representativo.
- $V_y/W$  » Relación entre la Fuerza Cortante Cedente ( $V_y$ ) y el peso ( $W$ ) del edificio, supuesta igual a el coeficiente de diseño de cada norma, incorporando la sobrerresistencia cedente.
- $W$  » peso total del edificio establecido en las normas para la determinación del coeficiente sísmico de diseño.
- $\alpha$  » factor de importancia.
- $\alpha_1$  » factor de participación del modo fundamental en el desplazamiento del último piso.
- $\beta$  » factor de magnificación promedio (COVENIN, 2001).
- $\beta_1 = \mu_0$  » fracción de la masa del edificio contenida en el modo fundamental.
- $\beta_{Ai}$  » desviación estándar del  $\ln(A)$ , asociada a cada estado de daño ( $i$ ).
- $\Delta d$  » Diferencia entre el daño observado y el daño ponderado.

- $\lambda$  » factor que relaciona la ductilidad nominal con la ductilidad última.
- $\pi$  » constante de valor 3,141592.
- $\varphi$  » factor de corrección del coeficiente de aceleración horizontal (COVENIN, 2001).
- $\Omega_D$  » sobrerresistencia asociada al diseño.
- $\Omega_M$  » sobrerresistencia de la estructura que puede ser asociada a la sobrerresistencia de los materiales de construcción.
- $\Omega_o$  » sobrerresistencia total de la estructura.
- $\Omega_S$  » sobrerresistencia asociada a la redundancia del sistema estructural.
- $\Omega_u$  » sobrerresistencia última de la estructura.
- $\Omega_y$  » sobrerresistencia cedente.

## **Anexo 2.2**

### Consulta a Expertos

## **Introducción**

Como una de las iniciativas planteadas en esta investigación, se llevó a cabo una encuesta o consulta a un grupo de expertos venezolanos en el área de ingeniería estructural y sismorresistente, con el fin de dar un soporte adicional a los valores medios del factor de ductilidad nominal adoptados en este trabajo para los resultados presentados. Con base en algunos de los criterios del conocido “*Método Delphi*”, se preparó un cuestionario o encuesta para la consulta, la misma se hizo llegar de forma selectiva al grupo de expertos, en la mayoría de los casos a través de correos electrónicos y en otros en forma física. Se logró obtener la respuesta a la encuesta de 10 expertos, de una cantidad un poco mayor de consultados. Finalmente se presenta la respuesta estadística del grupo consultado.

## **Objetivo y criterios de la consulta**

El objetivo de la consulta fue recopilar una estadística basada en el criterio de expertos venezolanos en el área de ingeniería estructural y sismorresistente, sobre los posibles rangos de valores del factor de capacidad dúctil nominal de edificaciones escolares de poca altura, diseñadas y construidas con normas asociadas a ciertas épocas.

## **Definición del factor de ductilidad nominal**

En este trabajo se ha denominado como factor de ductilidad nominal ( $\mu$ ), a el factor mediante el cual se puede relacionar el desplazamiento elástico de la estructura con el desplazamiento inelástico asociado a un estado de daño reparable (establecido en las normas) para un evento sísmico periodo de retorno de 475 años, o de 10% probabilidad de ocurrencia en 50 años.

## **Metodología Empleada**

El *Método Delphi* es una metodología de investigación multidisciplinaria para la realización de pronósticos y predicciones. Es una técnica subjetiva basada en la opinión de expertos. Su objetivo es la consecución de un consenso basado en la discusión entre expertos. Es un proceso repetitivo. Su funcionamiento se basa en la elaboración de un cuestionario que ha de ser contestado por los expertos. Una vez recibida la información, se vuelve a realizar otro cuestionario basado en el anterior para ser contestado de nuevo. Finalmente el responsable del estudio elaborará sus conclusiones a partir de la explotación estadística de los datos obtenidos. El método tiene cuatro etapas sucesivas de envíos de cuestionarios, de los que se sintetizan las respuestas para elaborar la siguiente consulta, hasta llegar a un resultado de consenso. Tras un primer test de aproximación, en la segunda consulta los expertos deben volver a responder viendo los resultados de la primera y justificar sus divergencias con el grupo. En la tercera consulta, se pide a cada experto debe comentar los argumentos que disienten de la mayoría y en el cuarto turno se reclama la opinión sobre el consenso final. Los principios fundamentales del método son: el anonimato de los intervinientes, la repetitividad y realimentación controlada y la respuesta del grupo en forma estadística.

## Selección de las épocas

En la consulta se establecieron cuatro épocas para la asignación del rango de  $\mu$ , a continuación se discute sobre su selección.

Se seleccionaron cuatro periodos o épocas definidas por: i) antes de 1967; ii) entre 1967 y 1982; iii) entre 1982 y 1998 y iv) después de 1998.

En el caso del primer periodo antes de 1967 la fecha se ve reflejada en el cambio de normativa para el diseño y construcción producto del terremoto de Caracas ocurrido en julio de 1967. Ese año se presenta la norma provisional del MOP (MOP, 1967) para sustituir la anterior (MOP, 1955), por lo cual este periodo viene marcado por el diseño que se realizaba con las normas MOP (1955), MOP (1947) y MOP (1939).

El segundo periodo 1967-1982 está marcado con la aparición de nuevas y modernas normas para la época, con significativas mejoras de carácter sismorresistente, esta fueron la COVENIN 1753-80 (COVENIN, 1980) para estructuras de concreto y la COVENIN 1618-81 (COVENIN, 1981) para estructuras de acero, aunado la norma sísmica COVENIN 1756-82 (COVENIN, 1982). Esto significó un progreso en la capacidad sismorresistente las edificaciones venezolanas.

El tercer y cuarto periodo, quizás el más discutido, está marcado por el periodo entre 1982-1998 y posterior al 1998 respectivamente. La escogencia de estos rangos puede justificarse en primera instancia con el cambio de la norma sísmica COVENIN 1756-98 (COVENIN, 1998). Si bien es cierto que la ductilidad está directamente asociada al nivel de diseño sismorresistente empleado y no a la fuerza de diseño, esta fecha puede representar una consolidación del conocimiento en la práctica constructiva venezolana con los requerimientos expuesto e la norma de diseño para edificaciones de concreto COVENIN 1753-87 (COVENIN, 1987) y bien coincide con la nueva norma para el diseño de edificaciones de acero COVENIN1618-98 (COVENIN, 1998a). Una revisión más refinada de combinaciones entre normas de diseño y normas sísmicas puede consultarse en Hernández (2009).

## Resultados obtenidos

Se presenta el resultado estadístico del grupo de expertos consultado. En la Tabla A.2.2.1 se presentan los valores medios y las desviaciones estándar asociadas del factor de ductilidad nominal, para los periodos expuestos.

**Tabla A.2.2.1. Valore medios y desviación estándar de la consulta del factor  $\mu$ .**

	Edificio Construido:			
	Antes de 1967	Entre 1967 y 1982	Entre 1982 y 1998 (ND3)	Después de 1998 (ND3)
<b>Media (<math>\mu</math>)</b>	1,70	2,85	4,05	4,61
<b>Desviación estándar (<math>\sigma_\mu</math>)</b>	0,66	1,06	1,22	1,15
<b>Media + <math>\sigma_\mu</math></b>	2,36	3,91	5,28	5,75
<b>Media - <math>\sigma_\mu</math></b>	1,04	1,79	2,83	3,46

En las Figuras A.2.2.1, A.2.2.2, A.2.2.3 y A.2.2.4, se presentan los resultados puntuales de cada respuesta respetando el anonimato de experto consultado.

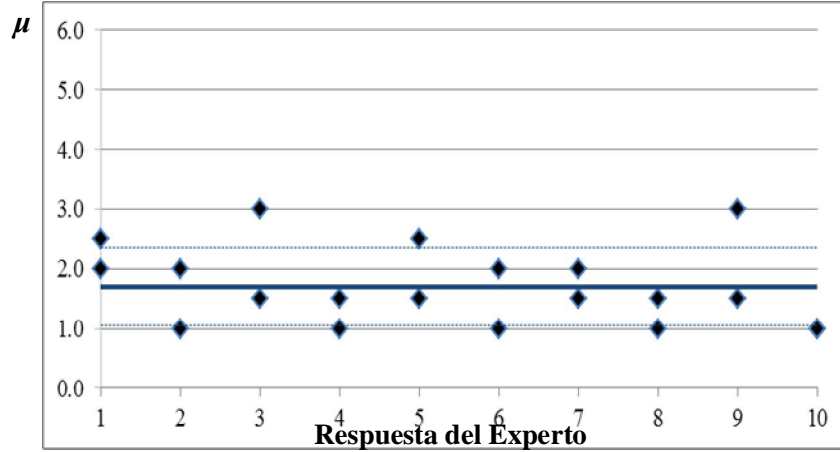


Figura A.2.2.1. Respuesta de valores de  $\mu$  para escuelas construidas antes de 1967.

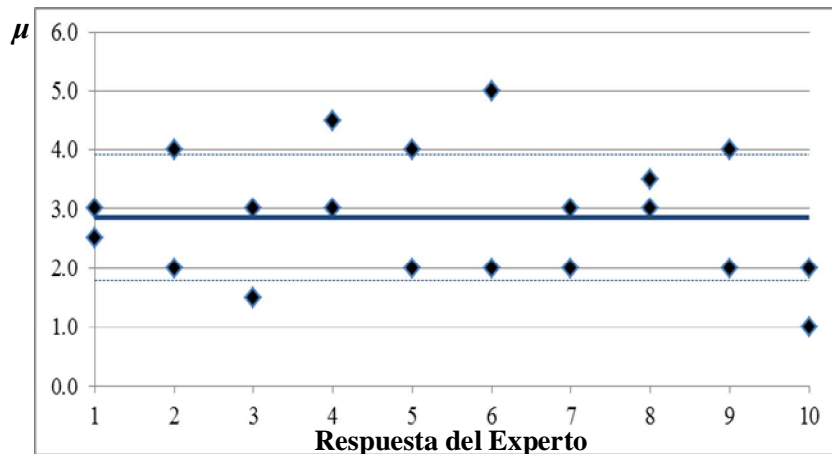


Figura A.2.2.2. Respuesta de valores de  $\mu$  para escuelas construidas entre 1967 y 1982.

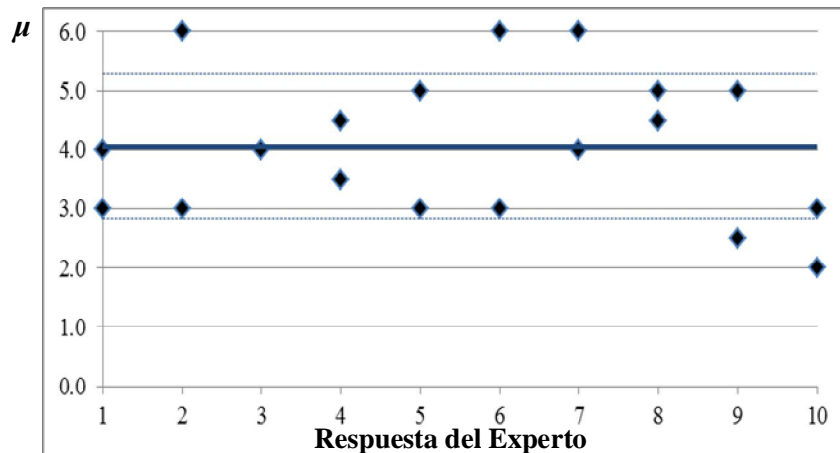
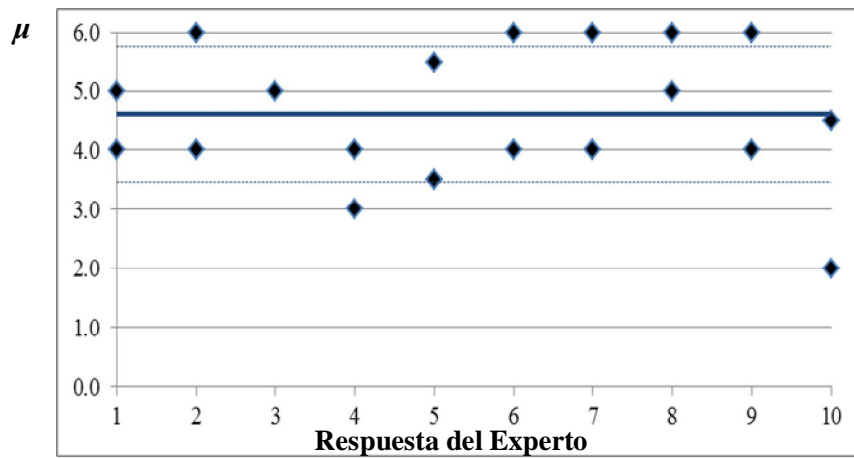


Figura A.2.2.3. Respuesta de valores de  $\mu$  para escuelas construidas entre 1982 y 1998.



**Figura A.2.2.4. Respuesta de valores de  $\mu$  para escuelas construidas después de 1998.**

Se agradece la participación de los expertos en el área de ingeniería estructural y sismorresistente que amablemente dedicaron algunos minutos de su valioso tiempo en dar respuesta a la consulta enviada, los se mencionan a continuación en estricto orden alfabético:

Alfredo Morón
Arnaldo Gutiérrez
Francisco Corredor
José Grases
José Luis Alonso
José Parra
Norberto Fernández
Oscar Andrés López
Salador Safina
William Lobo Q.

De igual forma se agradece aquellos expertos a los cuales se les hizo llegar la encuesta y que con base a sus criterios y experiencias decidieron no responder la encuesta.

Finalmente se muestra a continuación el formato de la encuesta enviado a los expertos y a partir del cual se obtuvieron los resultados:

## CONSULTA A EXPERTOS

### 1) Datos

- ✓ Dado un edificio escolar construido en Venezuela en una época determinada, cumpliendo con la norma de diseño y construcción vigente en el momento.
- ✓ Se conoce la curva cortante basal – desplazamiento en el último piso, la cual se ha obtenido ya sea de ensayos o de análisis estático no lineal y se ha idealizado como bilineal (ver Figura 1).
- ✓ Se define el factor de ductilidad nominal ( $\mu$ ) como:

$$\mu = \frac{u_i}{u_y}$$

- ✓ Se desea estimar un rango de valores para el factor de ductilidad ( $\mu$ ).

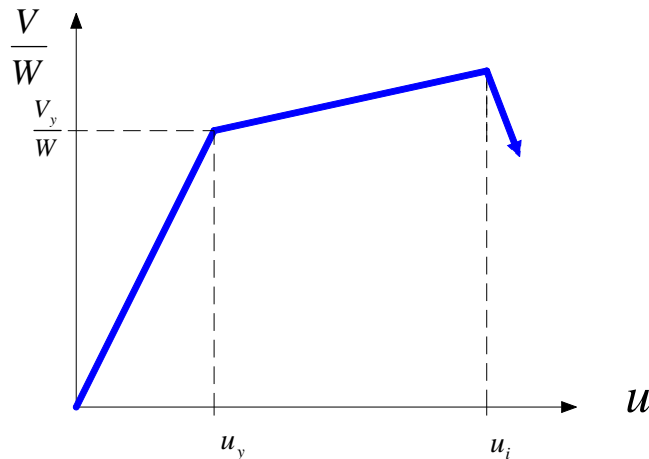


Figura A.2.2.5. Idealización bilineal de la Curva de Capacidad.

### 2) Pregunta

- ✓ Le agradecemos colocar en la tabla siguiente su mejor estimado del rango de valores posibles de  $\mu$  para un edificio del tipo escolar, de pocos pisos, construido en las épocas allí indicadas, las cuales se corresponden con los cambios en las normas.

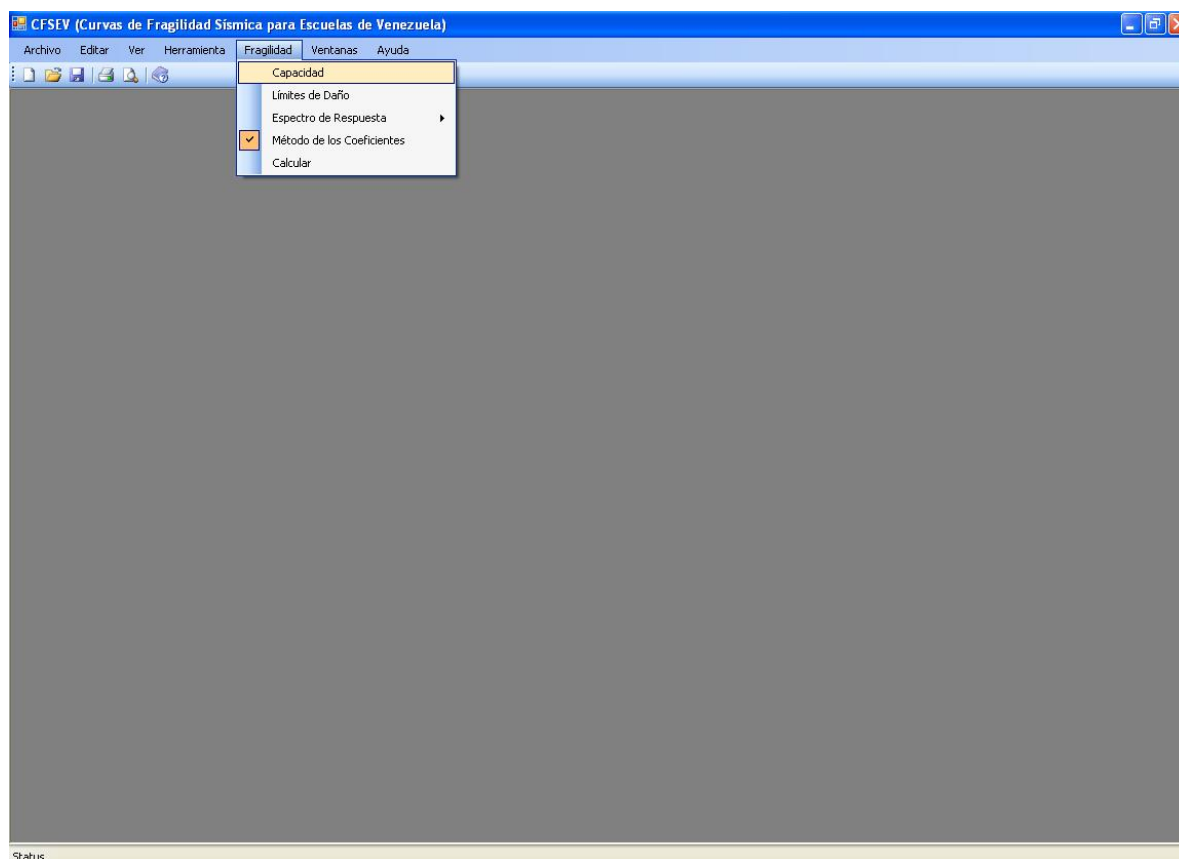
		Edificio Construido:			
		Antes de 1967	Entre 1967 y 1982	Entre 1982 y 1998 (ND3)	Después de 1998 (ND3)
Rango de Valores posibles de $\mu$	Menor				
	Mayor				

## **Anexo 2.3**

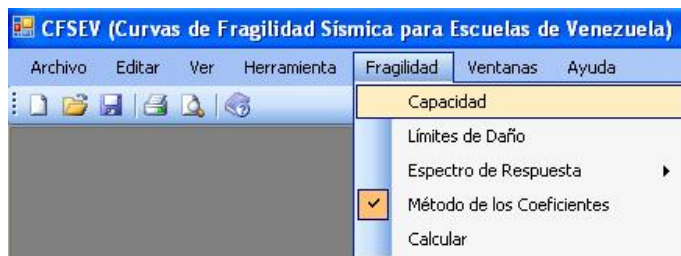
CFSEV Manual de Usuario

## Introducción

El programa CFSEV es una herramienta de implementación de la metodología desarrollada en este trabajo para la determinación de Curvas de Fragilidad Sísmicas para Escuelas de Venezuela, fue realizado bajo ambiente *Windows* mediante *Visual Basic 2008 Express Edition* (Microsoft Visual Studio, 2008). Permite dado los datos básicos de un edificio escolar estimar la curva de capacidad y las curvas de fragilidad sísmicas de un edificio. En este breve manual de usuario se presentaran las ventanas o formularios disponibles en el programa con comentarios para el llenado de los datos y lectura de los resultados.



Menú principal de programa CFSEV en cual consta de los siguientes cinco sub-menú:



El submenú Capacidad abre los siguientes formularios de datos:

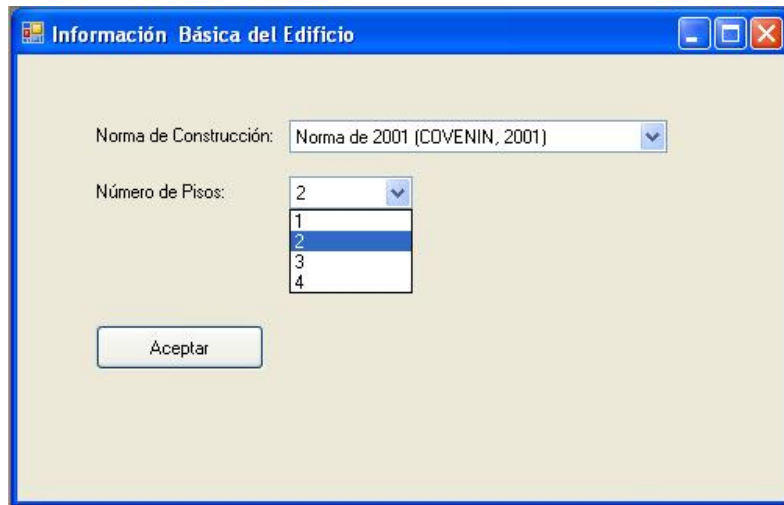
The screenshot shows a window titled "Información Básica del Edificio". It contains two dropdown menus: "Norma de Construcción:" and "Número de Pisos:". Below the menus is an "Aceptar" button.

Selección de la norma de construcción y diseño Venezonala entre las 9 opciones asociadas al año de construcción.

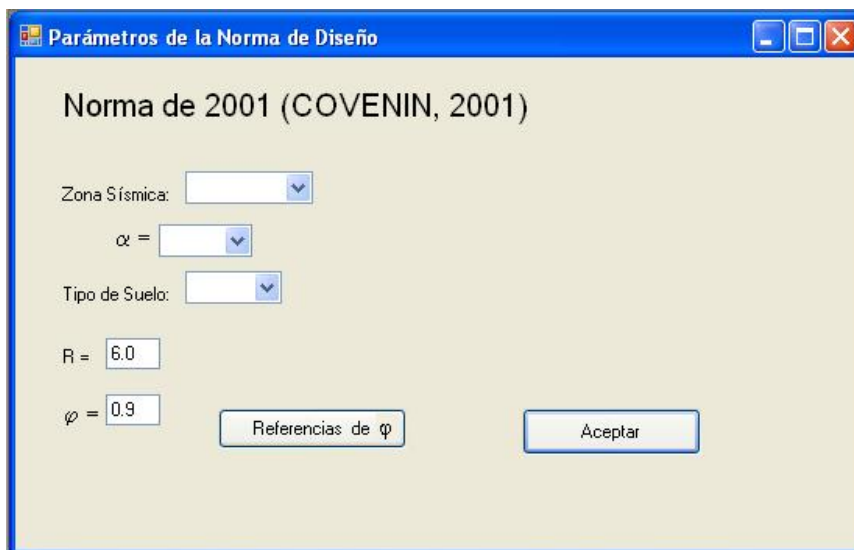
The screenshot shows the same window as above, but with the "Norma de Construcción:" dropdown menu open. The list of options is as follows:

- Sin Norma
- Norma de 1939 (MOP, 1939)
- Norma de 1947 (MOP, 1947)
- Norma de 1955 (MOP, 1955)
- Norma de 1967 (MOP, 1967)
- Norma de 1982 (COVENIN, 1982)
- Norma de 1998 (COVENIN, 1998)
- Norma de 2001 (COVENIN, 2001)
- Mampostería

Selección del número de pisos del edificio escolar, típicamente entre 1 y 4 pisos.



Seleccionado los datos básicos se deben seleccionar y llenar los datos asociados a cada una de las normas. Para la norma COVENIN (2001) y COVENIN (1998) se deben llenar los parámetros asociados al diseño sísmico o espectro de diseño.



Parámetros de la Norma de Diseño

Norma de 1998 (COVENIN, 1998)

Zona Sísmica:

$\alpha =$

Tipo de Suelo:

R =

$\varphi =$

Parámetros de la Norma de Diseño

Norma de 1982 (COVENIN, 1982)

Zona Sísmica:

$\alpha =$

Tipo de Suelo:

D =

The screenshot shows a dialog box titled "Parámetros de la Norma de Diseño" with a blue header bar. The main content area is light beige and contains the text "Norma de 1967 (MOP, 1967)". Below this, there are four dropdown menus: "Zona Sísmica:", "Tipo de Estructura:", "Tipo de Suelo:", and "Grupo:". Each dropdown menu is currently empty. At the bottom right of the dialog, there is a button labeled "Aceptar".

The screenshot shows the same dialog box titled "Parámetros de la Norma de Diseño" for the "Norma de 1955 (MOP, 1955)". The "Zona Sísmica:" dropdown menu is open, displaying a list of three options: "Zona A", "Zona B", and "Zona C". The "Zona C" option is highlighted with a blue background. The other dropdown menus are not visible, and the "Aceptar" button is at the bottom right.

Parámetros de la Norma de Diseño

Norma de 1947 (MOP, 1947)

Zona Sísmica:

Zona C  
Zona A  
Zona B

Aceptar

Parámetros de la Norma de Diseño

Norma de 1939 (MOP, 1939)

Zona Sísmica:

Zona 0  
Zona 1

Aceptar

En el caso particular de escuelas de 1 piso de mampostería, se debe seleccionar:

The image shows a software dialog box titled "Parámetros de la Norma de Diseño". Inside, the "Mampostería" section contains two dropdown menus. The first, "Zona Sísmica", is set to "Zona 1". The second, "Tipo de Mampostería", is open, showing a list of four options: "Confinada Techo Liviano", "Confinada Techo Pesado", "No Confinada Techo Liviano", and "No Confinada Techo Pesado". Below these fields is an "Aceptar" button.

Luego de llenar los datos de la norma correspondiente al edificio escolar en estudio, aparece el siguiente formulario el cual presenta los valores por defecto utilizados en este trabajo necesario en la metodología desarrollada. Estos valores pueden ser editados por el usuario si considera que de alguna manera puede colocar un valor particular con mayor precisión.

**Párametros de la Capacidad**

**Parámetros de sobrerresistencia cedente y última para los periodos indicados:**

Antes de 1967		Entre 1967 y 1982		Después de 1982	
(Nivel de Diseño Bajo, ND1)		(Nivel de Diseño Medio, ND2)		(Nivel de Diseño Especial, ND3)	
$\Omega_y$	$\Omega_u$	$\Omega_y$	$\Omega_u$	$\Omega_y$	$\Omega_u$
1.60	1.50	1.70	1.50	1.80	1.50

**Parámetros indicados de acuerdo al número de pisos:**

					Antes de 1982	Después de 1982
N	hn (m)	$\alpha_1$	$\beta_1$	Ta (seg)	Te (seg)	Te (seg)
1	3	1.00	1.00	0.16	0.34	0.27
2	6	1.15	0.96	0.27	0.58	0.45
3	9	1.20	0.93	0.36	0.79	0.61
4	12	1.25	0.91	0.45	0.99	0.76

**Valores del factor de ductilidad nominal ( $\mu$ ) para distintos periodos:**

Antes de 1967	Entre 1967 y 1982	Entre 1982 y 1998 (ND3)	Después de 1998 (ND3)
2.0	3.0	4.0	4.5

$\lambda =$

**Valores del factor Fw**

N	MOP 1939	MOP 1947	MOP 1955	MOP 1967	COVENIN 1982	COVENIN 1998 y 2001
1	0.857	0.857	0.857	0.857	0.857	0.857
2 - 4	1.143	1.000	0.857	0.929	0.929	1.000

Luego se debe ingresar al submenú Límites de Daño si se desean editar los valores por defecto.



**CFSEV (Curvas de Fragilidad Sísmica para Escuelas de Venezuela)**

Archivo Editar Ver Herramienta **Fragilidad** Ventanas Ayuda

- Capacidad
- Límites de Daño**
- Espectro de Respuesta
- Método de los Coeficientes
- Calcular

**Límites de Daño:**

Ingresar Datos por:

$U_1 = 0.70 U_y$

$U_2 = 1.00 U_y$

$U_3 = 1.00 U_y + 0.25 (U_u - U_y)$

$U_4 = 1.00 U_u$

Seguidamente se debe ingresar al submenú Espectro de Respuesta o Demanda en el cual se puede seleccionar varias opciones de formas espectrales a utilizar para caracterizar la demanda sísmica.

**CFSEV (Curvas de Fragilidad Sísmica para Escuelas de Venezuela)**

Archivo Editar Ver Herramienta **Fragilidad** Ventanas Ayuda

- Capacidad
- Límites de Daño
- Espectro de Respuesta**
  - Espectro COVENIN 2001
  - Espectro PM25
  - Espectro López et al, 2006
  - Espectro NGA, 2008
  - Espectro Particular
- Método de los Coeficientes
- Calcular

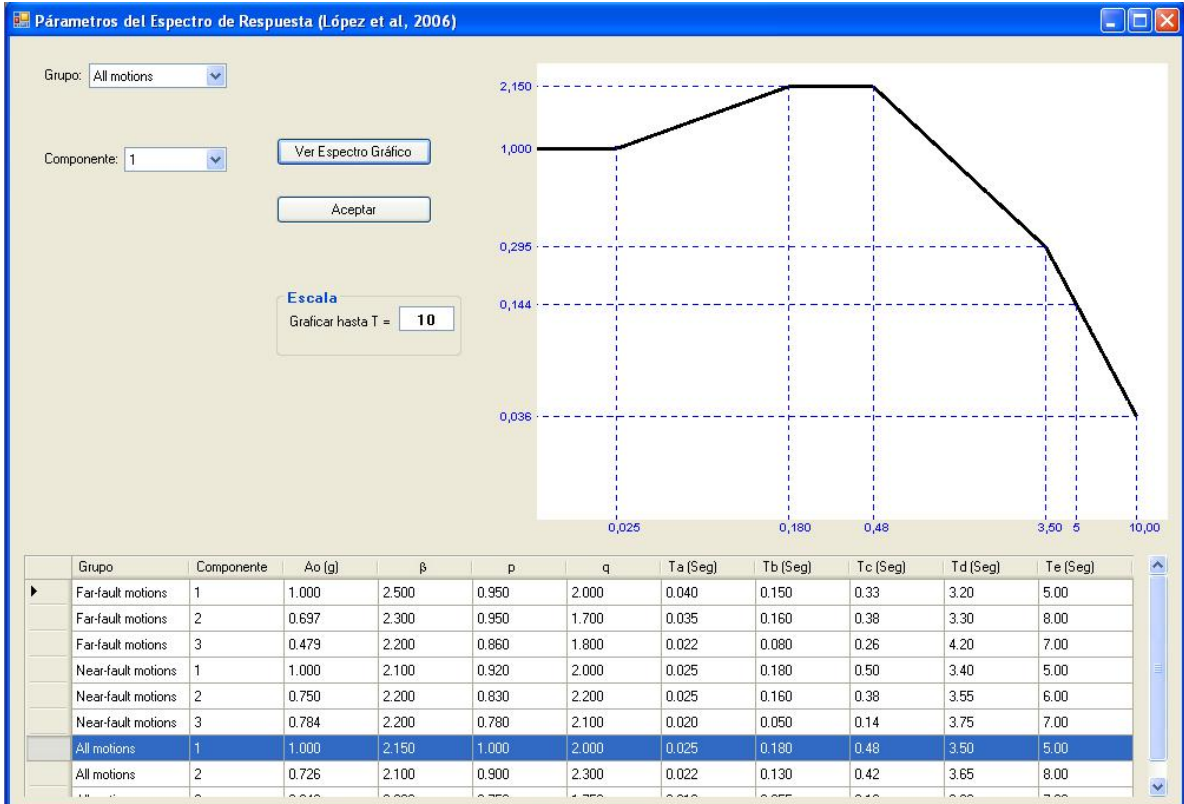
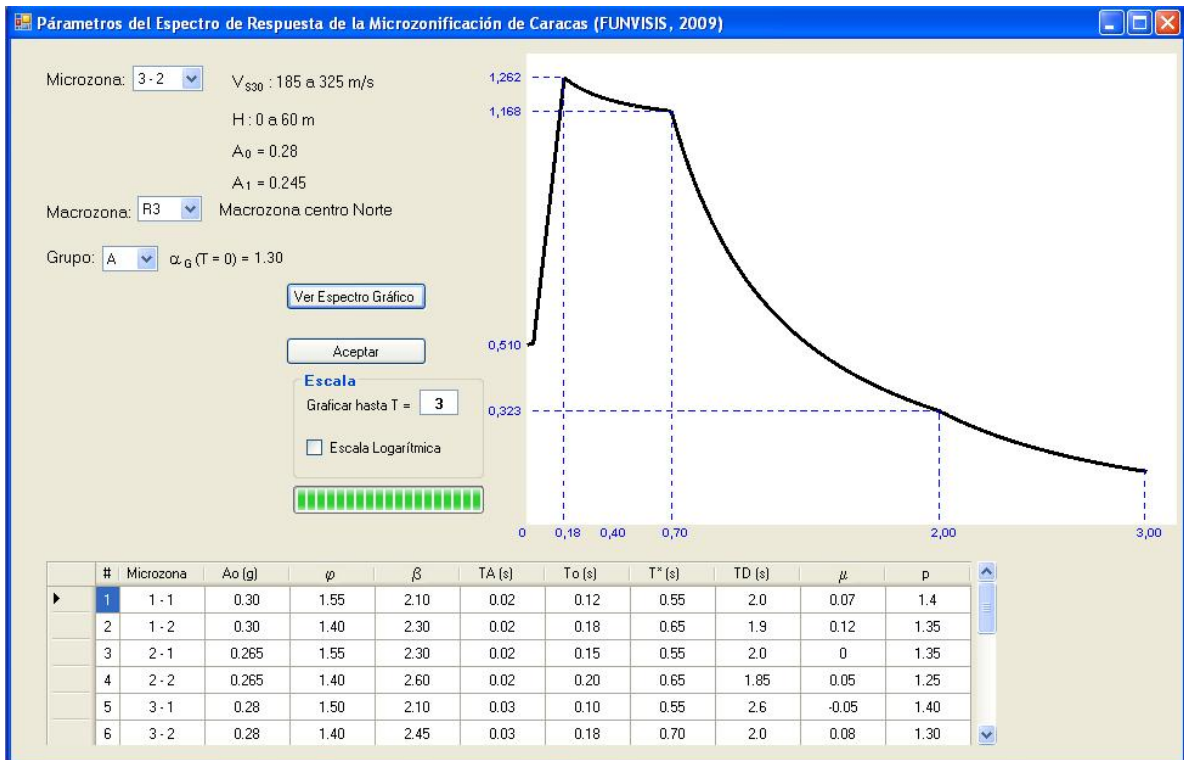
**Parámetros del Espectro de Respuesta (COVENIN, 2001)**

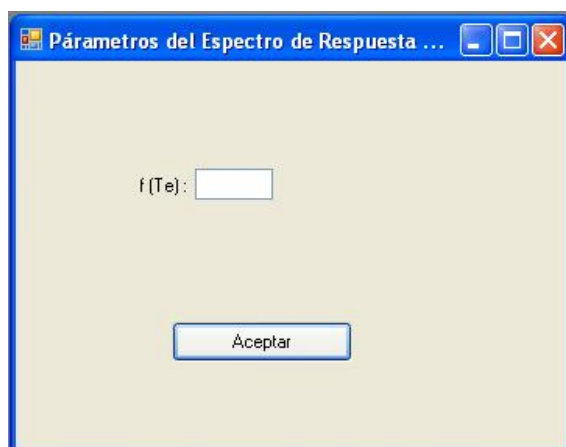
Forma Espectral:

Beta:  T\*:  P:

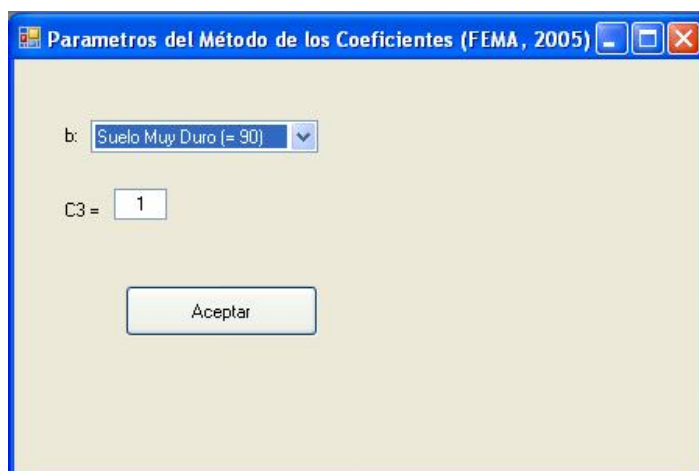
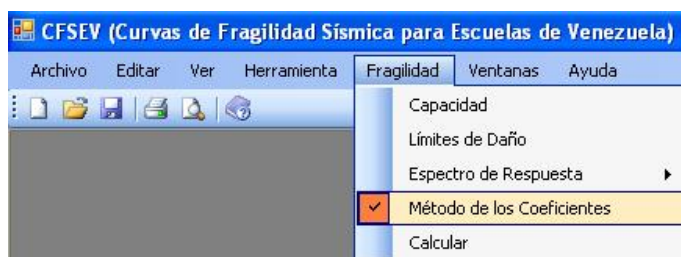
Factor de Importancia:  F. Imp.:

Factor de  $\phi$

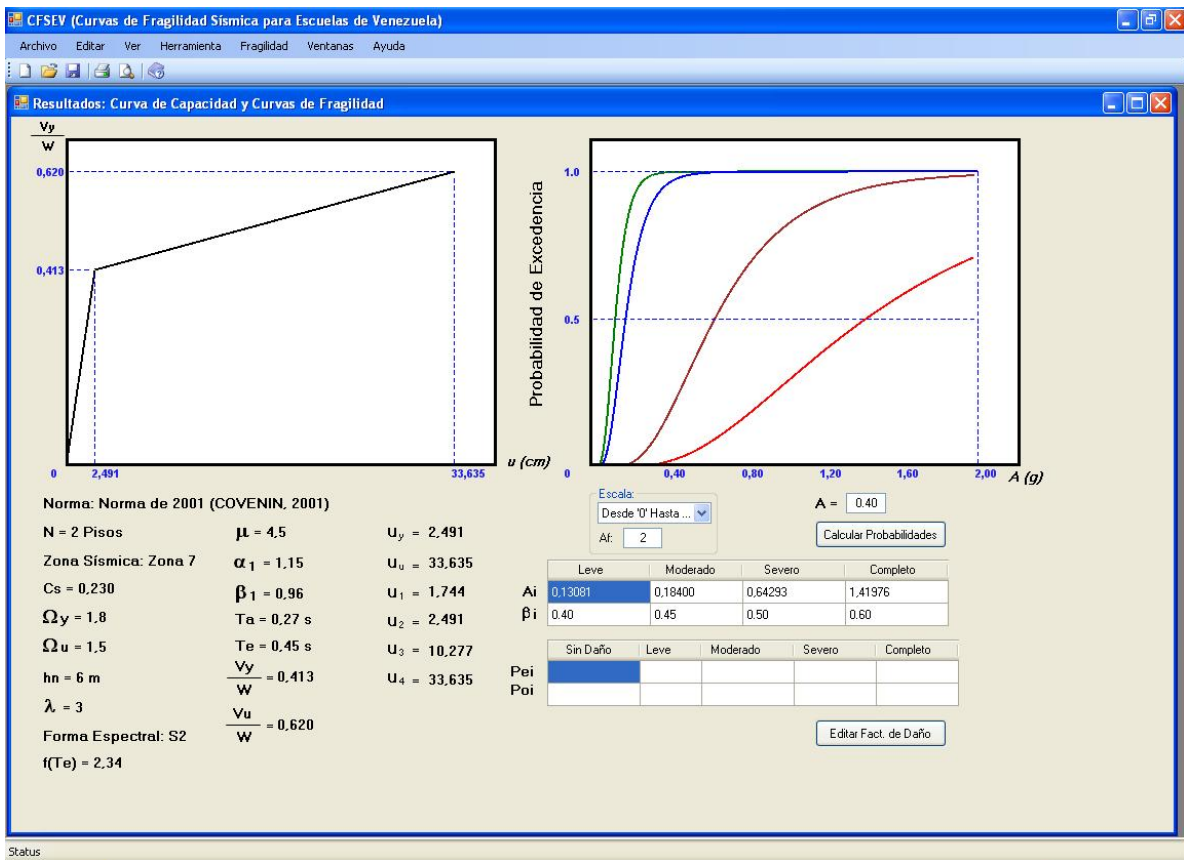




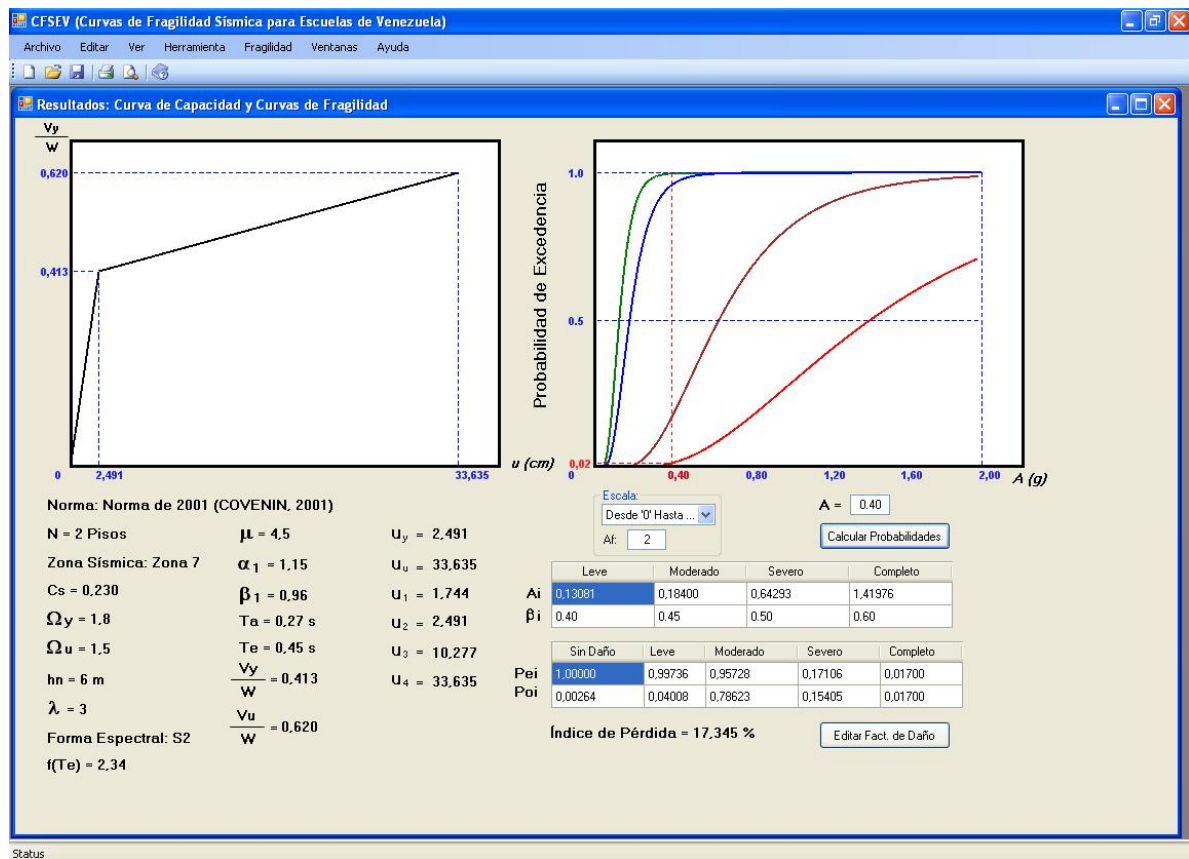
Una vez definida la forma espectral se debe colocar parámetros asociados al método de los coeficientes:



Finalmente en el submenú Calcular se pueden visualizar los resultados de la metodología de manera bastante gráfica.



En el formulario de resultado se pueden ver a la izquierda la curva de capacidad y a la derecha a las 4 curvas de fragilidad sísmica aproximadas. También se puede colocar en valor de coeficiente de aceleración del terreno y determinar el índice de pérdida dado ese terremoto.

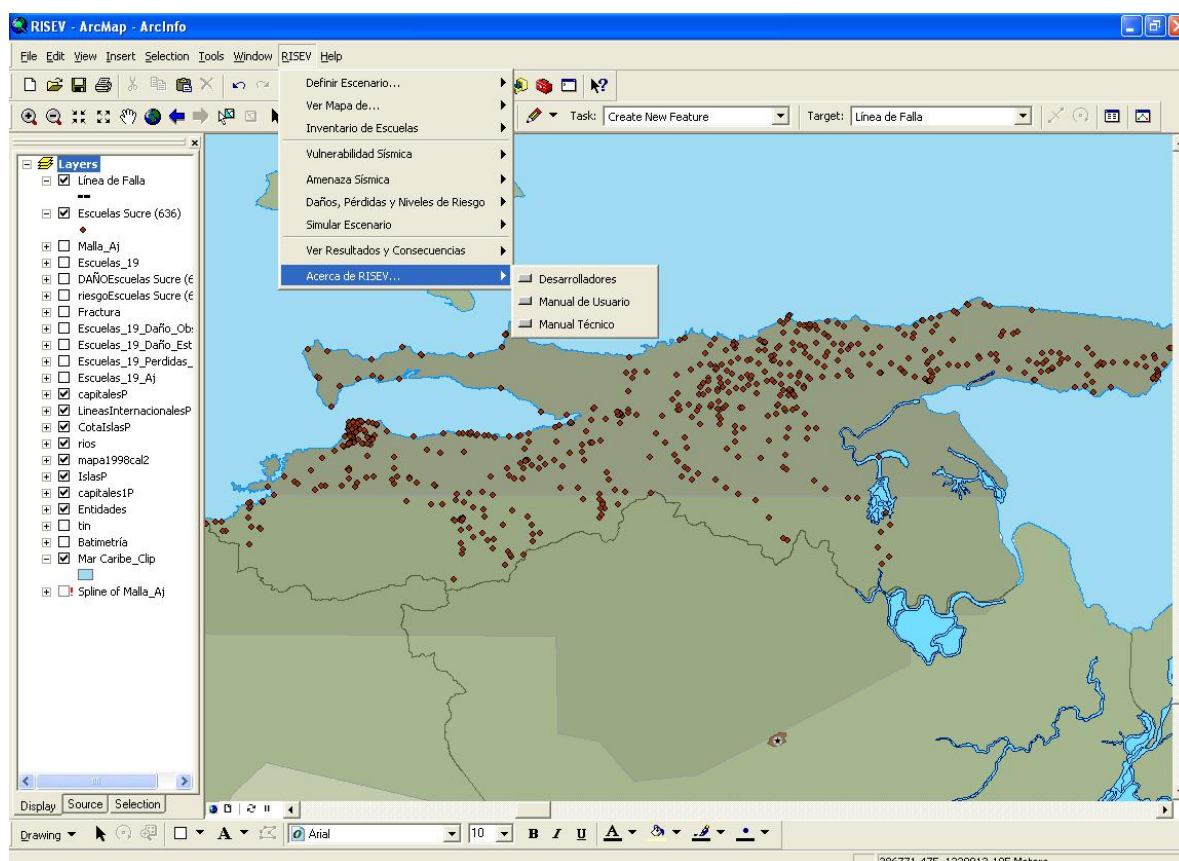


## **Anexo 2.4**

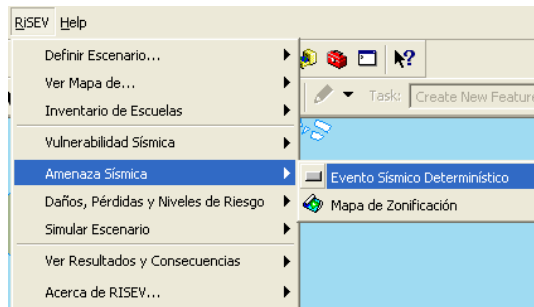
RiSEV Manual de Usuario

## Introducción

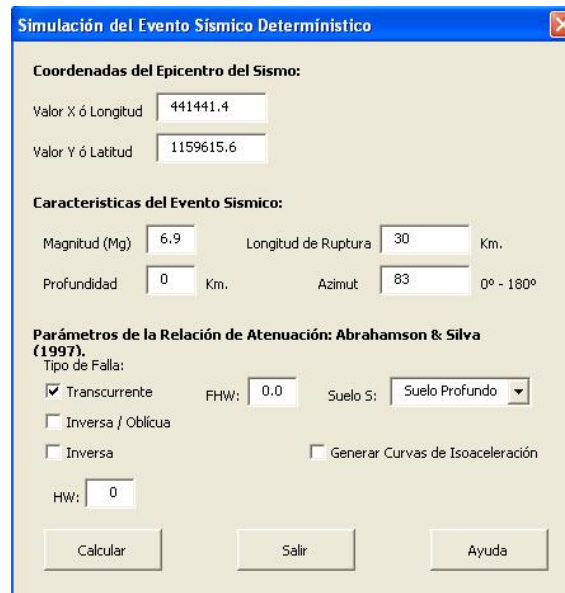
El programa RiSEV es una herramienta de implementación de la metodología desarrollada en este trabajo para la determinación de Daños, Pérdidas y Riesgo Sísmico en Escuelas de Venezuela, fue realizado a partir de la programación en el entorno del *Visual Basic Application* (VBA) interno del Sistema de Información Geográfica (SIG) conocido como ArcGIS 9.2 (ESRI, 2009). De una base de datos de edificios escolares con los datos básicos de cada uno de los edificios, estimar la curva de capacidad y las curvas de fragilidad sísmicas de todos los edificios de la base de datos. Por otro lado permite simular un evento sísmico particular mediante el cual se estiman las aceleraciones en cada sitio de la escuela. En este breve manual de usuario se presentaran las ventanas o formularios disponibles en el programa RiSEV con comentarios para el llenado de los datos y lectura de los resultados.



Menú principal de programa RiSEV en cual consta de los siguientes cinco sub-menú:



Para la simulación de evento sísmico se debe colocar las coordenadas del epicentro en UTM, la magnitud de momento, longitud de la ruptura, profundidad y azimut de la ruptura. También deberán darse los parámetros acordes a la relación de atenuación seleccionada.



**Simulación del Evento Sísmico Determinístico**

**Coordenadas del Epicentro del Sismo:**

Valor X ó Longitud: 441441.4  
Valor Y ó Latitud: 1159615.6

**Características del Evento Sísmico:**

Magnitud (Mg): 6.9      Longitud de Ruptura: 30 Km.  
Profundidad: 0 Km.      Azimut: 83 0° - 180°

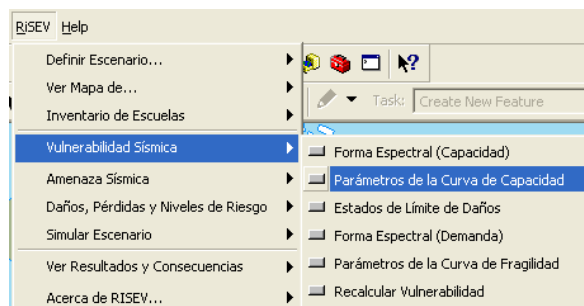
**Parámetros de la Relación de Atenuación: Abrahamson & Silva (1997).**

Tipo de Falla:  
 Transcurrente      FHW: 0.0      Suelo S: Suelo Profundo  
 Inversa / Oblicua  
 Inversa       Generar Curvas de Isoaceleración

HW: 0

Botones: Calcular, Salir, Ayuda

Luego de simulado el evento sísmico deberán darse los parámetros asociados a la vulnerabilidad sísmica, necesario para construir las curvas de fragilidad.



**Espectro de Capacidad**

Forma Espectral: S2 Ver T\*: 0.7

Factor de Importancia: B2 Ver B: 2.6

Factor de Fi: 0.9 Alfa: 1

Editar

Calcular Espectro Salir Ayuda

**Capacidad**

**Valores adoptados de sobrerresistencia cedente y última para los periodos indicados:**

Antes de 1967 (Nivel de diseño bajo, ND1)		Entre 1967 y 1982 (Nivel de diseño Medio, ND2)		Después de 1982 (Nivel de diseño especial, ND3)	
$\Omega_y$	$\Omega_u$	$\Omega_y$	$\Omega_u$	$\Omega_y$	$\Omega_u$
1.60	1.50	1.70	1.50	1.80	1.50

**Valores de los parámetros indicados de acuerdo al número de pisos:**

Nº	hn (m)	$\alpha_1$	$\beta_1$	Ta (seg)	Antes de 1982	Después de 1982
					Te(seg)	Te(seg)
1	3	1.00	1.00	0.16	0.34	0.27
2	6	1.15	0.96	0.27	0.58	0.45
3	9	1.20	0.93	0.36	0.79	0.61
4	12	1.25	0.91	0.45	0.99	0.76

**Valores del factor de ductibilidad ( $\mu$ ) para distintos periodos:**

Antes de 1967	Entre 1967 y 1982	Entre 1982 y 1998 (ND3)	Después de 1998 (ND3)	$\lambda$ :
2.0	3.0	4.0	4.5	3.0

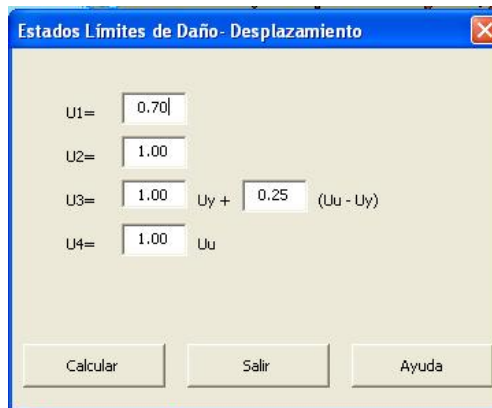
**Valores de fw según la Norma:**

Para 1 Piso: 0.857

Para más de 1 Piso:

1939	1947	1955	1967	1982	1998, 2001
1.143	1.00	0.857	0.929	0.929	1.00

Calcular Salir Ayuda

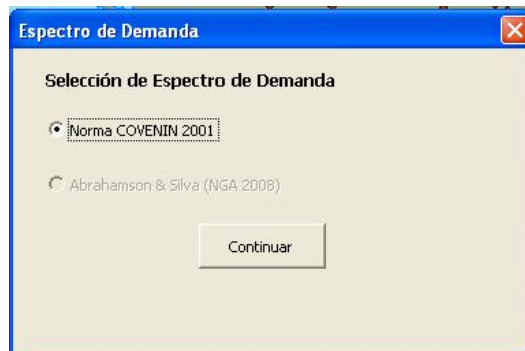


**Estados Límites de Daño - Desplazamiento**

U1= 0.70  
 U2= 1.00  
 U3= 1.00 U<sub>y</sub> + 0.25 (U<sub>u</sub> - U<sub>y</sub>)  
 U4= 1.00 U<sub>u</sub>

[Calcular] [Salir] [Ayuda]

Para representar la forma espectral de la demanda se debe seleccionar:



**Espectro de Demanda**

**Selección de Espectro de Demanda**

Norma COVENIN 2001  
 Abrahamson & Silva (NGA 2008)

[Continuar]

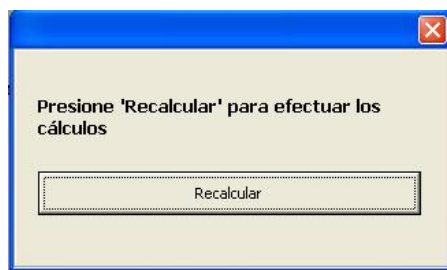
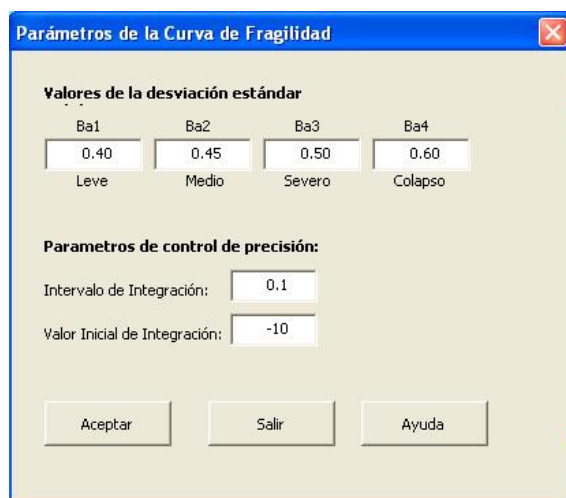


**Espectro de Demanda**

Forma Espectral: S2 Ver T\*: 0.7  
 Factor de Importancia: B2 Ver B: 2.6  
 Factor de Fi: 0.9 p: 1.00  
 Alfa: 1

Editar

[Calcular Espectro] [Salir] [Ayuda]



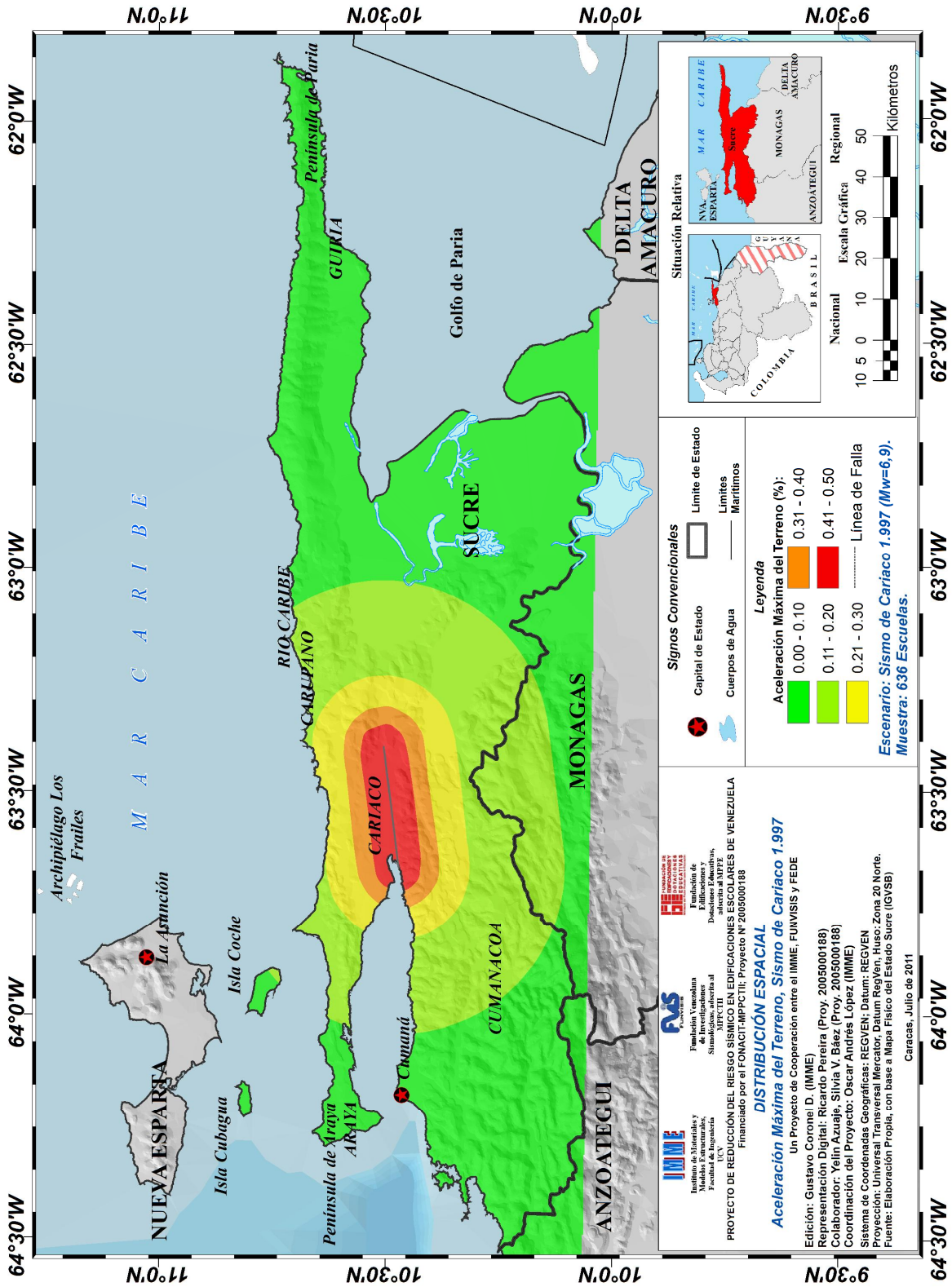
Luego para la determinación de consecuencias (daños, pérdidas sociales y económicas y niveles de riesgo sísmico) se pueden modificar los siguientes parámetros.

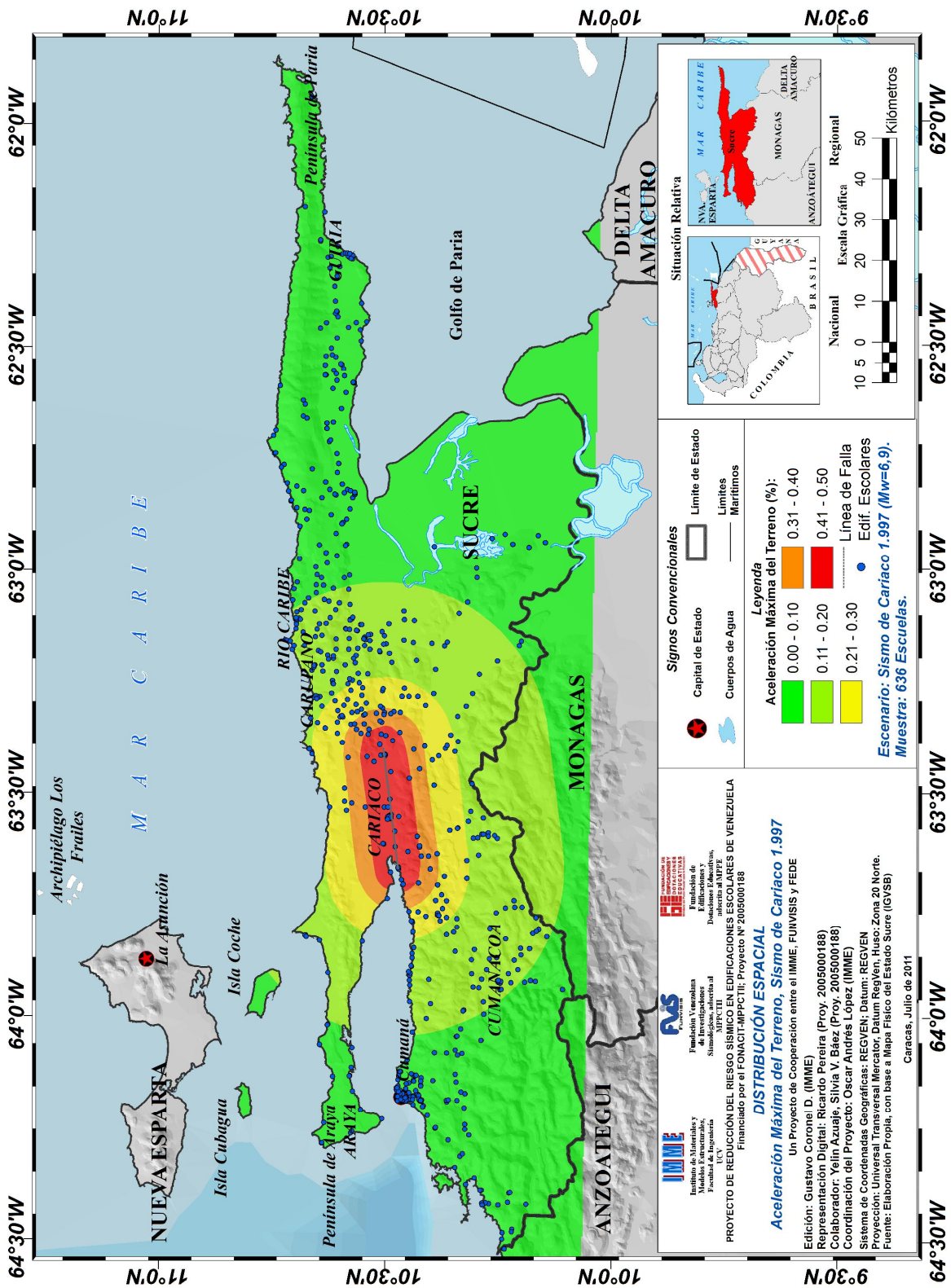


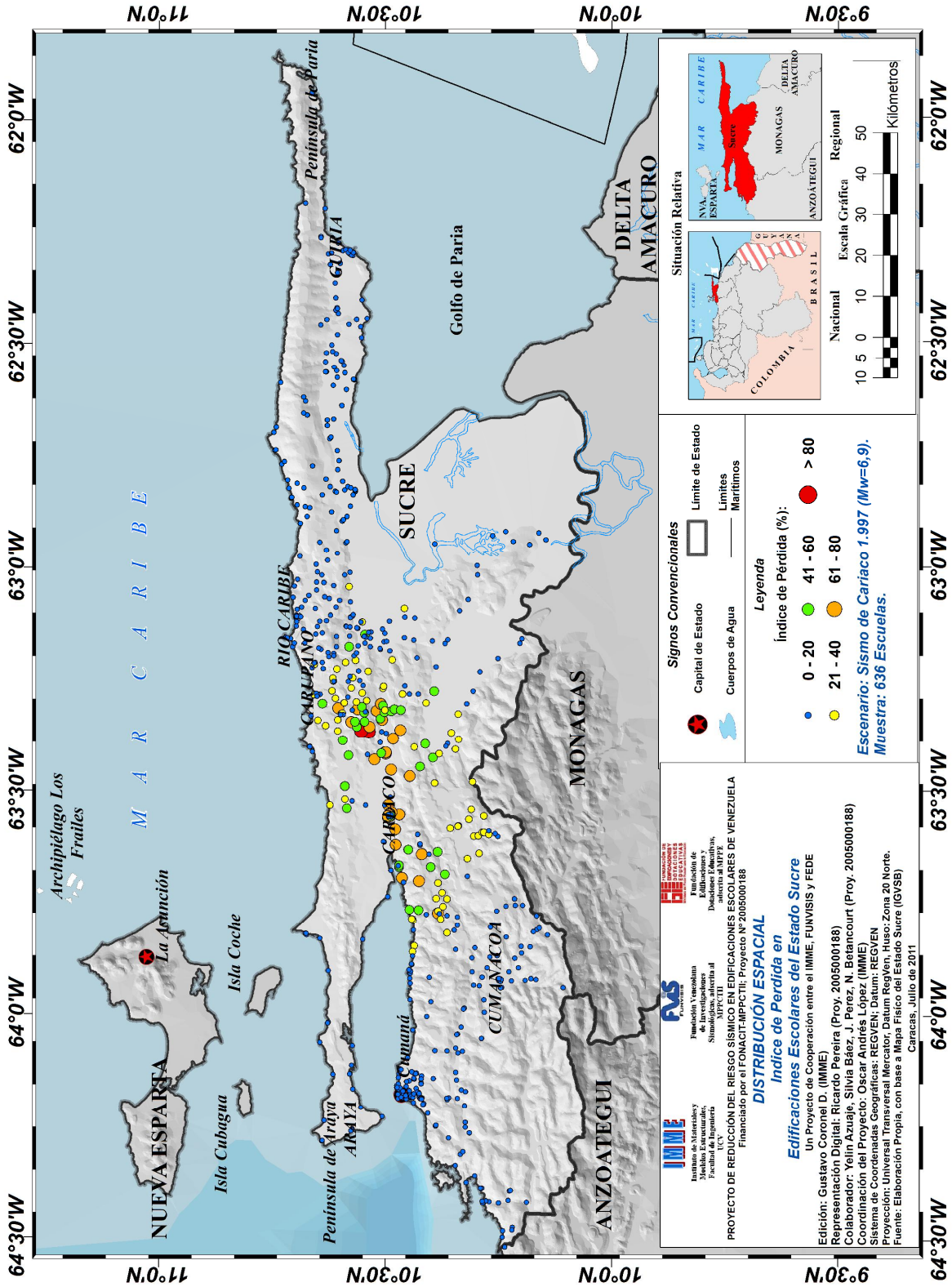
## **Anexo 2.5**

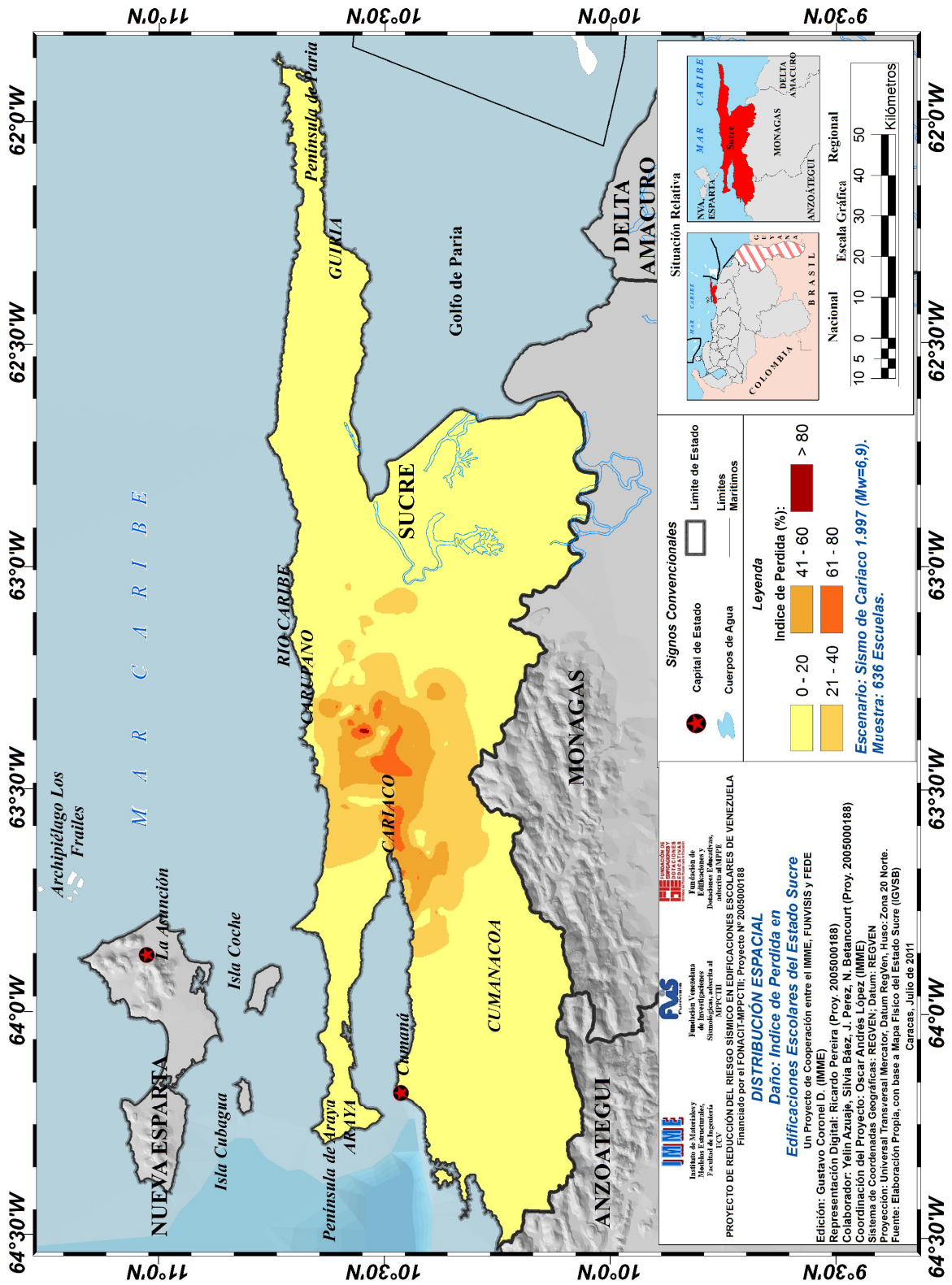
Mapas de Resultados:

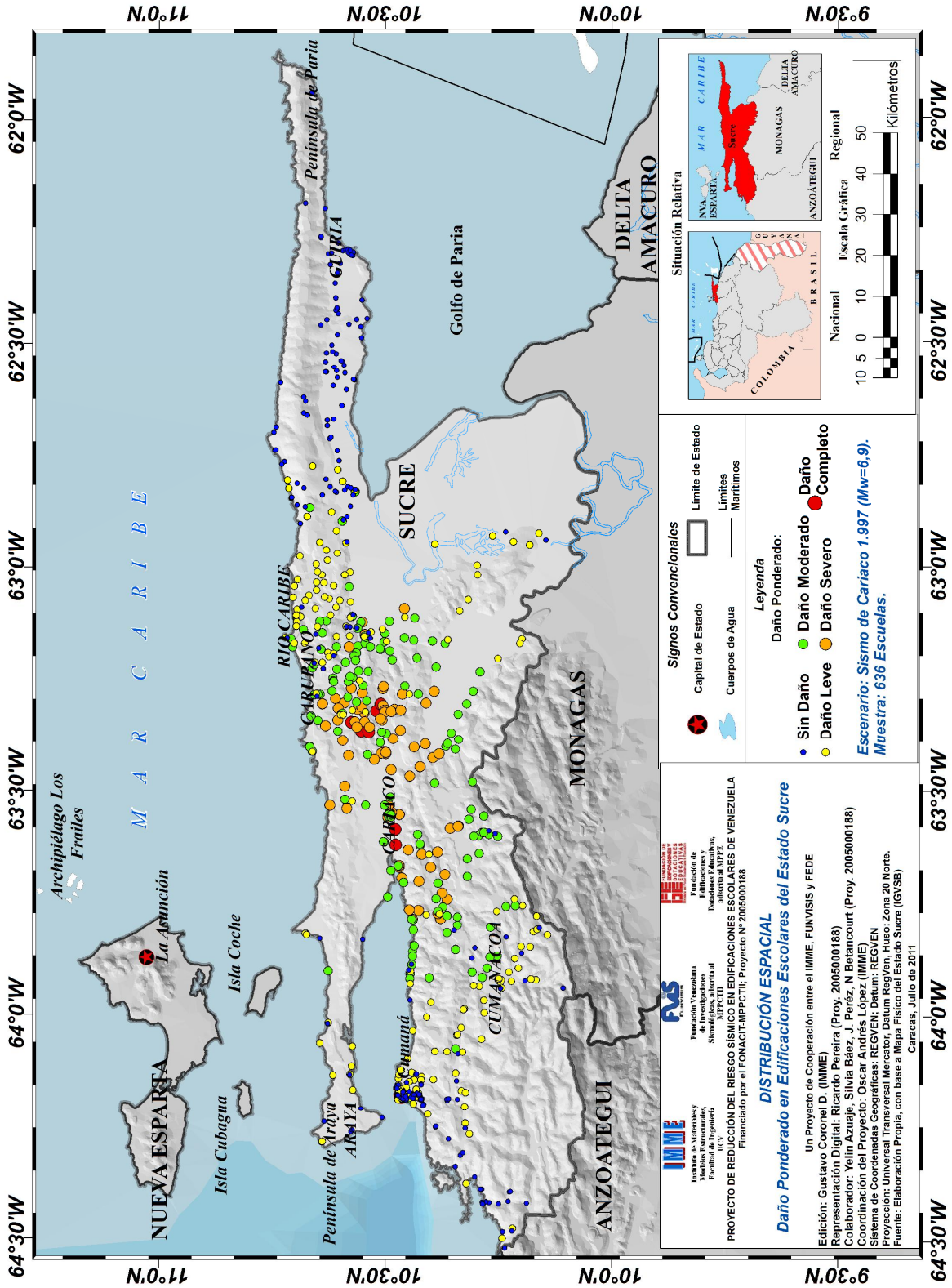
Escenarios del Estado Sucre

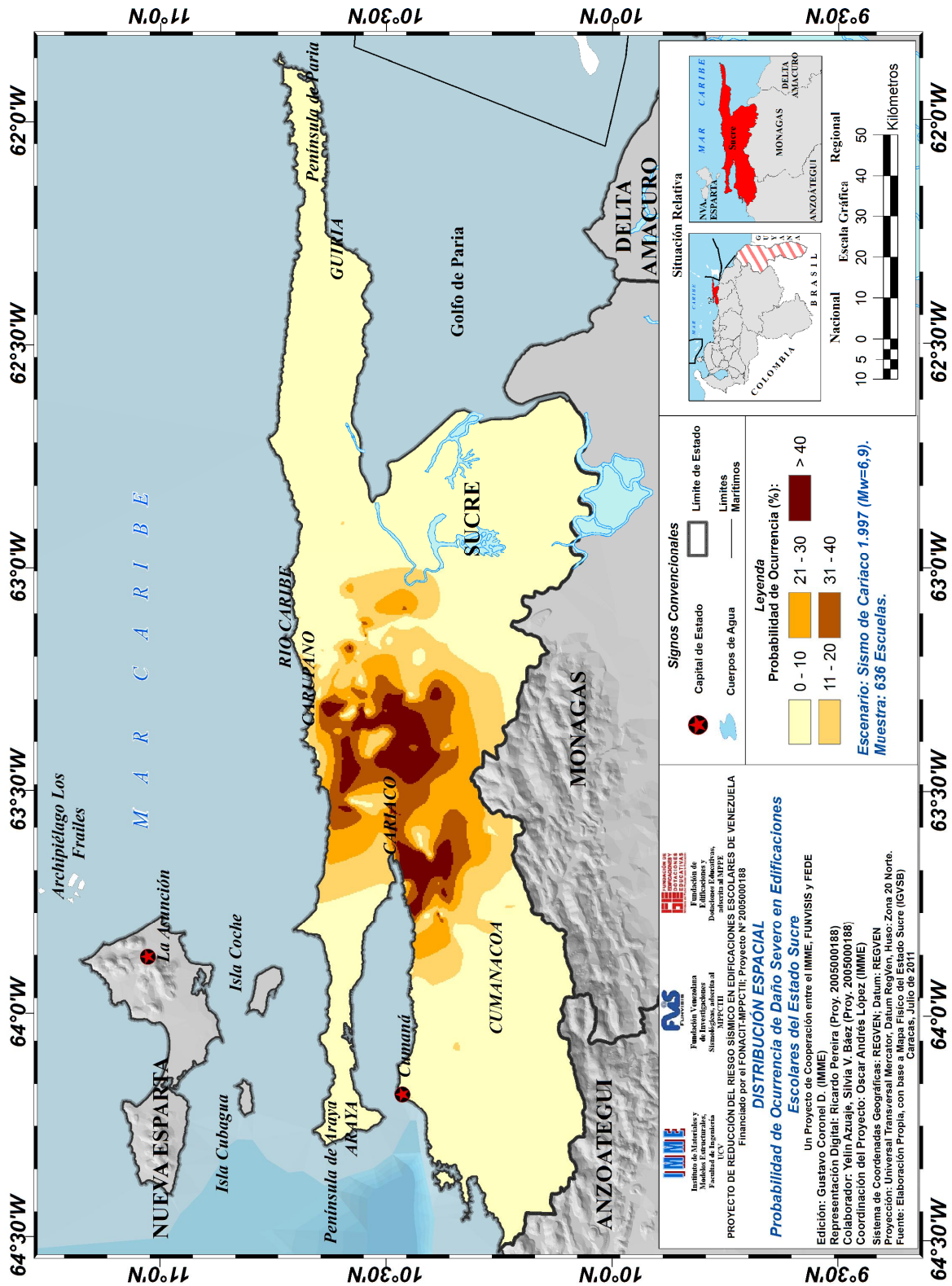


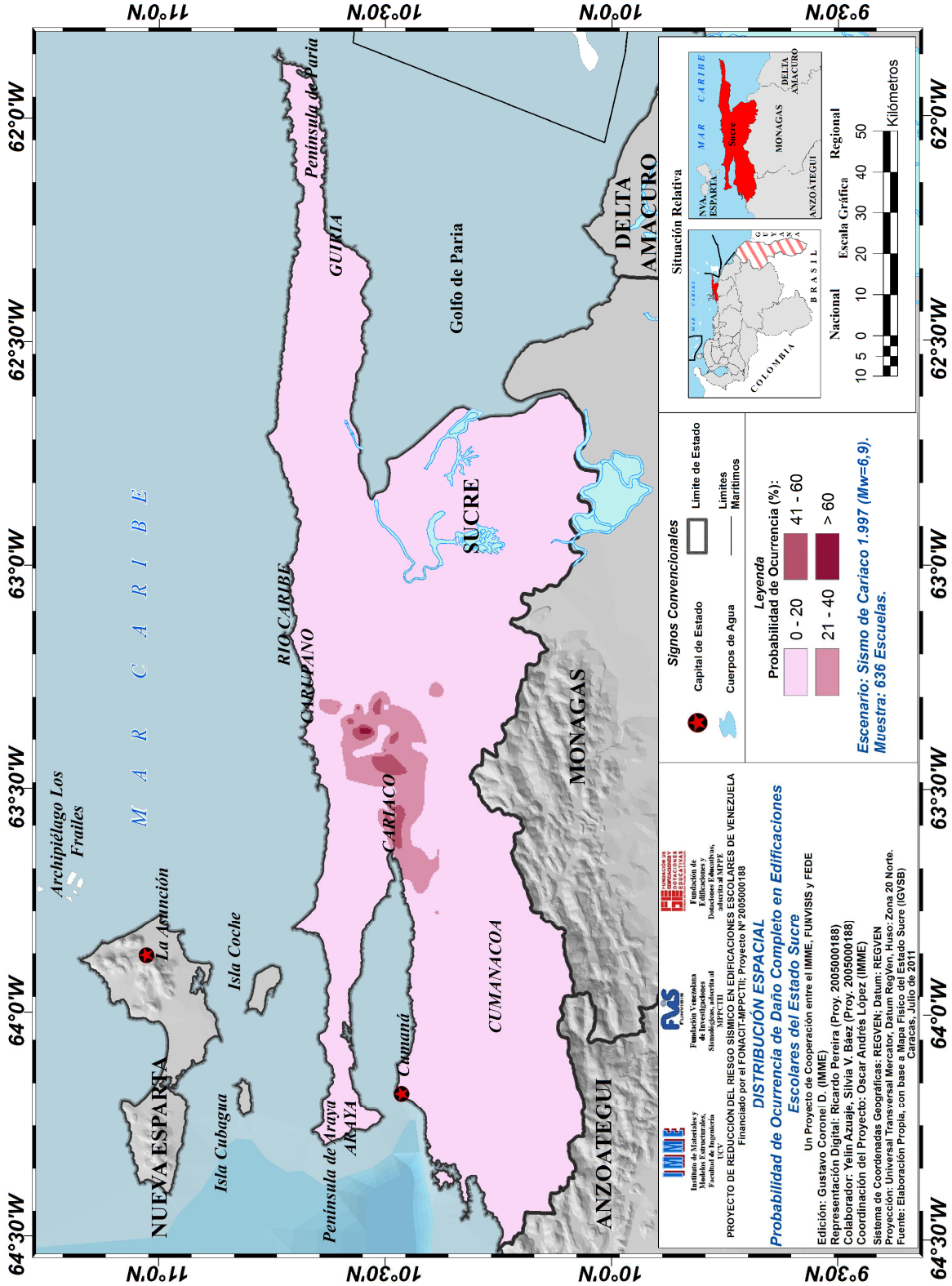


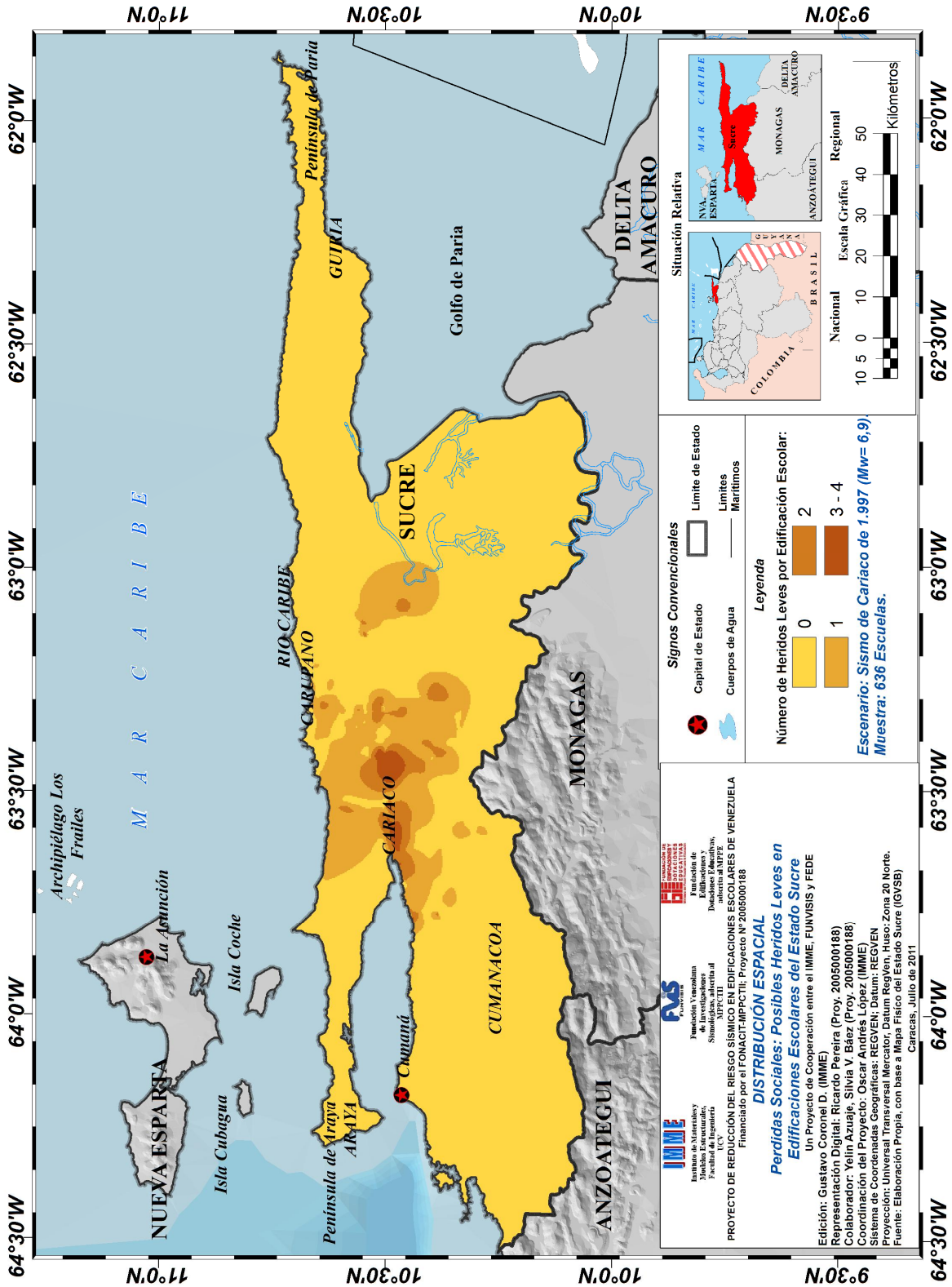


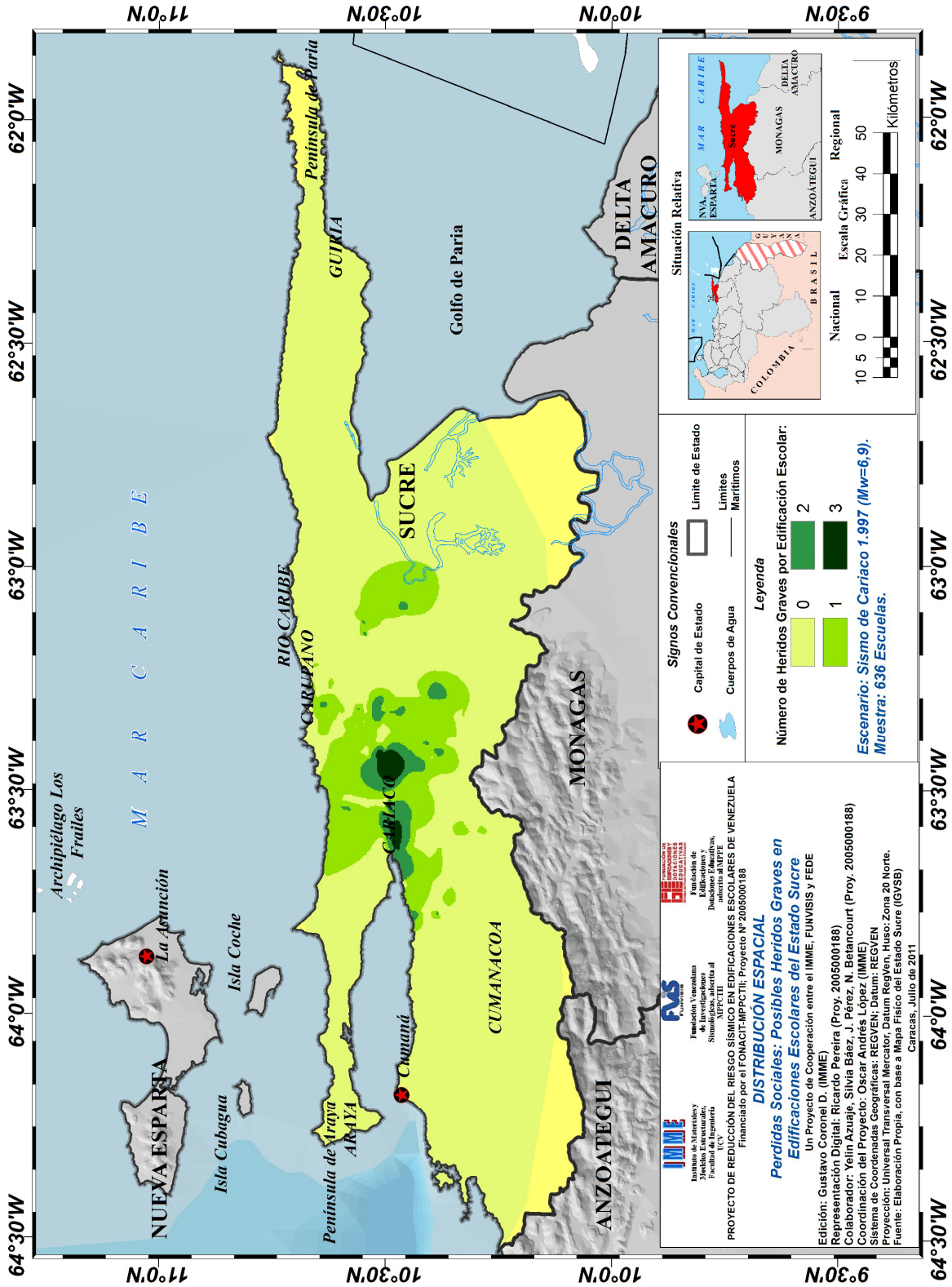


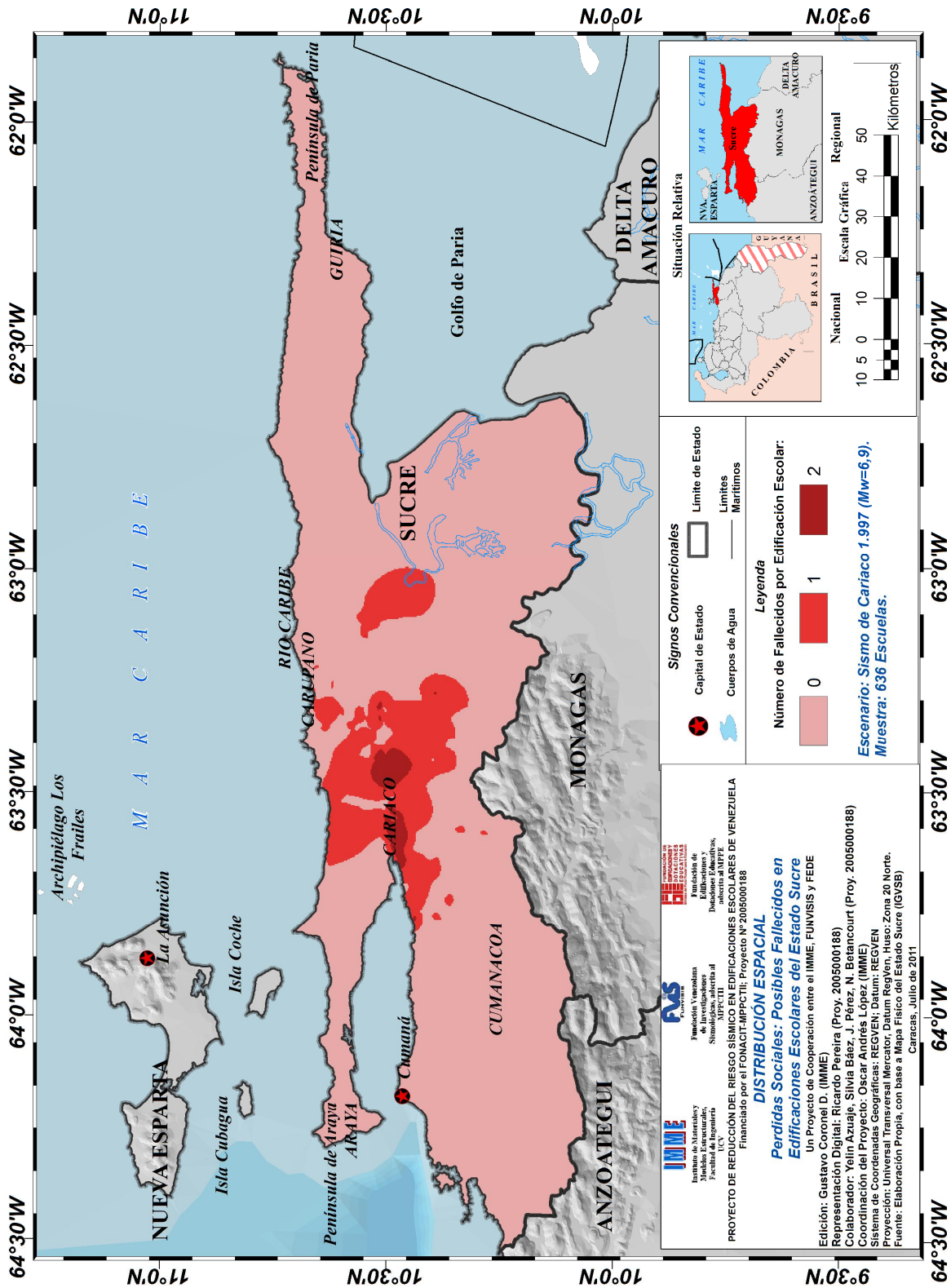


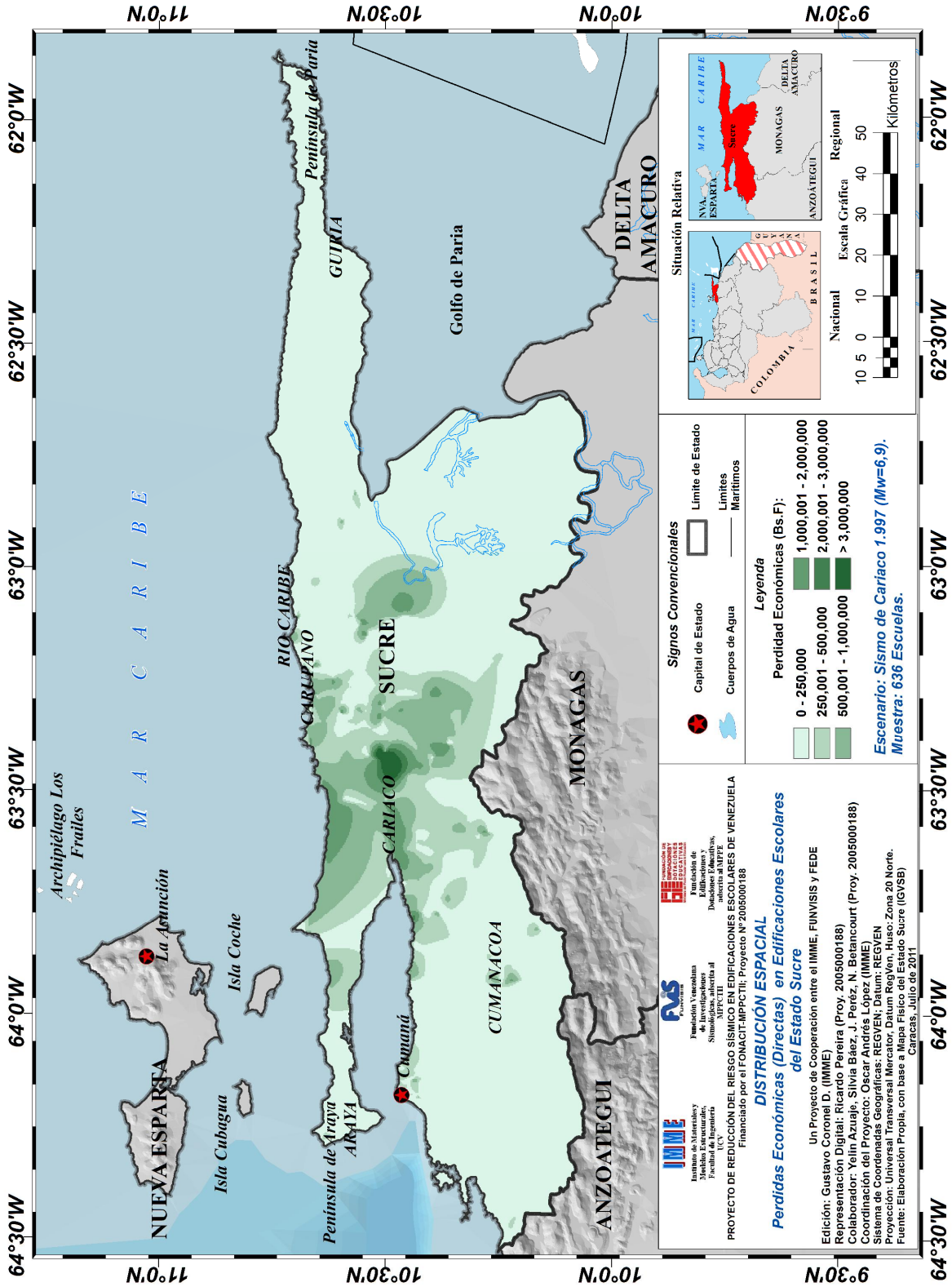


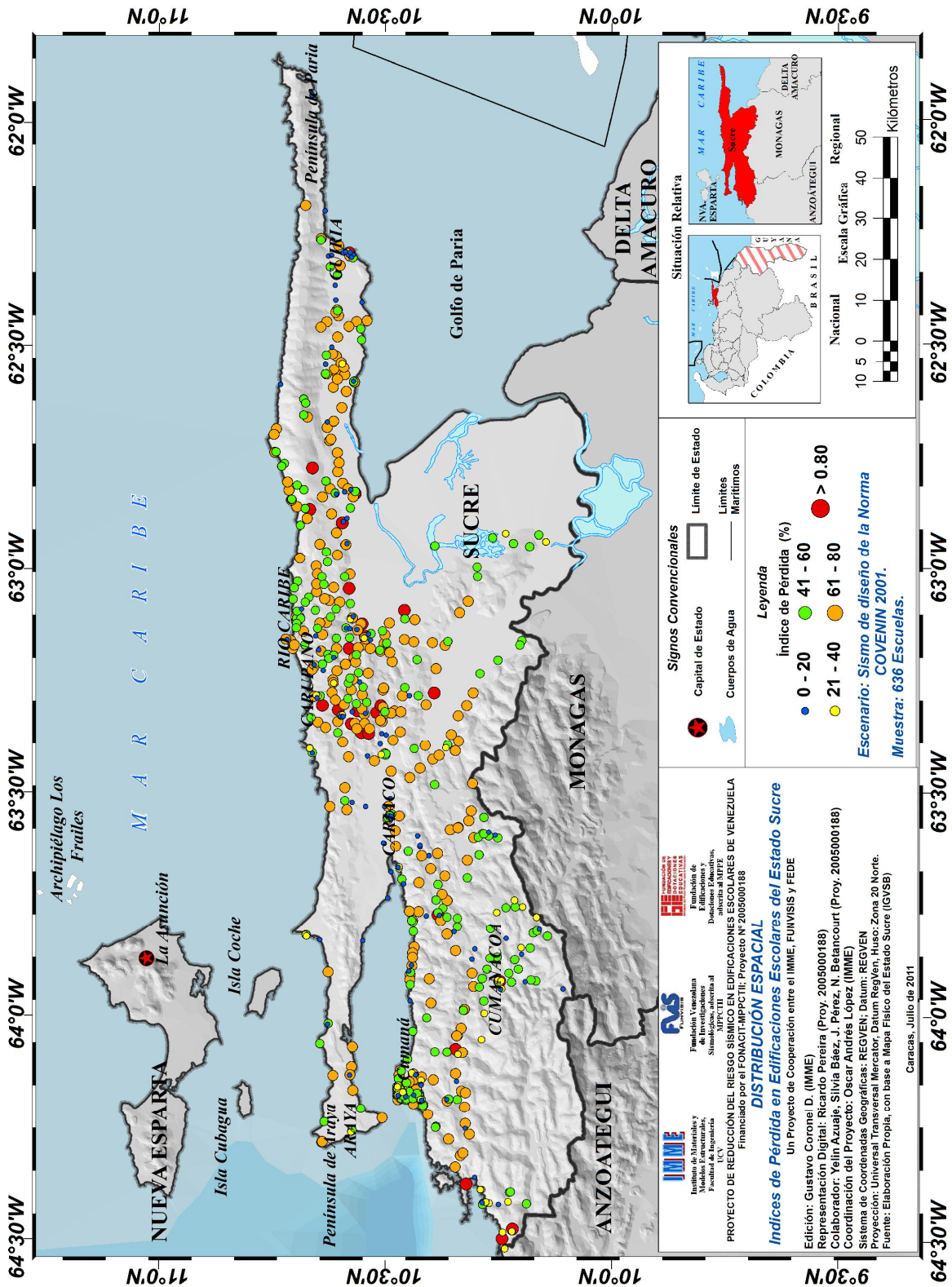


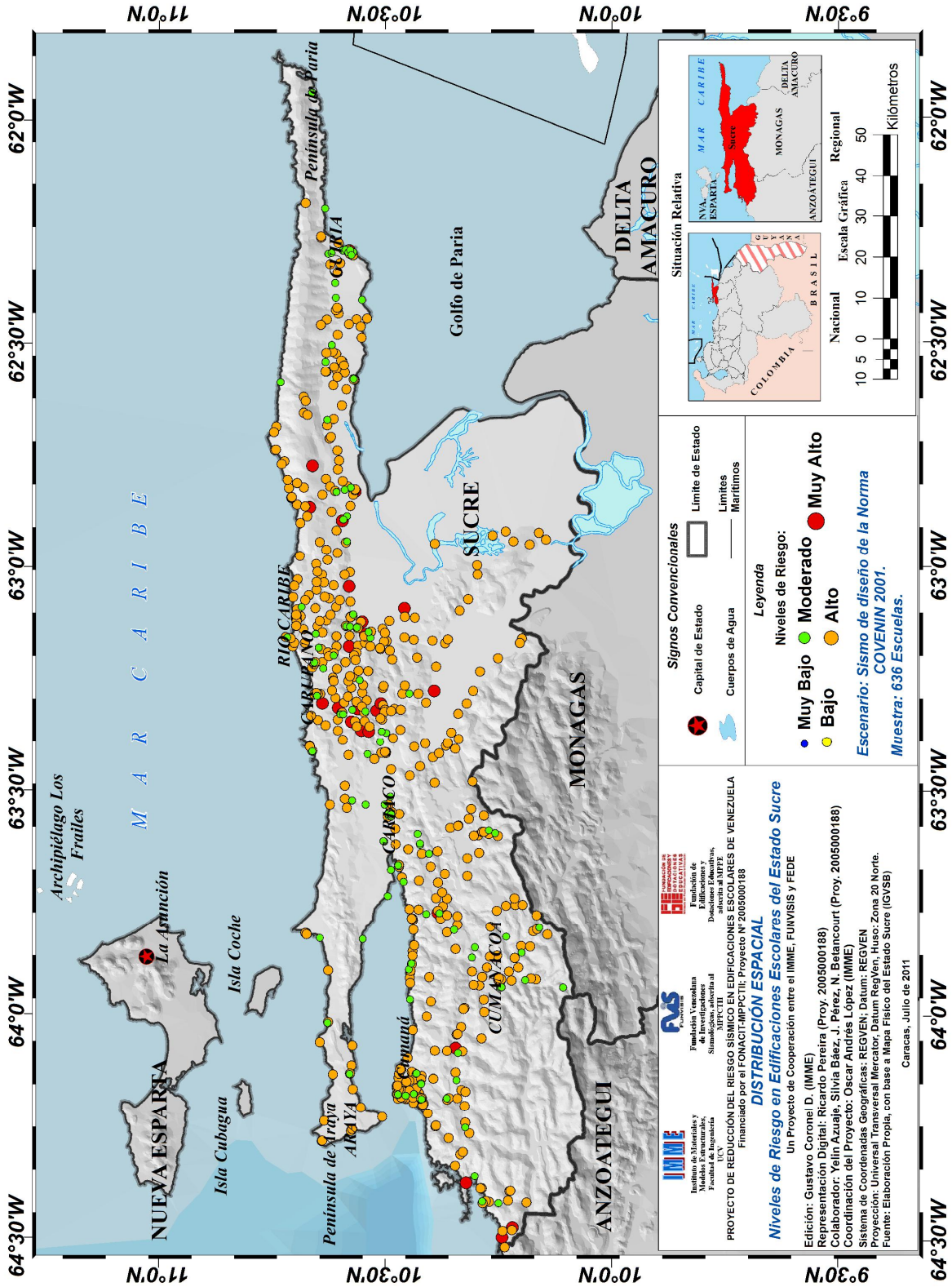


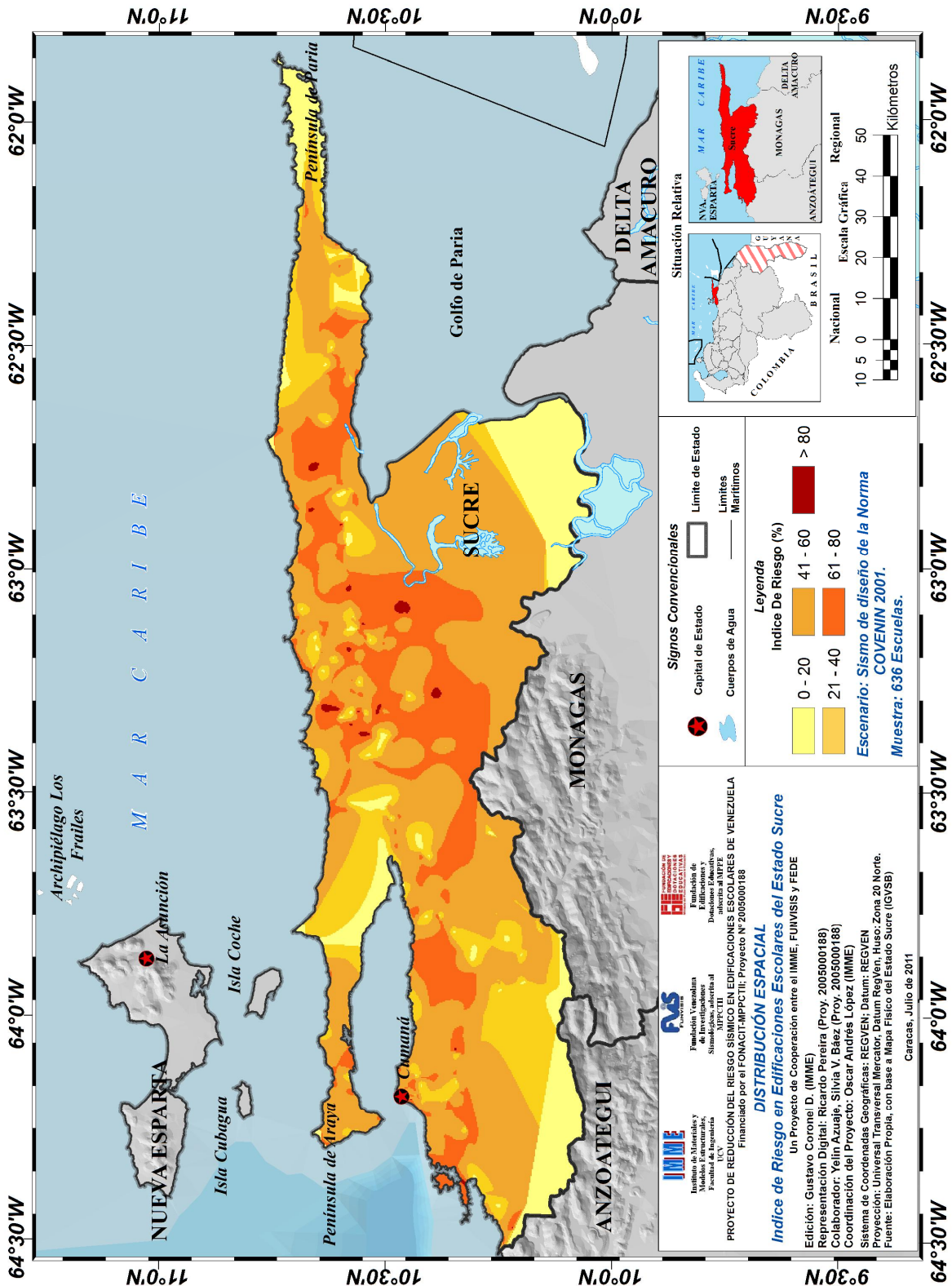






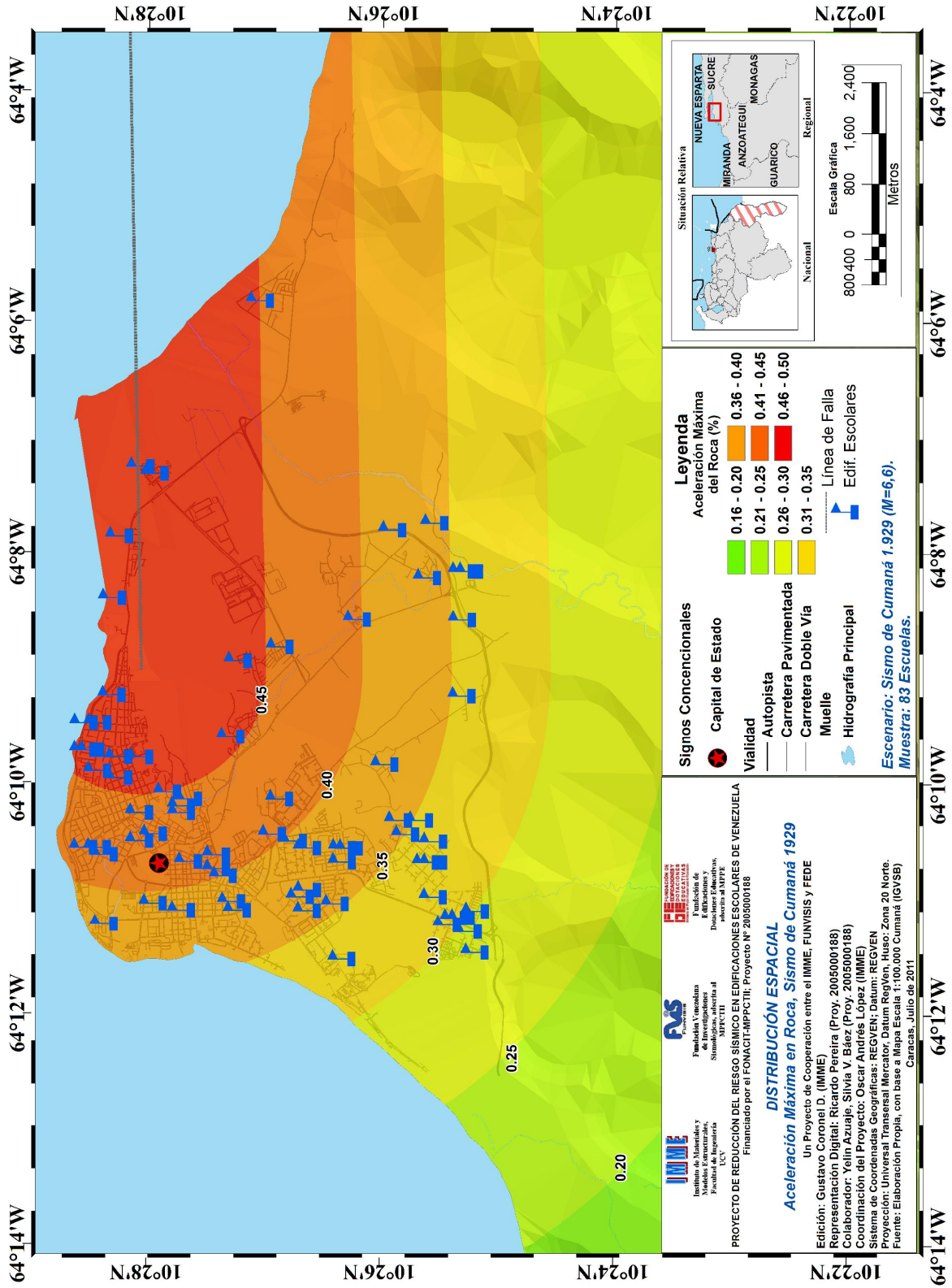


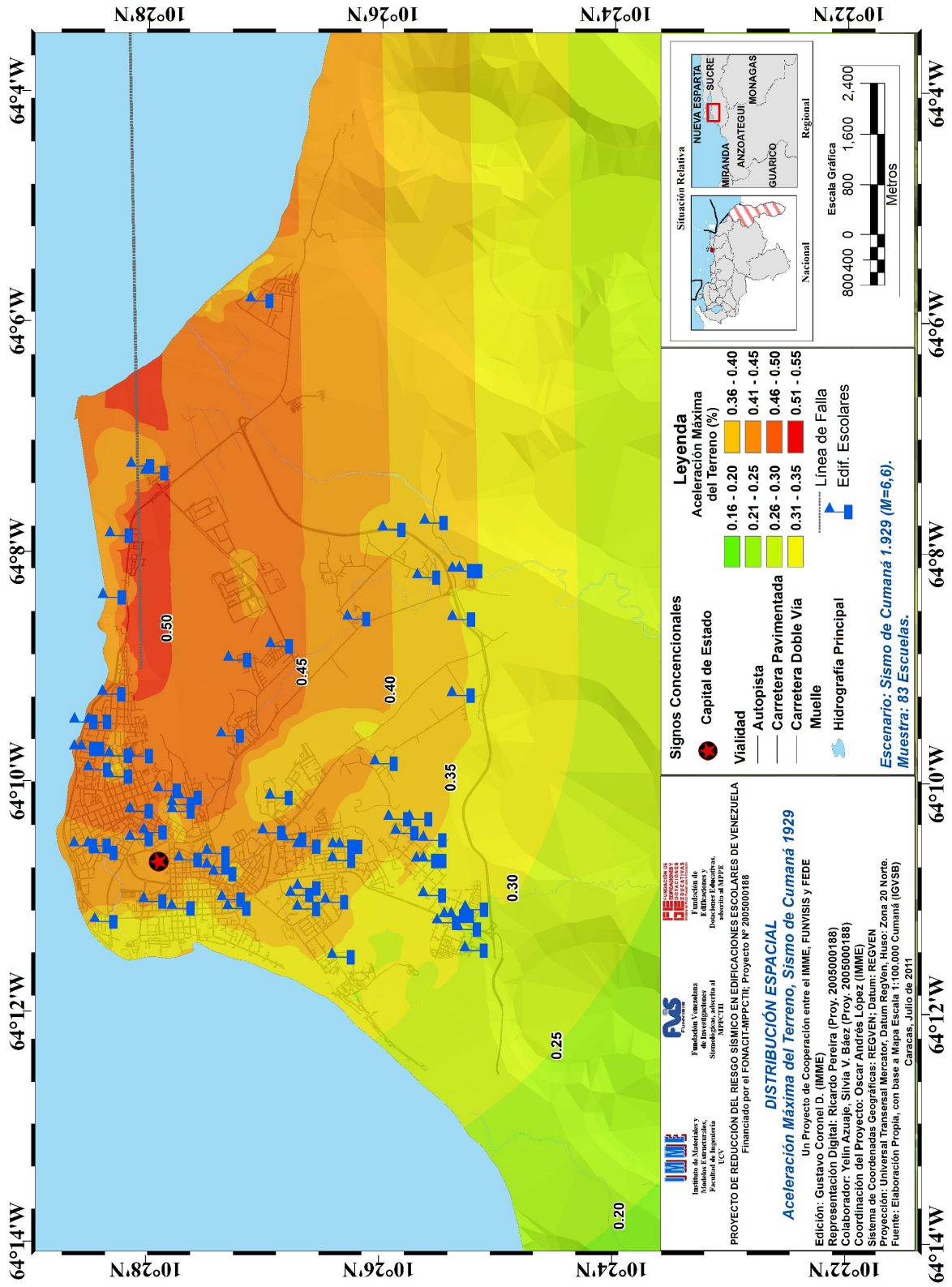


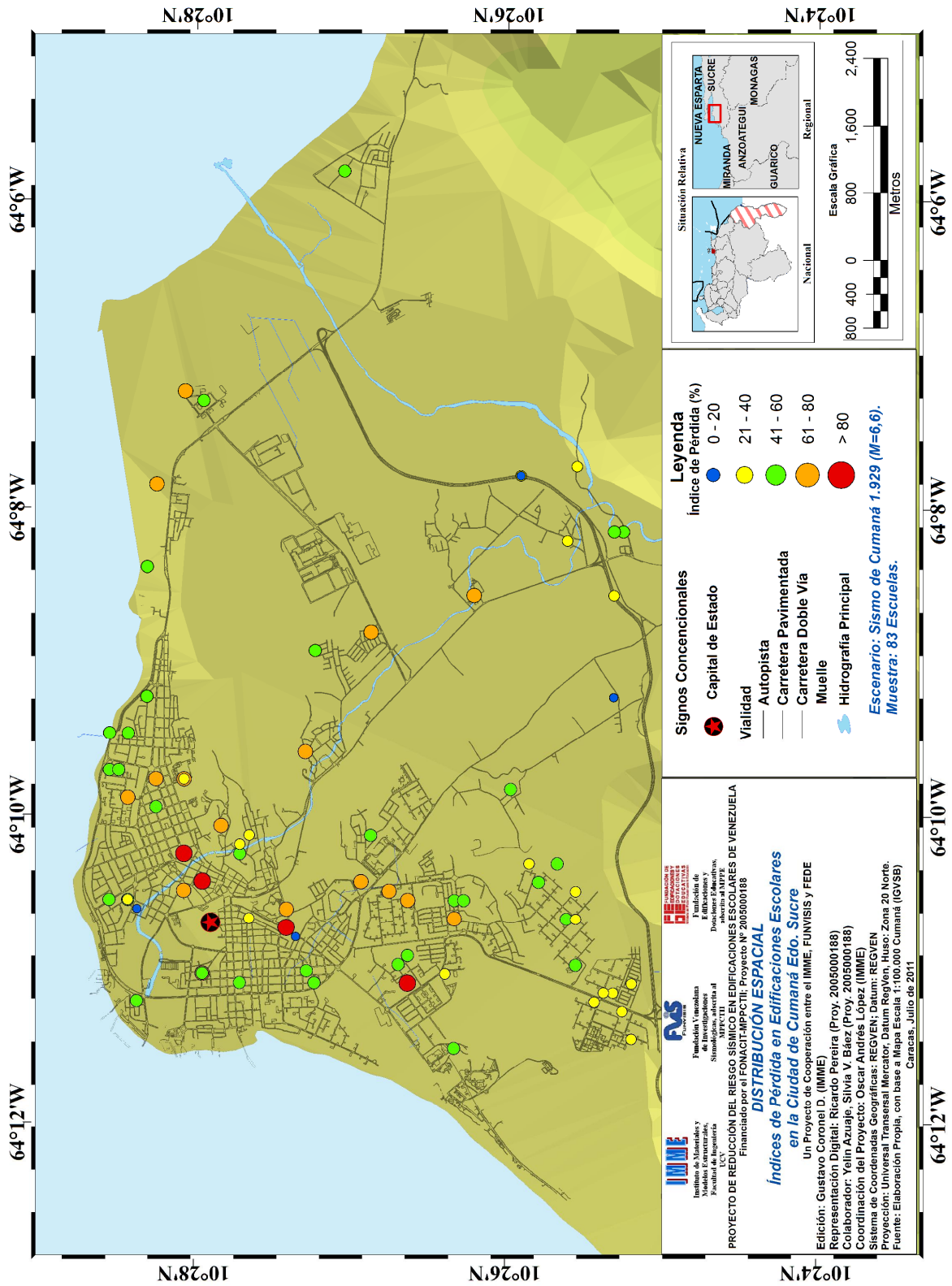


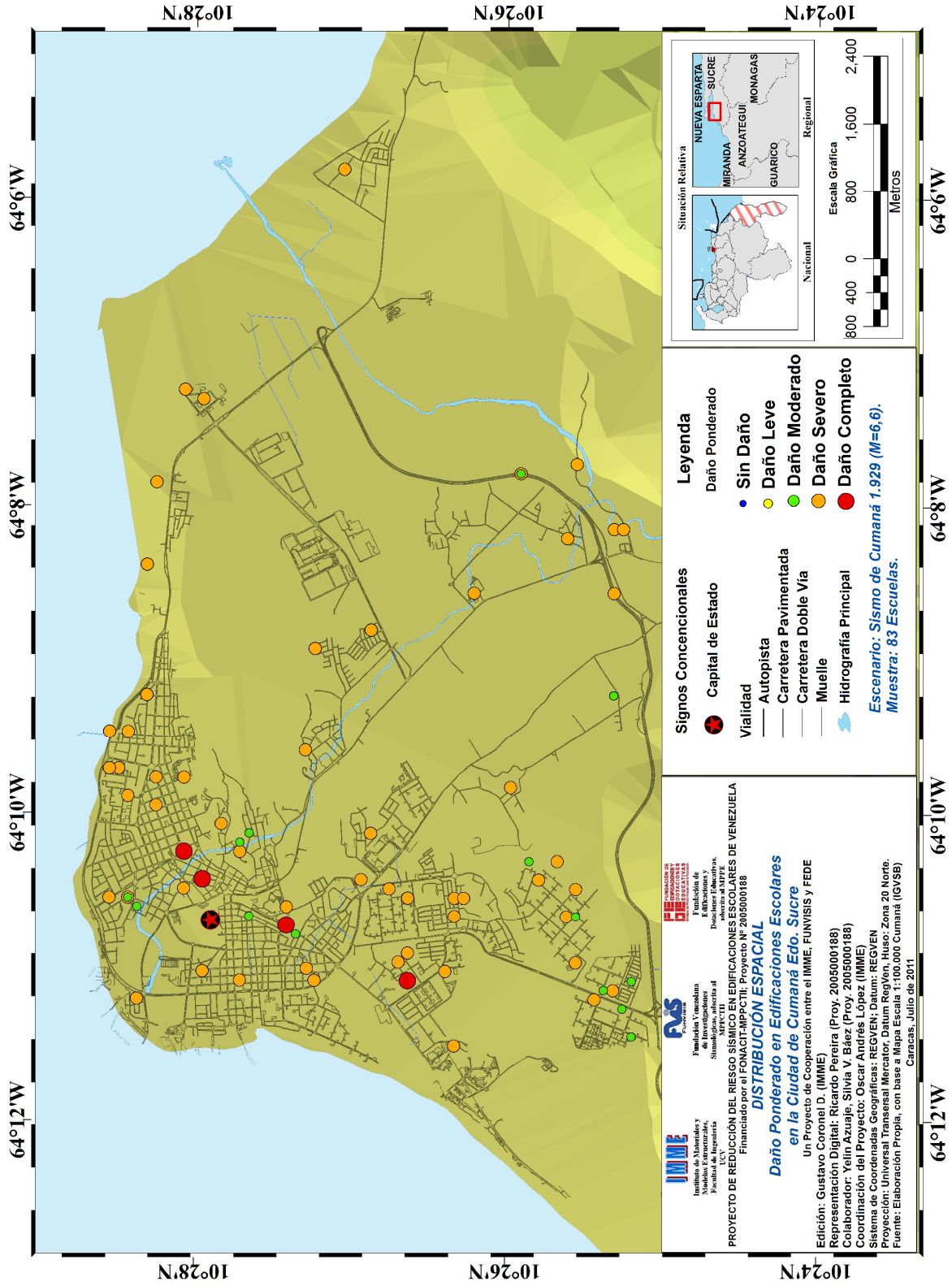
## **Anexo 2.6**

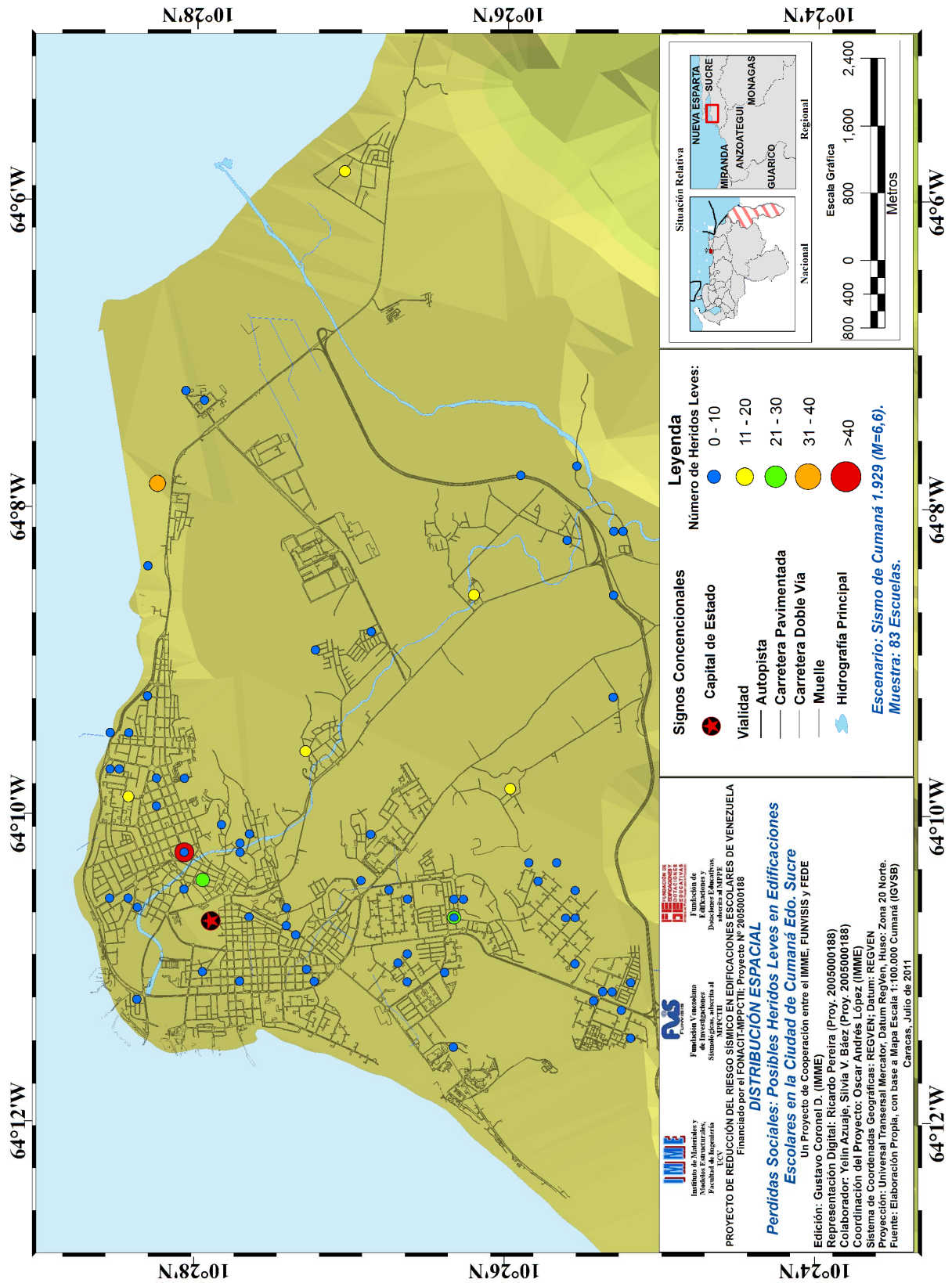
Mapas de Resultados:  
Escenarios en la Ciudad de Cumaná

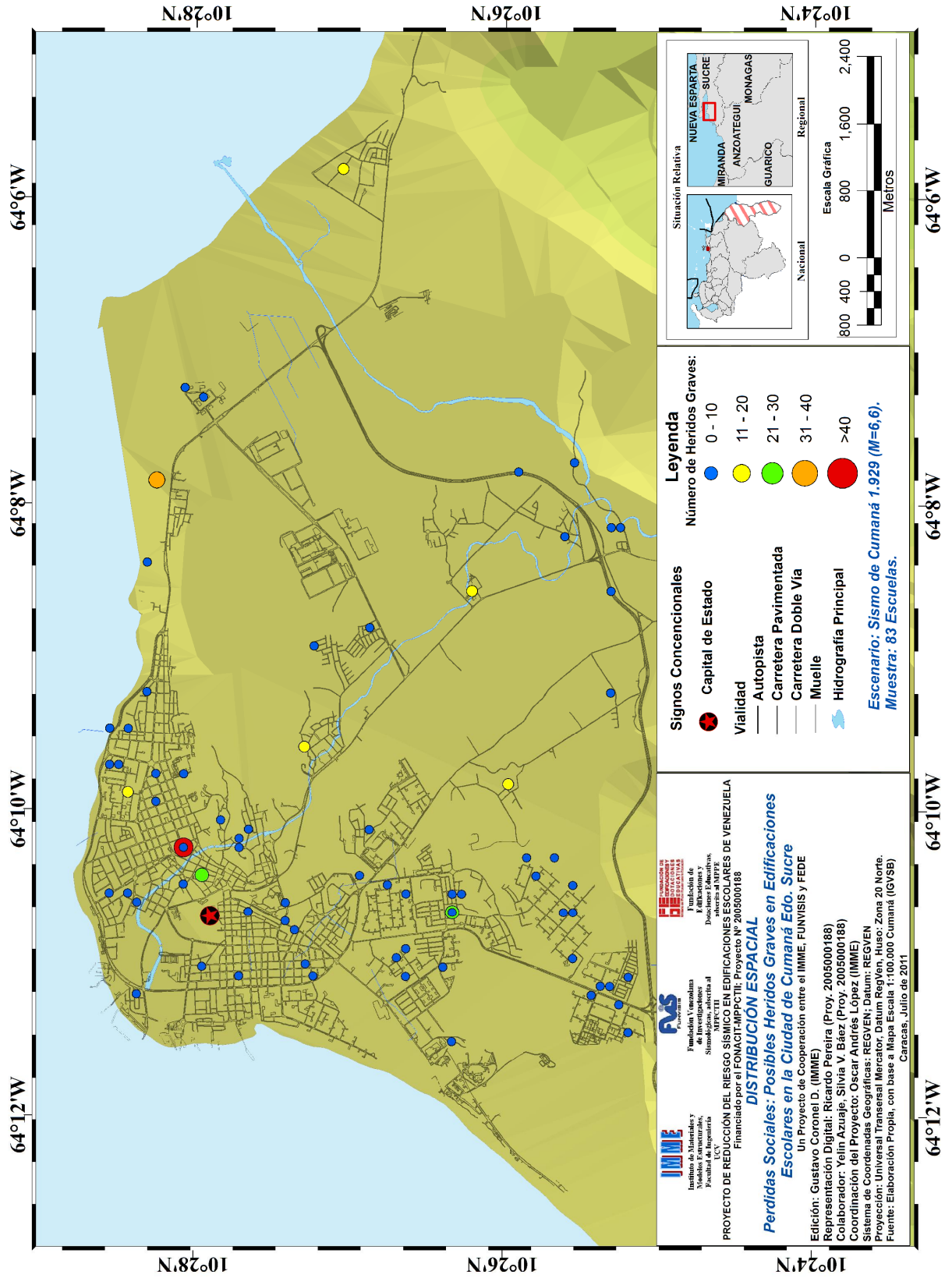




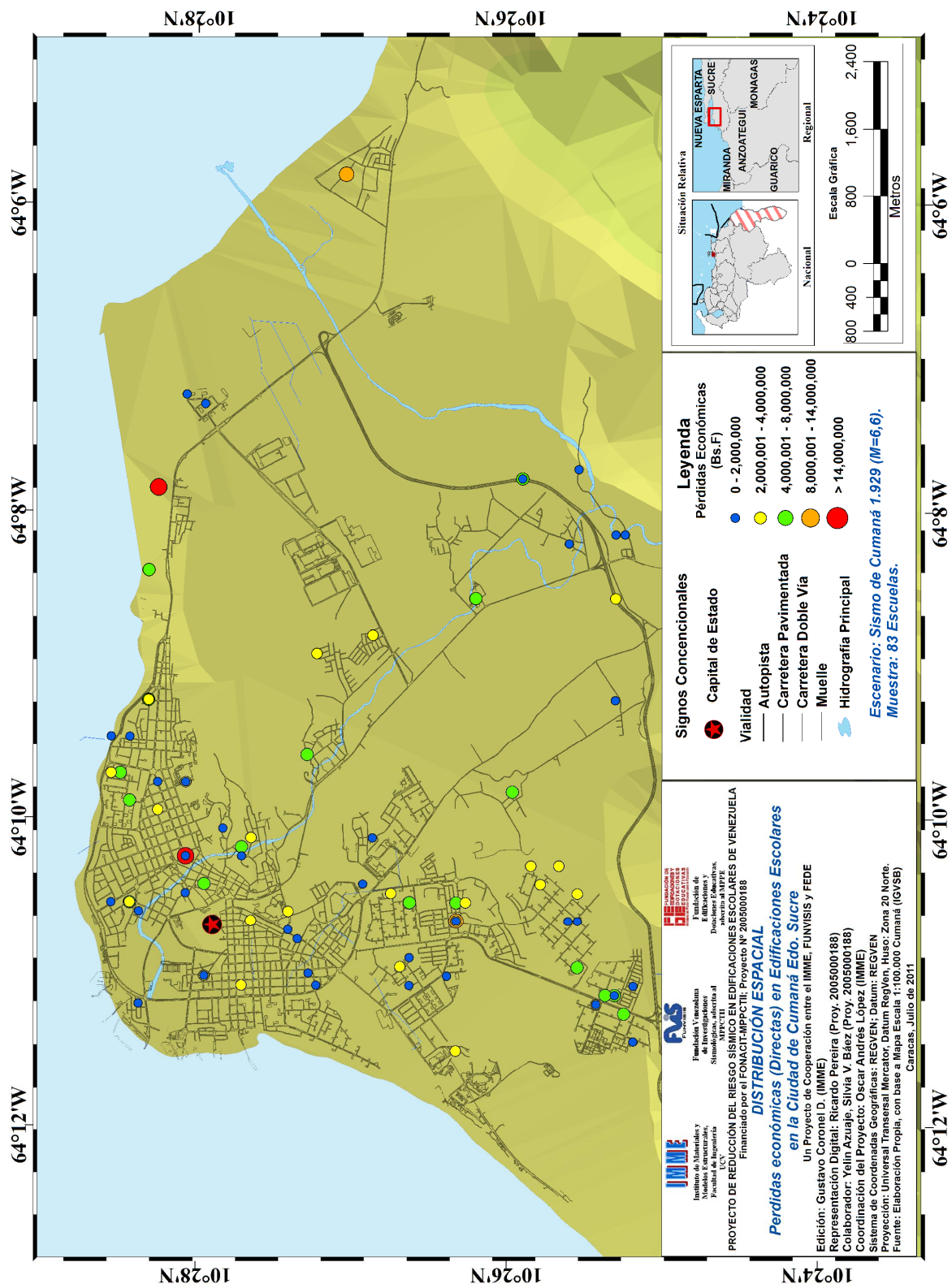


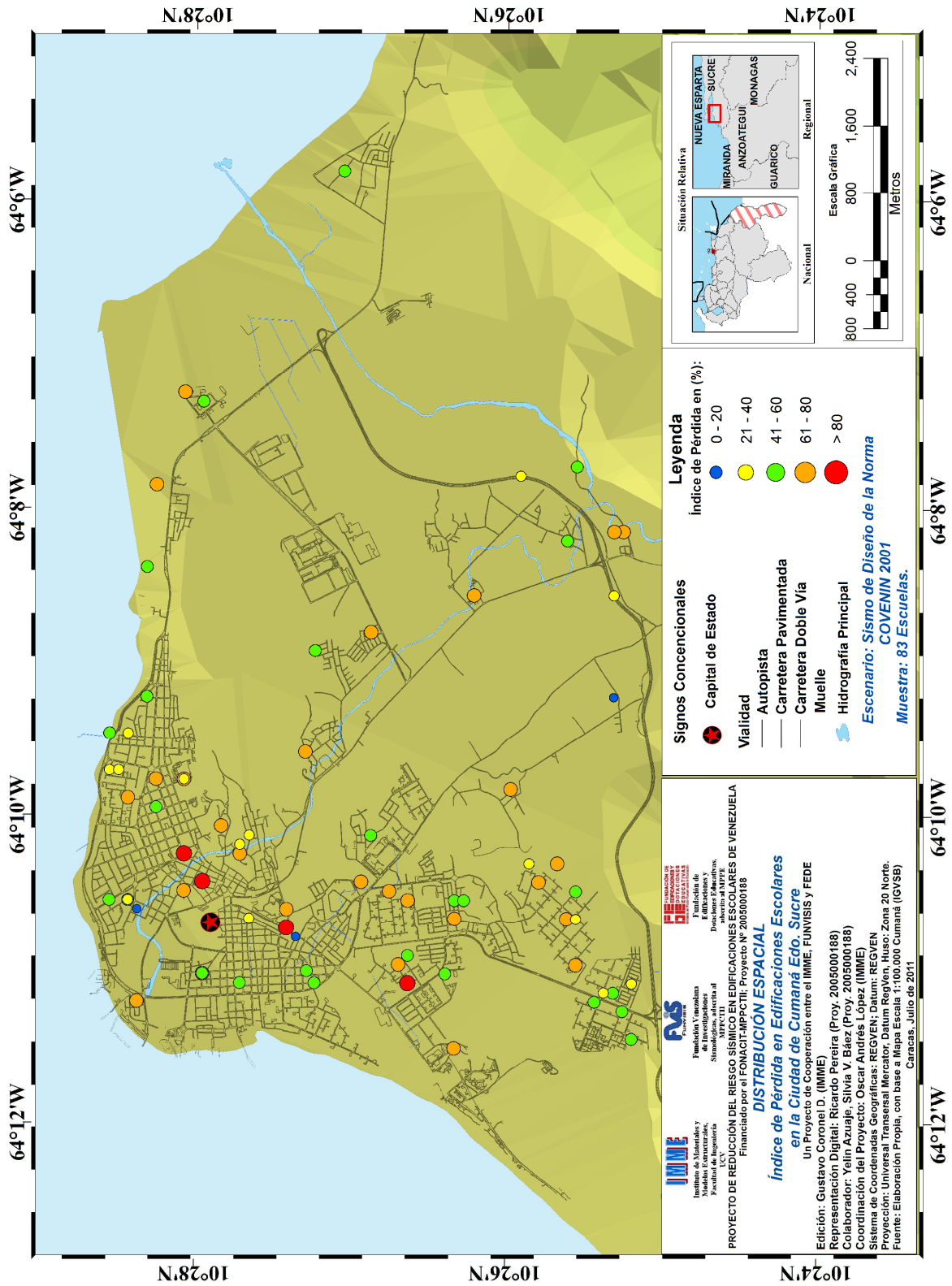


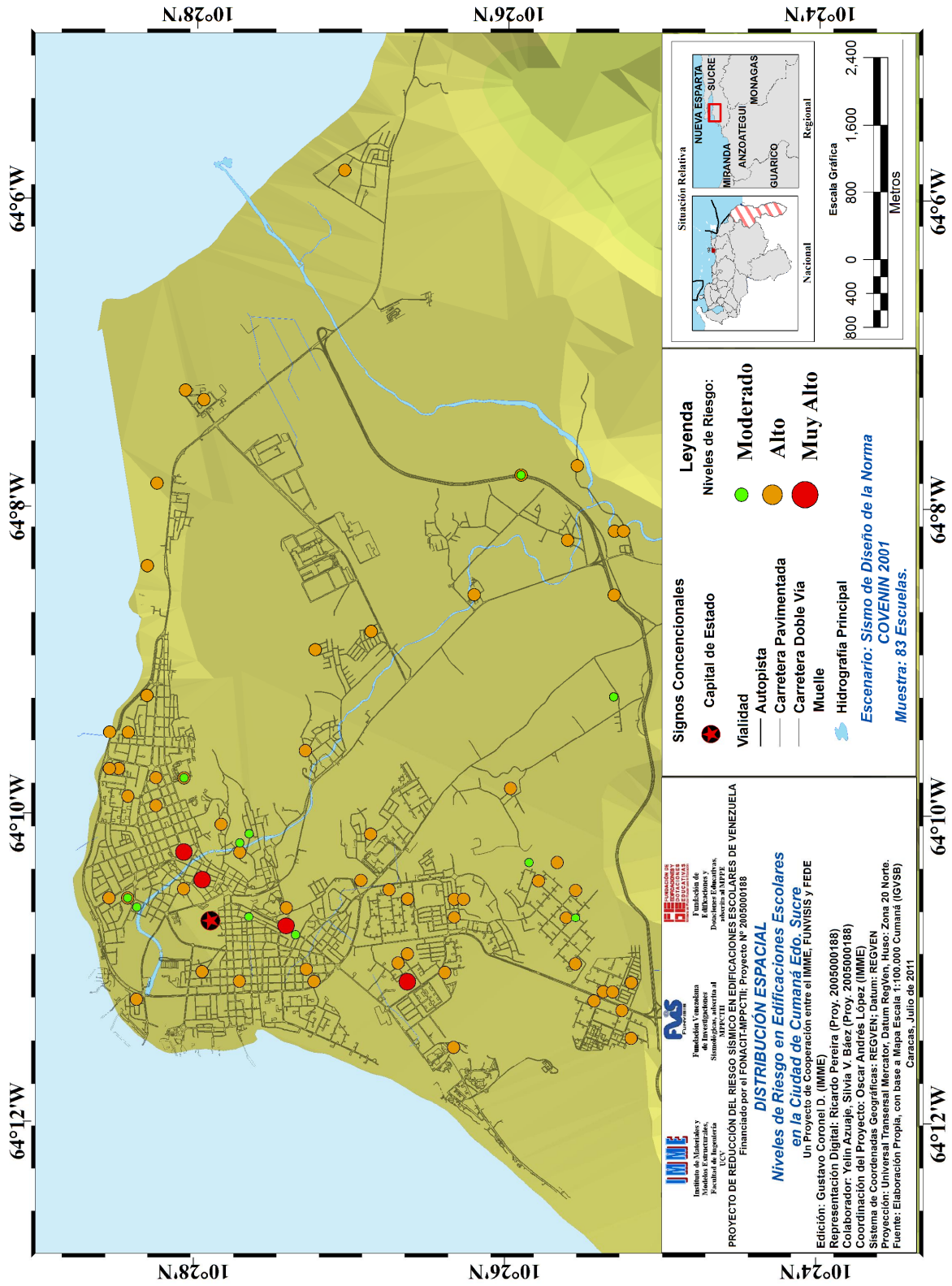








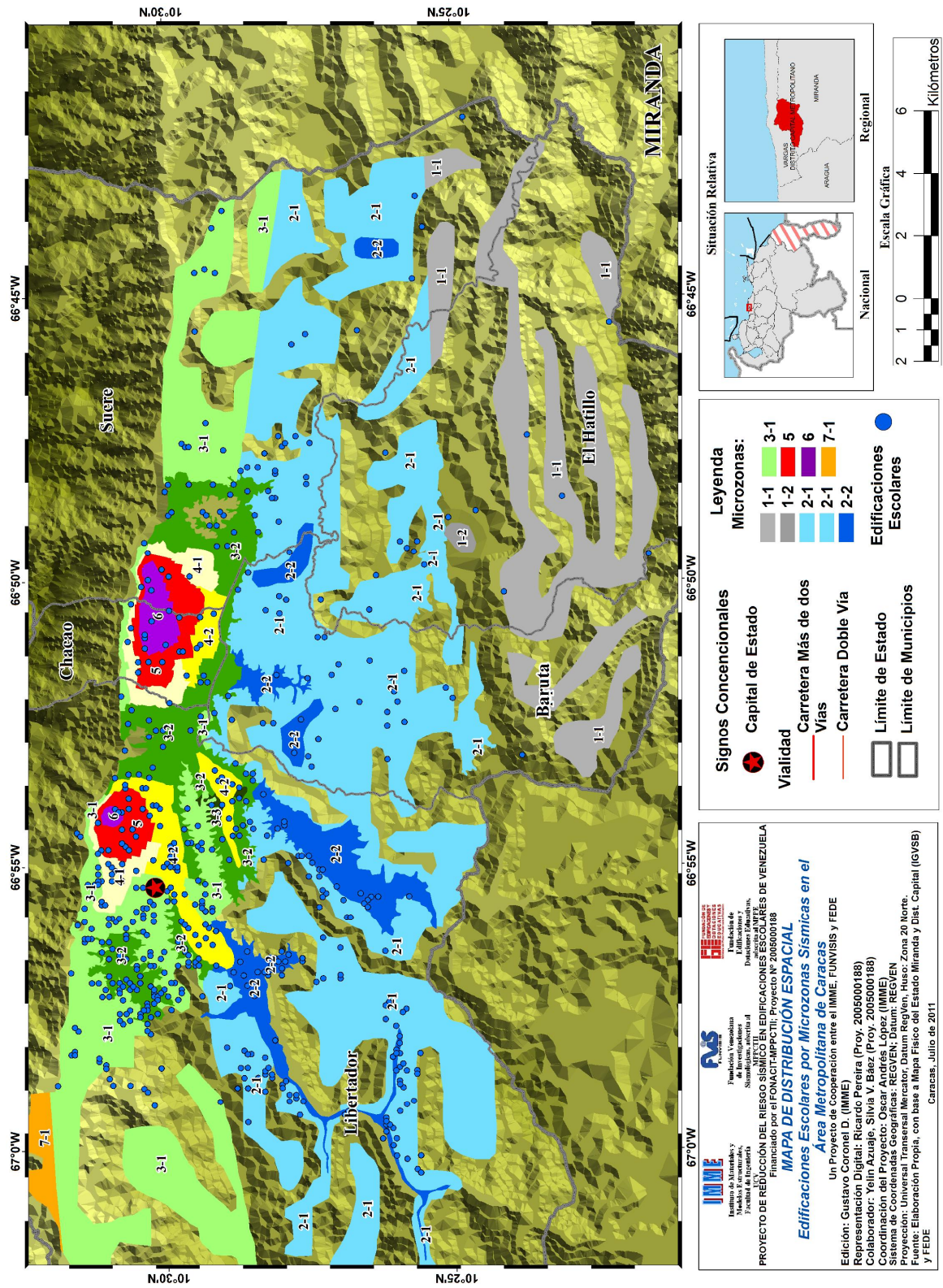


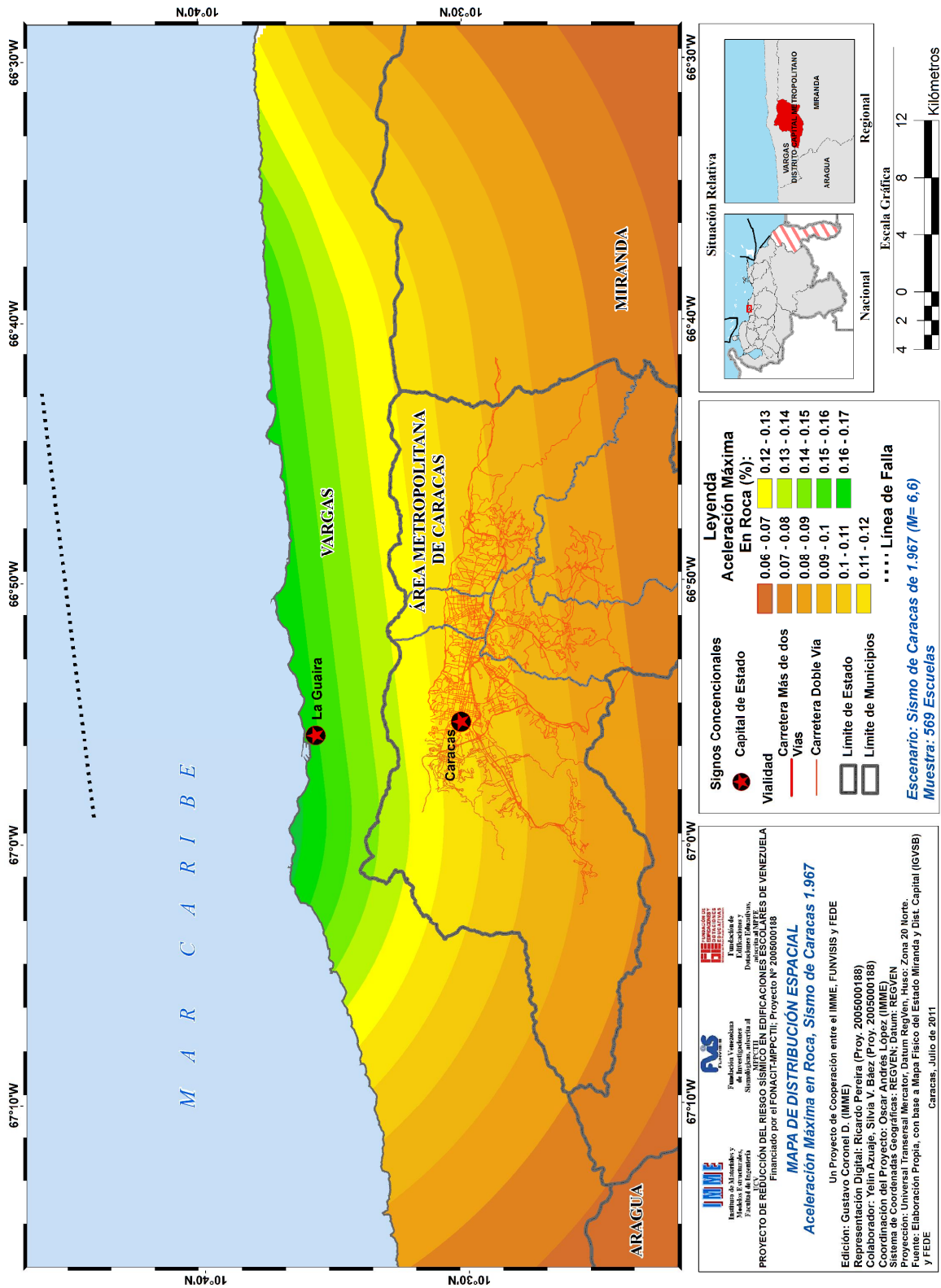


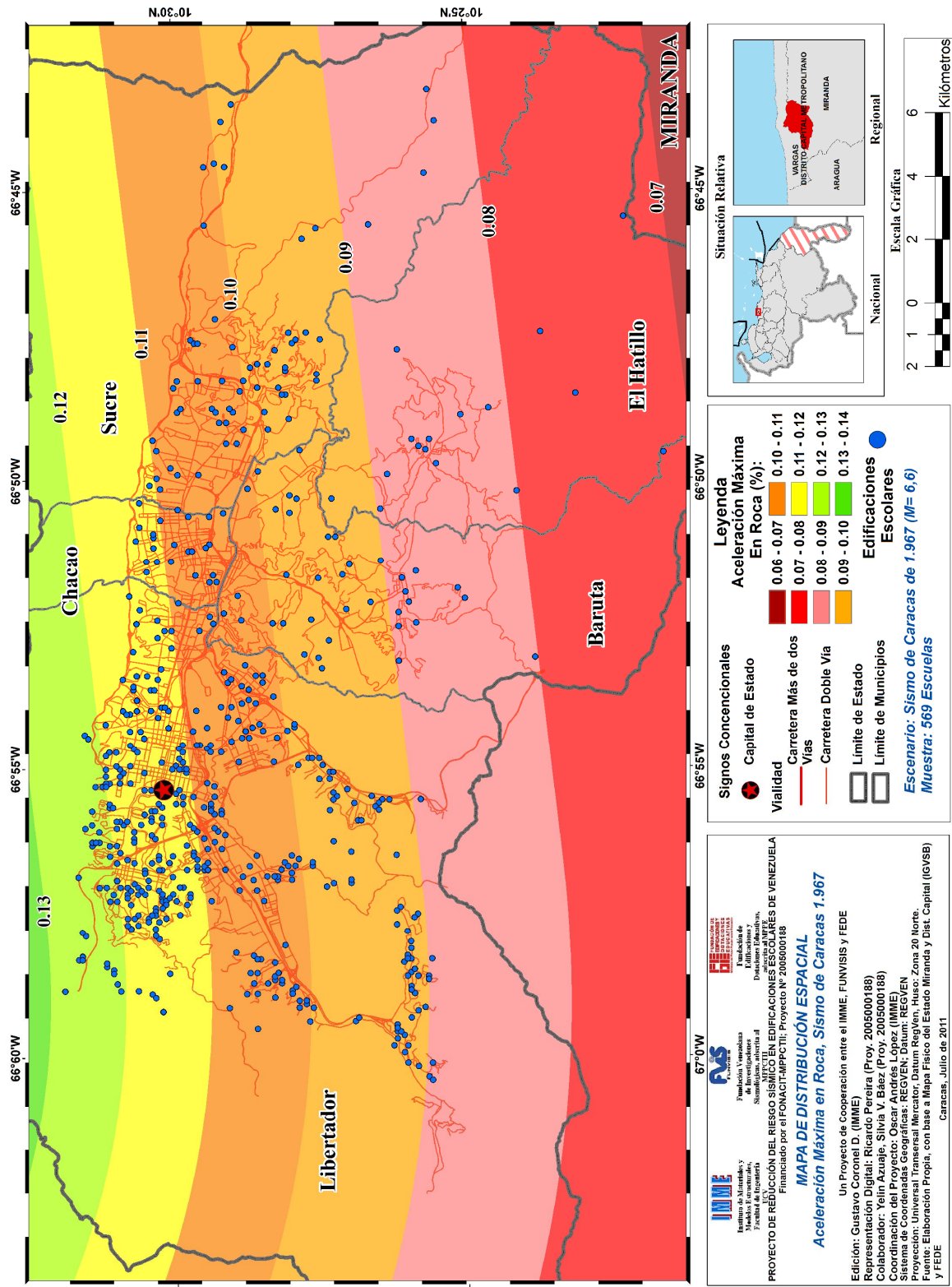
## **Anexo 2.7**

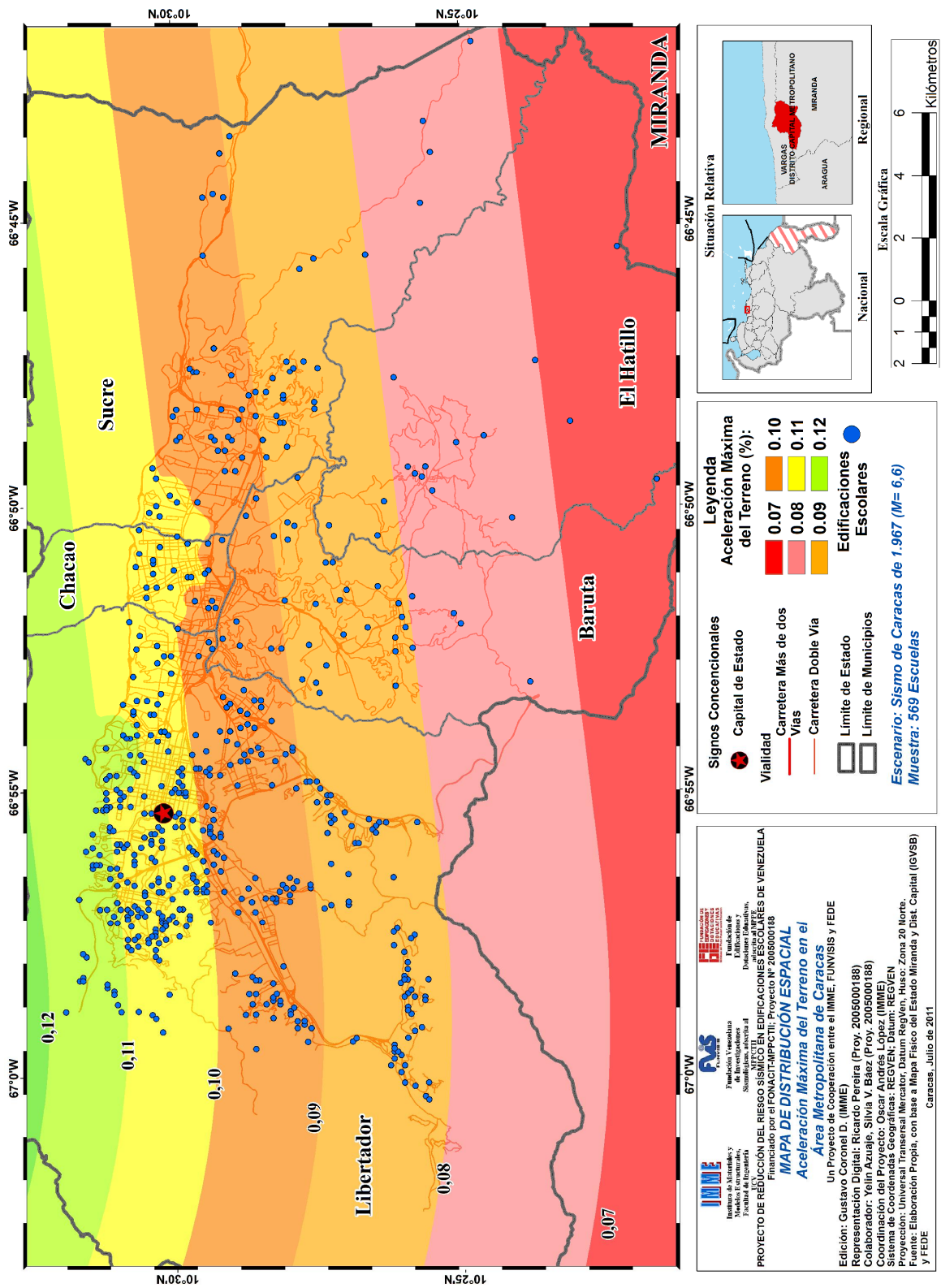
Mapas de Resultados:

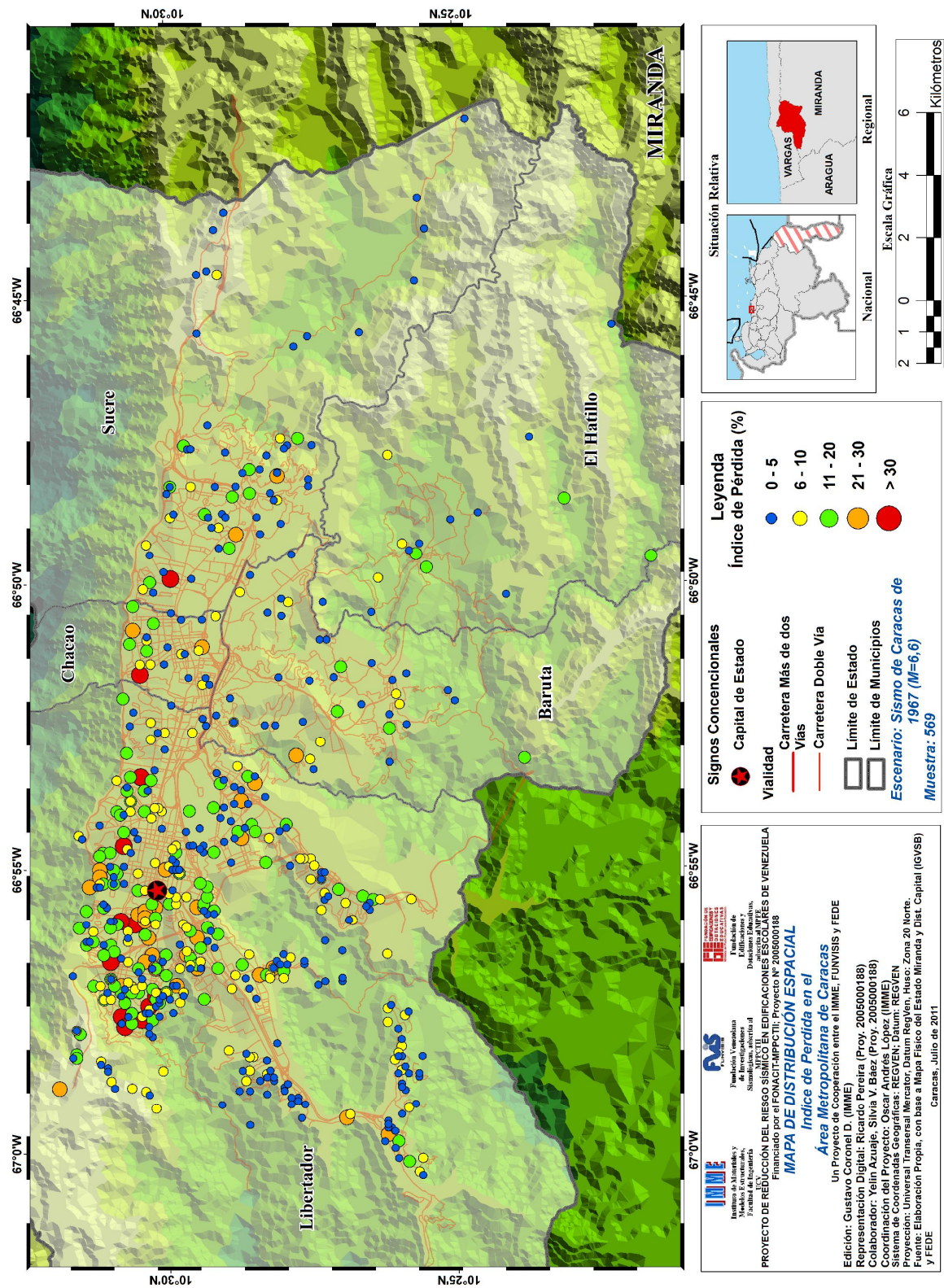
Escenarios Sísmicos en el Área Metropolitana de Caracas

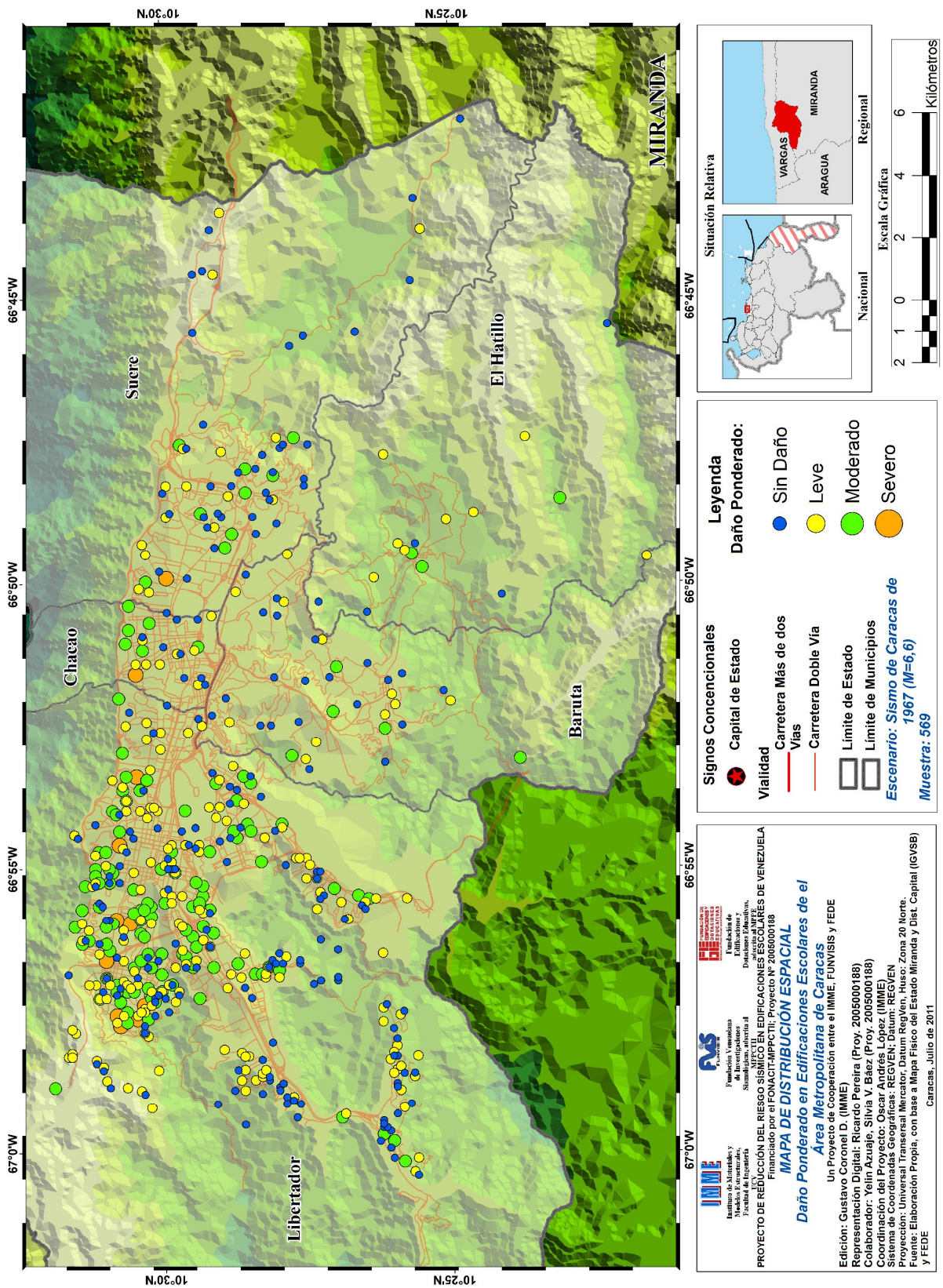


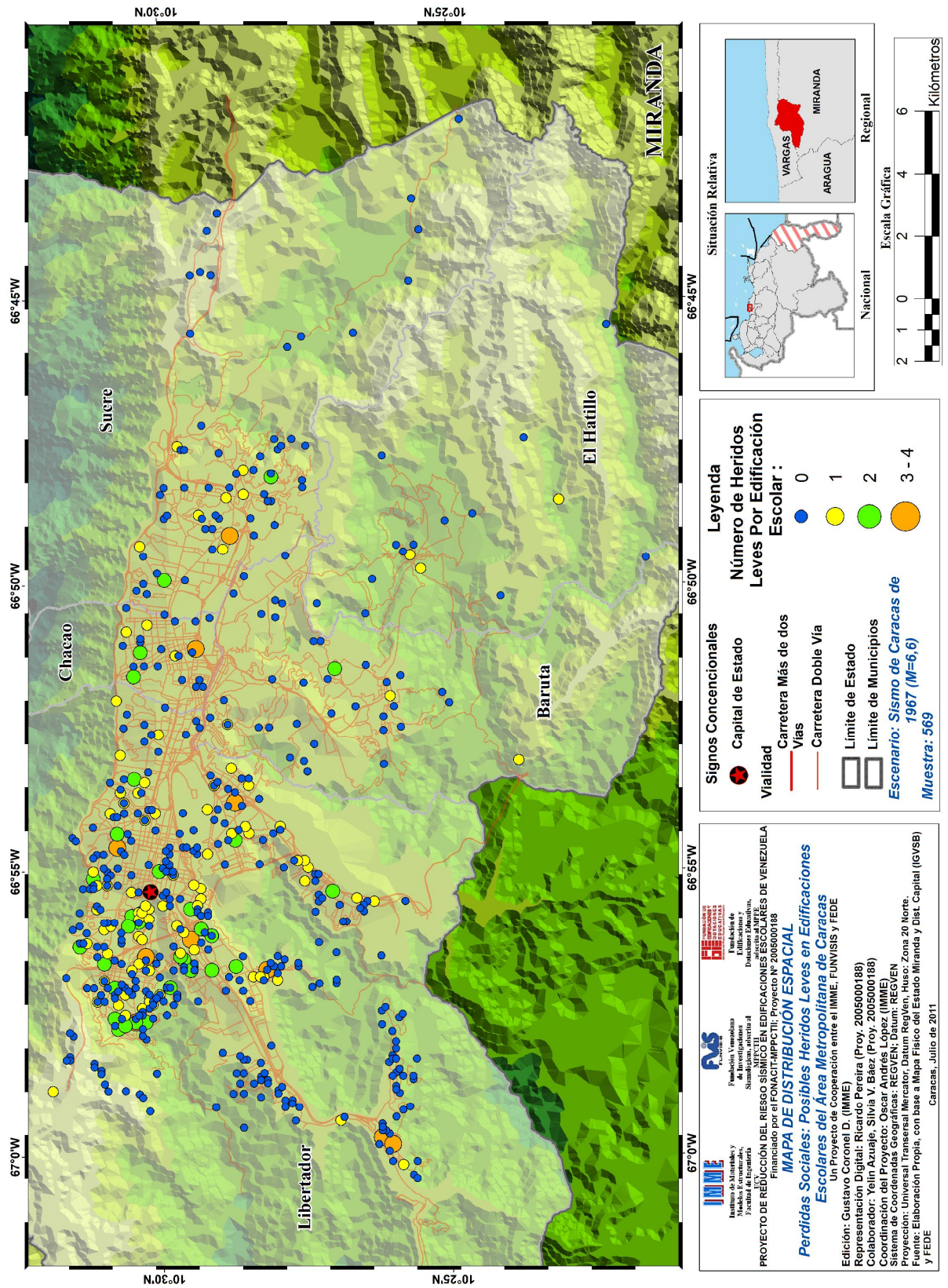


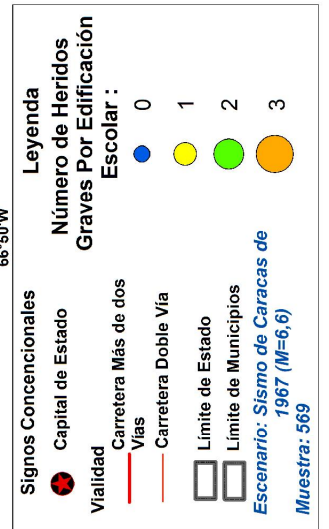
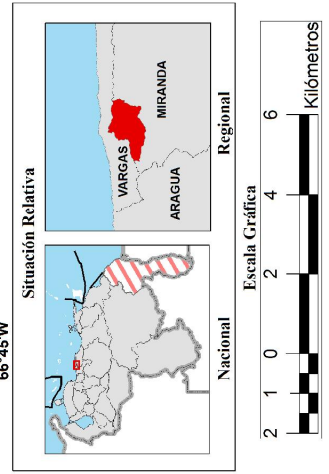
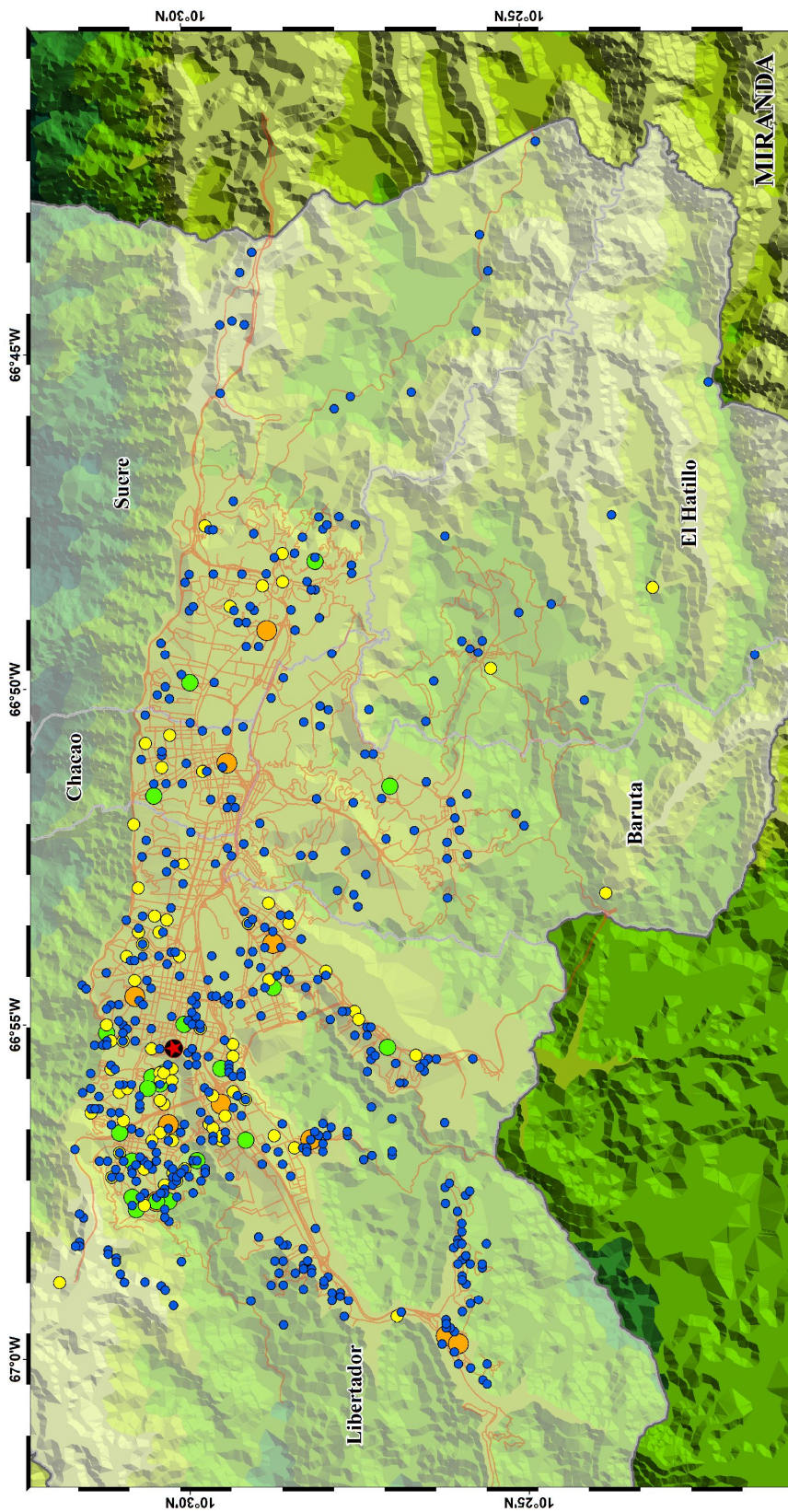












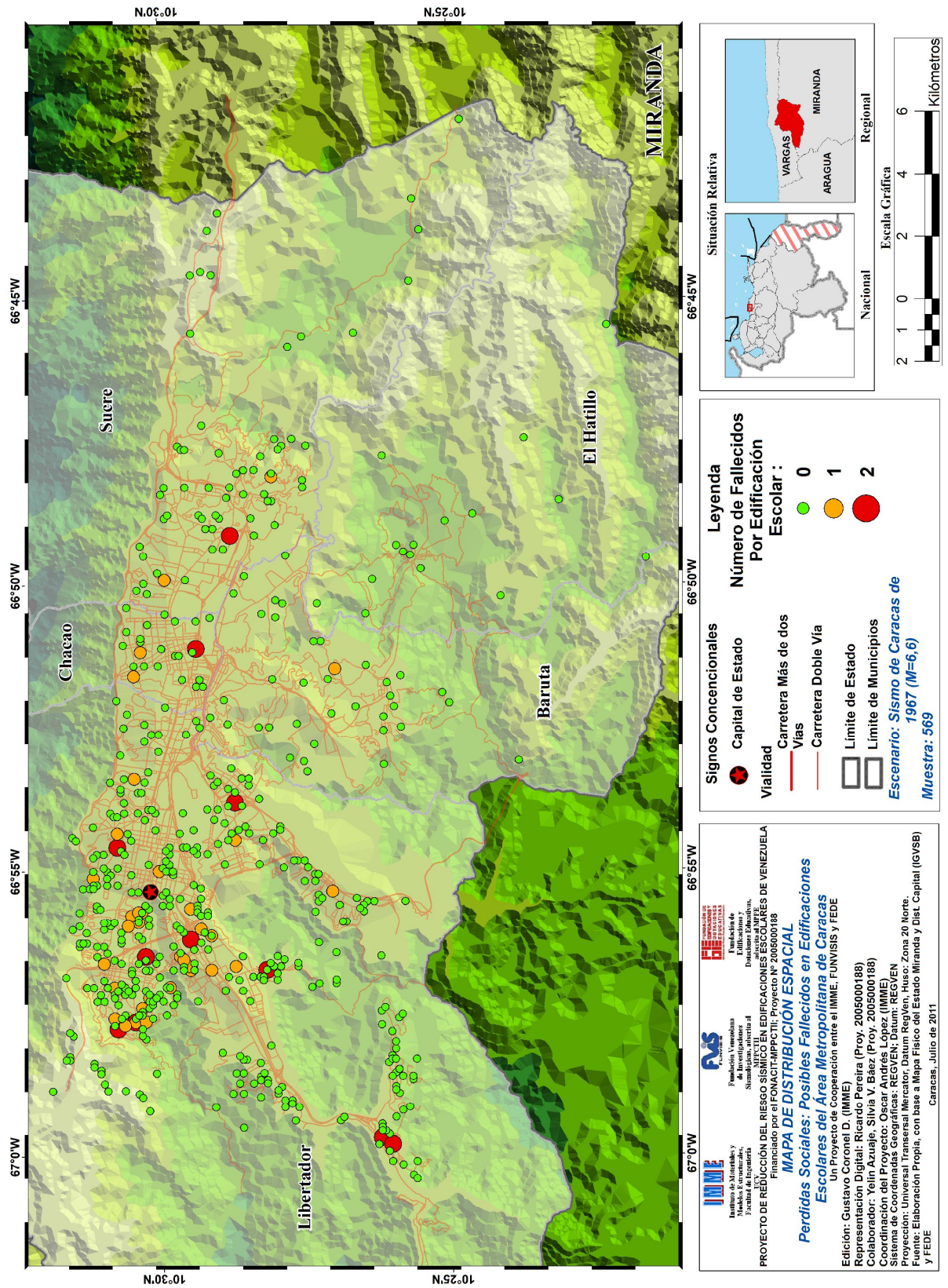


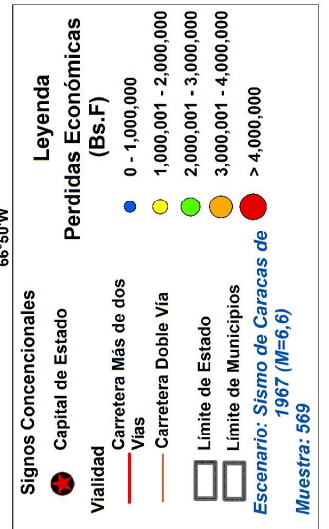
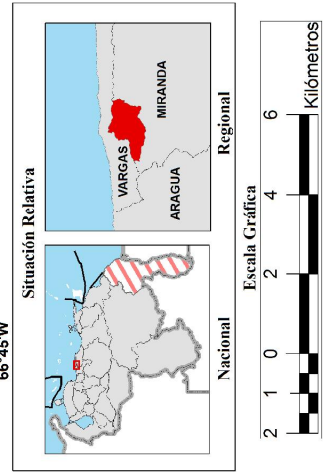
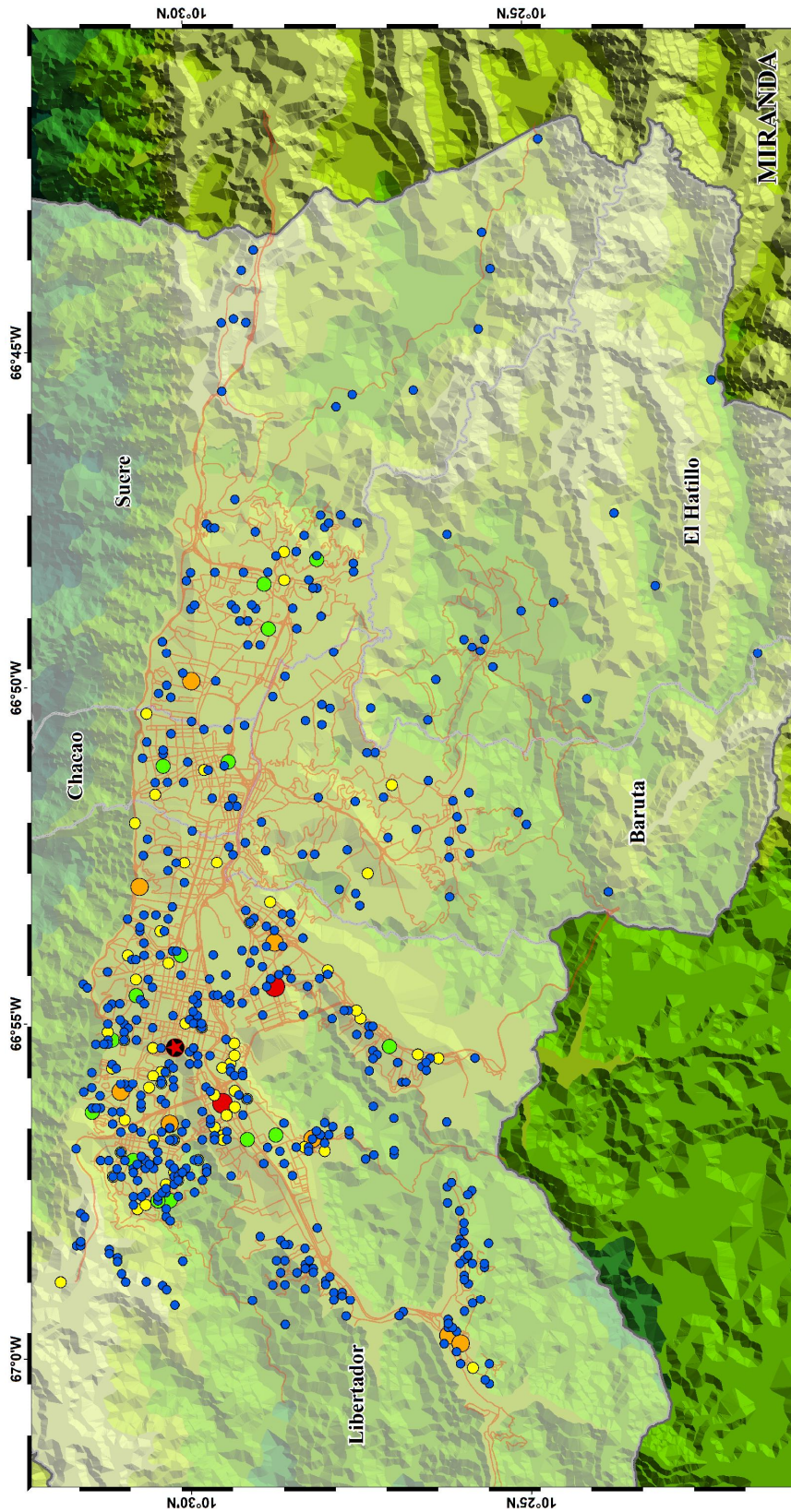


Instituto de Ingeniería y Materiales de Edificación  
 Fundación de Edificaciones y Dotaciones Educativas  
 División de Edificaciones y Dotaciones Educativas  
 División de Edificaciones y Dotaciones Educativas

PROYECTO DE REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EDIFICACIONES ESCOLARES DE VENEZUELA  
 Financiado por el FONACIT-MPPCTII; Proyecto N° 2005000188  
**MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL**  
**Perdidas Sociales: Posibles Heridos Graves en Edificaciones Escolares del Área Metropolitana de Caracas**  
 Un Proyecto de Cooperación entre el IMME, FUNVISIS y FEDE

Edición: Gustavo Coronel D. (IMME)  
 Representación Digital: Ricardo Pereira (Proy. 2005000188)  
 Colaborador: Yelin Azañe, Silvia V. Báez (Proy. 2005000188)  
 Coordinación del Proyecto: Oscar Andrés López (IMME)  
 Sistema de Coordenadas Geográficas: REGOVEN; Datum: REGOVEN  
 Fuente: Universidad Nacional Experimental "Dr. Rafael Ángel M. Fuenmayor" Zonas 20 Norte  
 Fuente: Elaboración Propia, con base a Mapa Físico del Estado Miranda y Dist. Capital (IGVSB) y FEDE  
 Caracas, Julio de 2011





**IMME** Instituto de Ingeniería y Materiales de Edificación  
 Fundación de Edificaciones y Dotaciones Educativas

**FUNVIS** Fundación de Edificaciones y Dotaciones Educativas  
 División de Edificaciones

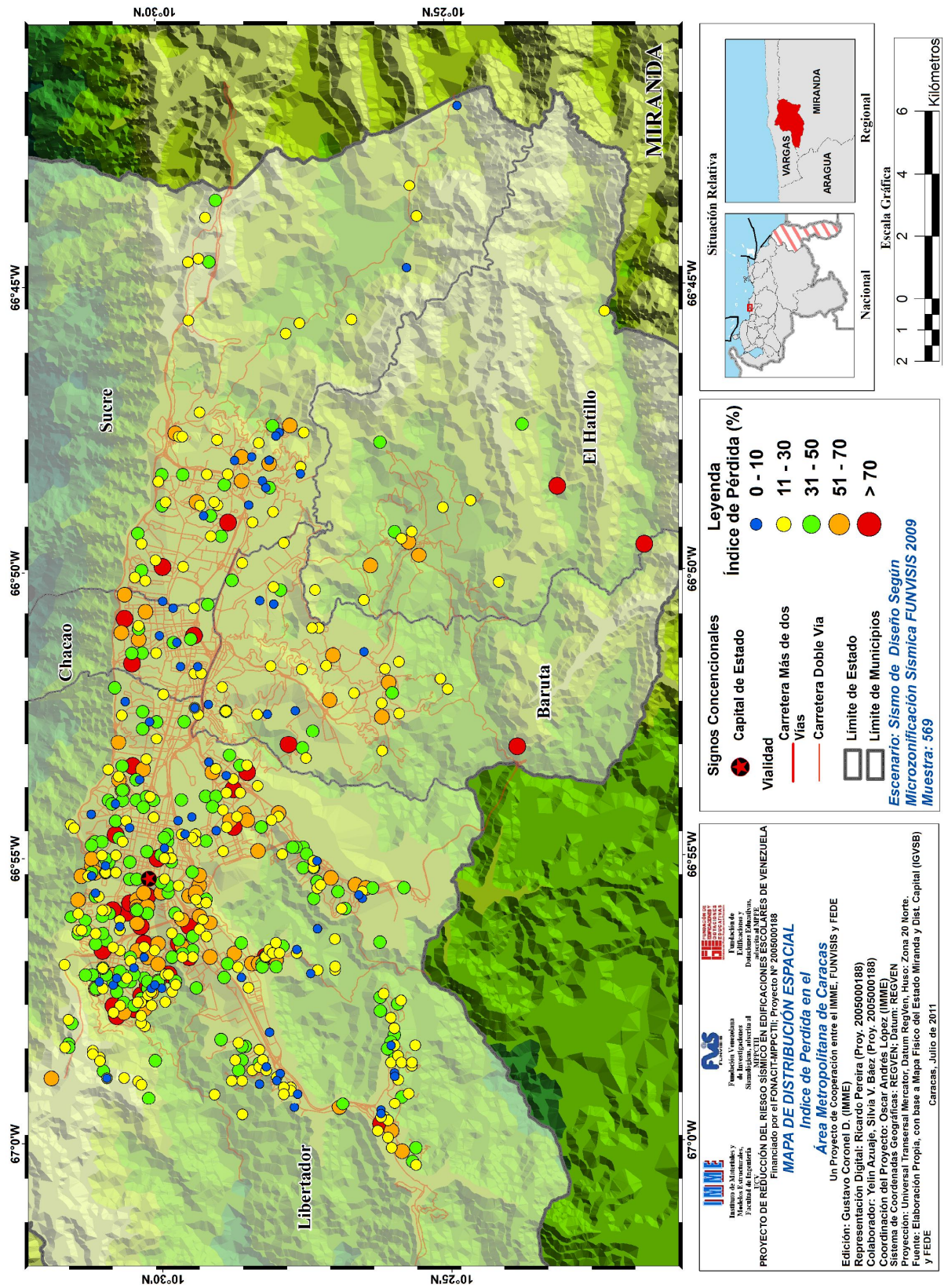
Proyecto de Investigación Simulación, referente al Sismo de Caracas de 1967

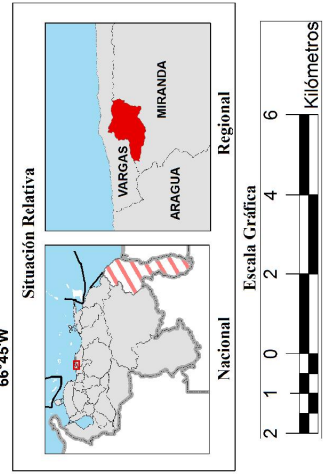
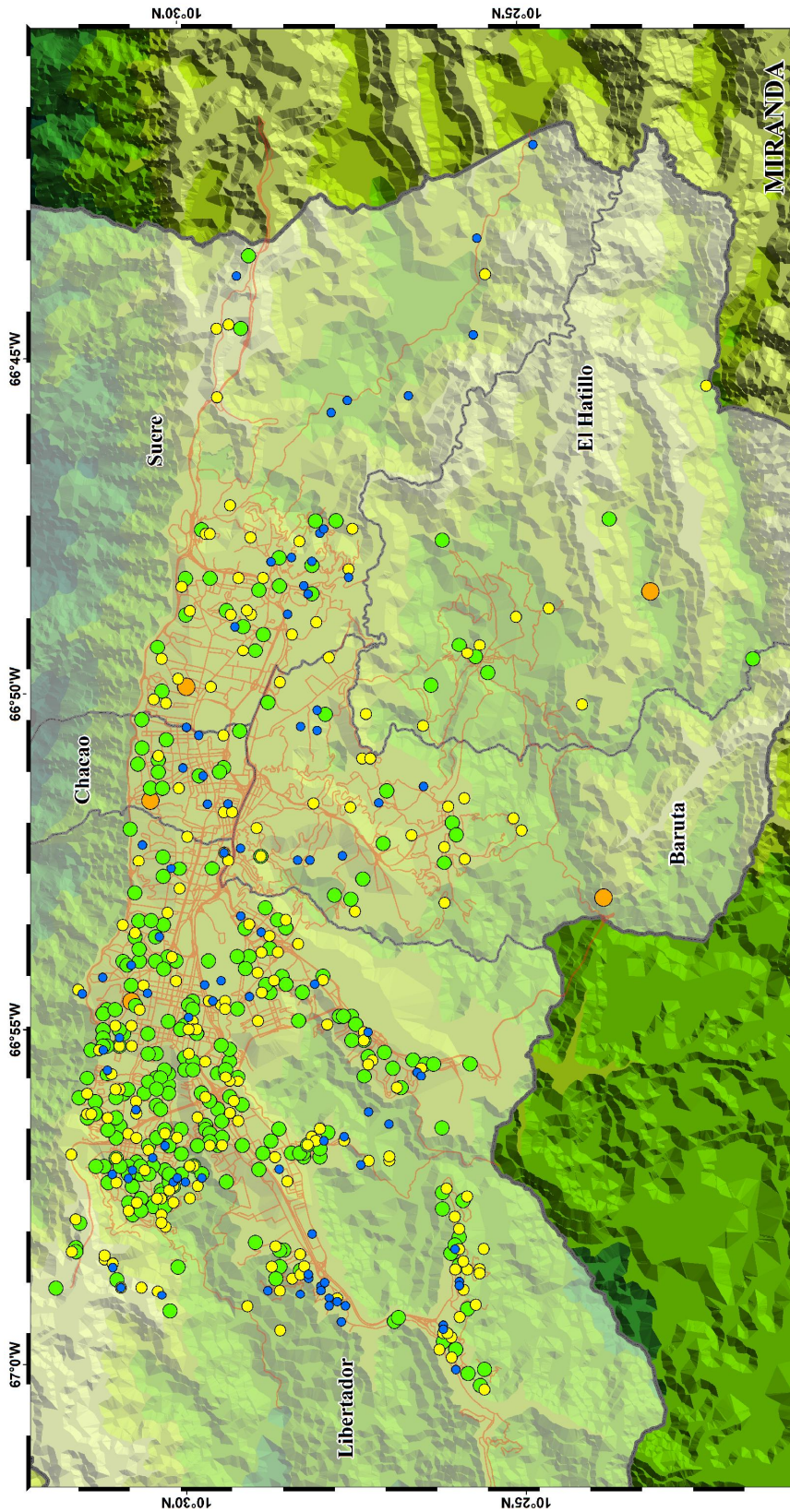
PROYECTO DE REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EDIFICACIONES ESCOLARES DE VENEZUELA  
 Financiado por el FONACIT-MPPCTI; Proyecto N° 2005000188

**MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL**  
**Perdidas Económicas (Directas) en el Área Metropolitana de Caracas**

Un Proyecto de Cooperación entre el IMME, FUNVIS y FEDE

Edición: Gustavo Coronel D. (IMME)  
 Representación Digital: Ricardo Pereira (Proy. 2005000188)  
 Colaborador: Yelin Azañe, Silvia V. Báez (Proy. 2005000188)  
 Coordinación del Proyecto: Oscar Andrés López (IMME)  
 Sistema de Coordenadas Geográficas: REGVEN; Datum: REGVEN  
 Fuente: Universidad Nacional Experimental "Dr. Juan Rodríguez Domínguez", Puntos Zonas 20 Norte  
 Fecha: Elaboración Propia, con base a Mapa Físico del Estado Miranda y Dist. Capital (IGVSB) y FEDE  
 Caracas, Julio de 2011





**Leyenda**

**Nivel de Riesgo**

- Muy Bajo
- Bajo
- Moderado
- Alto
- Muy Alto

**Signos Conccionales**

- Capital de Estado
- Carretera Más de dos Vías
- Carretera Doble Vía
- Limite de Estado
- Limite de Municipios

**Escenario: Sismo de Diseño Según Microzonificación Sísmica FUNVISIS 2009**  
**Muestra: 569**

**IMME** Instituto de Ingeniería y Materiales de Edificación  
 Fundación de Edificaciones y Dotaciones Educativas

**FUNVIS** Fundación de Edificaciones y Dotaciones Educativas

**FIDE** Fundación de Edificaciones y Dotaciones Educativas

PROYECTO DE REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EDIFICACIONES ESCOLARES DE VENEZUELA  
 Financiado por el FONACIT-MPPCTII; Proyecto N° 2005000188

**MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL**  
**Nivel de Riesgo en Edificaciones Escolares del Área Metropolitana de Caracas**

Un Proyecto de Cooperación entre el IMME, FUNVISIS y FEDE

Edición: Gustavo Coronel D. (IMME)  
 Representación Digital: Ricardo Pereira (Proy. 2005000188)  
 Colaborador: Yelin Azaúe, Silvia V. Báez (Proy. 2005000188)  
 Coordinación del Proyecto: Oscar Andrés López (IMME)  
 Sistema de Coordenadas Geográficas: REGOVEN; Datum: REGOVEN  
 Fuente: Universidad Nacional Experimental "Dr. Juan Rodríguez Franco" (UNEF), Zona 20 Norte  
 Fecha: Elaboración Propia, con base a Mapa Físico del Estado Miranda y Dist. Capital (IGSVB) y FEDE  
 Caracas, Julio de 2011

## **Anexo 2.8**

# **Desarrollo de Escenarios Sísmicos, Cuantificación de Pérdidas y Estimación del Riesgo en las Escuelas de Venezuela.**

**Proyecto Reducción del Riesgo Sísmico en  
Edificaciones Escolares de Venezuela  
FONACIT No. 20005000188**

**Preparado para IMME-UCV**

**Preparado por:**

**Dr. Ing. Salvador Safina**

Caracas, Junio 2007

**DESARROLLO DE ESCENARIOS SÍSMICOS,  
CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS Y  
ESTIMACIÓN DEL RIESGO EN LAS ESCUELAS DE VENEZUELA**

**CONTENIDO**

**Resumen**

**1. Introducción**

**2. Consideraciones para el desarrollo del modelo de evaluación**

- 2.1. *Base de datos de planteles escolares*
- 2.2. *Caracterización de la vulnerabilidad sísmica de los planteles*
- 2.3. *Caracterización de escenarios sísmicos*
- 2.4. *Estimación del daño*

**3. Resultados**

- 3.1. *Estudios de escenarios*
- 3.2. *Estudios de pérdidas probables*
- 3.3. *Estudios de riesgo*

**4. Productos**

- 4.1. Programa ESCENA
- 4.2. Programa ESCENAT
- 4.3. Programa ESCENAR
- 4.4. *Otros archivos de interés*

**5. Conclusiones**

**6. Referencias**

**Anexos** (contenidos en la versión digital de este documento):

- ANEXO A** - Resultados *estudios de escenarios*
- ANEXO B** - Resultados *estudios de pérdidas probables*
- ANEXO C** - Resultados *estudios de riesgo*

**Proyecto IMME-FUNVISIS-FEDE-Fonacit No. 20005000188**  
**Reducción del Riesgo Sísmico en Edificaciones Escolares de Venezuela**

**Desarrollo de Escenarios Sísmicos, Cuantificación de Pérdidas y Estimación del Riesgo en las Escuelas de Venezuela**

**Resumen**

Se presentan resultados preliminares de los efectos sobre los planteles escolares venezolanos como consecuencia de la simulación de sismos históricos, así como la cuantificación de las pérdidas probables y estimación de su riesgo sísmico. En particular se estudian los escenarios de los sismos de Cariaco 1997, Caracas 1967 y el terremoto de 1810. Asimismo se presentan los efectos sobre los 18685 planteles escolares que conforman la base de datos como consecuencia de la ocurrencia de eventos con períodos de retorno de 1000, 500 y 75 años, asociados a los llamados sismos de servicio, sismo de diseño y sismo máximo, medidos en términos del daño medio esperado, y los efectos sobre los ocupantes y costos de reposición. Finalmente se presentan las curvas de riesgo sísmico particularizadas para cada plantel escolar y una clasificación preliminar del riesgo que permite su relativa jerarquización. El modelo ha sido implementado sobre un Sistema de Información Georeferenciada (SIG) a los fines de permitir la generación de mapas temáticos de práctica interpretación que facilite la toma de decisiones.

Los resultados obtenidos revelan que si bien en términos particulares las escuelas con mayores niveles de riesgo se sitúan sobre las zonas de mayor amenaza, las consecuencias de un evento sísmico en la región central tendrá en términos absolutos un mayor impacto sobre la infraestructura escolar nacional, debido fundamentalmente a la importante concentración de planteles escolares en esta región que elevan significativamente los niveles de vulnerabilidad. Asimismo se obtiene que 15.80% de los planteles presentan un nivel de riesgo sísmico muy alto, 40% un riesgo sísmico alto, 30% un riesgo sísmico medio y el resto un riesgo bajo.

## 1. Introducción

Con miras a calificar y diagnosticar el desempeño sísmico del sistema educativo venezolano en general y de cada uno de los planteles escolares en particular, el presente proyecto tiene por objeto el desarrollo de una herramienta de evaluación que permita el estudio de escenarios sísmicos singulares, la cuantificación de pérdidas y estimación del riesgo sísmico en las escuelas de Venezuela implementada sobre una Sistema de Información Georeferenciada (SIG) a los fines de permitir la generación de mapas temáticos de práctica interpretación que facilite la toma de decisiones.

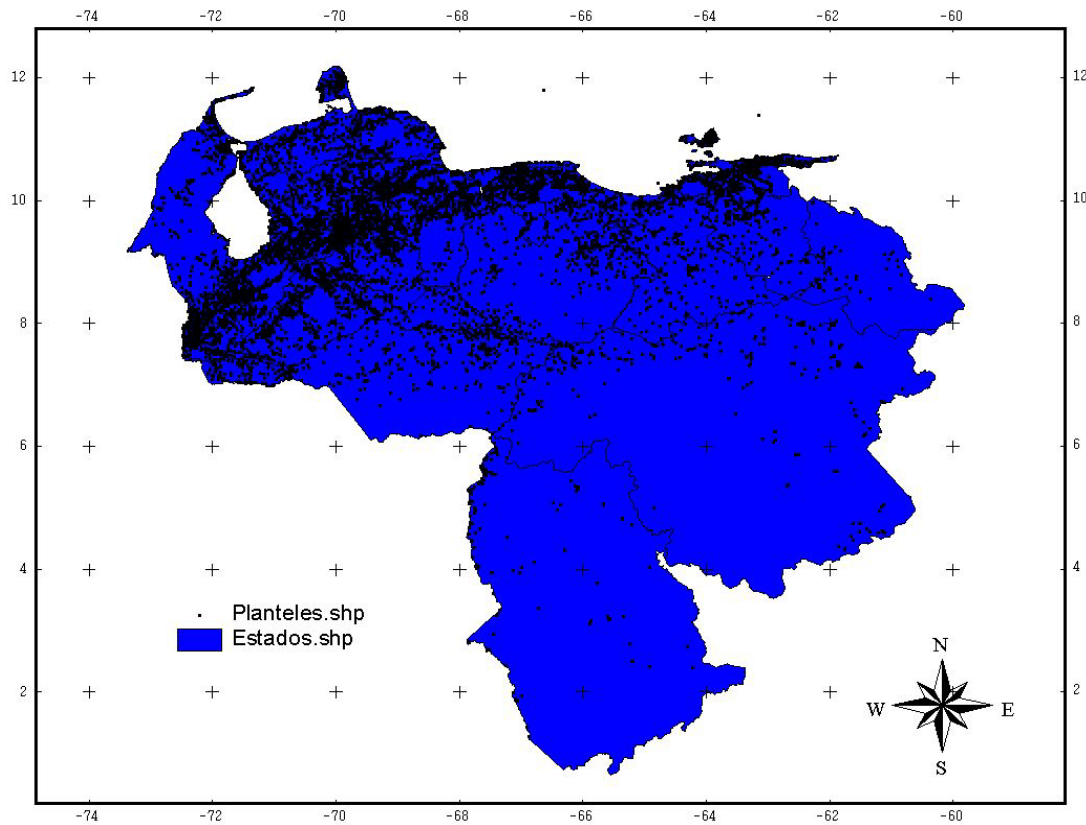
Los estudios de escenarios sísmicos persiguen establecer las consecuencias sobre el sistema educativo regional de un sismo dado, que puede estar asociado a un evento histórico o un evento simulado. Los estudios de pérdidas potenciales permiten determinar los niveles de pérdidas esperados para escenarios equiprobables, identificando las regiones expuestas a mayores niveles de riesgo que permitan orientar la aplicación de políticas y programas de mitigación regionales. Finalmente, a través del estudio de riesgo sísmico o análisis de riesgo, es posible establecer los niveles de riesgo de cada plantel escolar en término de probabilidades de pérdidas anualizadas. Estos resultados permiten identificar y jerarquizar (al menos de manera preliminar) aquellas edificaciones escolares sobre las cuales es necesario proceder con evaluaciones más rigurosas de la vulnerabilidad sísmica y que requieren de intervenciones orientados a reducir su estado de vulnerabilidad actual.

## 2. Consideraciones para el desarrollo del modelo de evaluación

El desarrollo del modelo de evaluación supone la integración de una serie de consideraciones que permitan la apropiada caracterización de la acción sísmica y de sus efectos sobre los planteles escolares.

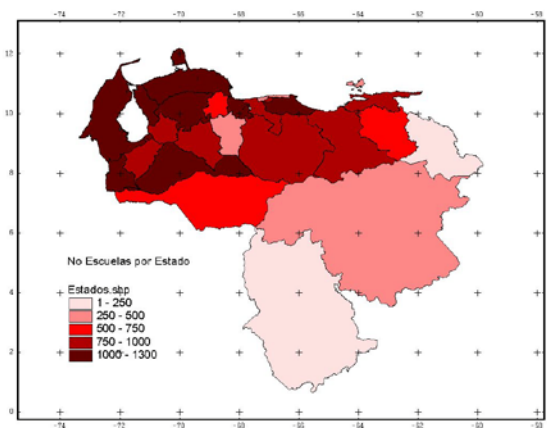
### 2.1. Base de datos de planteles escolares

Partiendo de la información digital suministrada por FEDE sobre la distribución de planteles escolares discriminada por estados, se procedió a la integración de la información en una base georeferenciada nacional, obteniéndose las coordenadas geográficas de los planteles existentes en la data consignada y asociada al código CodSISE. La base de datos cuenta con información de 18685 planteles con los siguientes campos; CodSise, Estado, Municipio, nombre plantel, dirección, dependencia y coordenadas geográficas (Latitud y Longitud). La Figura 1, muestra la distribución de planteles escolares sobre el territorio nacional.

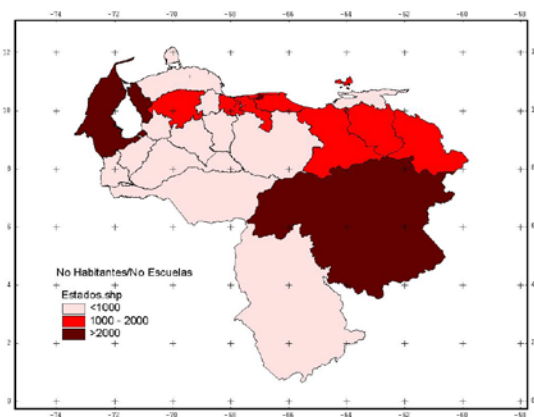


**Figura 1. – Distribución de planteles escolares**

La Figura 2, muestra el número de escuelas por estado, mientras que la Figura 3, muestra la densidad de habitantes por escuelas para cada estado, tomando como base los datos de población del Censo 2001 (INE, 2001).



**Figura 2. No. Escuelas por Estado**



**Figura 3. No habitantes/escuelas**

## 2.2. Caracterización de la vulnerabilidad sísmica de los planteles

El estudio de la *vulnerabilidad sísmica* de una edificación consiste en evaluar la predisposición de sufrir daños como consecuencia de la ocurrencia de un evento sísmico. Para caracterizar el daño sísmico se emplean los llamados estados de daño, que permiten describir cualitativamente el grado de daño global de las edificaciones en función de los daños estructurales y no estructurales (daño físico), por lo que puede ser correlacionado directamente con un parámetro de la respuesta estructural como el desplazamiento del tope de la edificación, la deriva de entrepiso, demanda de ductilidad, etc. En particular se han empleado cinco Estados o Niveles de Daño (sin daño, ligero, moderado, severo y colapso).

Para cada tipología constructiva se determinan los valores medios del desplazamiento cedente ( $\delta_y$ ) y del desplazamiento último ( $\delta_u$ ) del último nivel, el cortante cedente ( $V_y$ ) y el período de vibración fundamental de la estructura ( $Te$ ). El criterio adoptado consiste en asociar el desplazamiento cedente con el inicio del daño y el estado de daño último con el colapso, de manera que:

$\delta < \delta_y$	Estado Sin Daño (ED <sub>1</sub> )
$\delta_y < \delta < \delta_y + (\delta_u - \delta_y)/3$	Estado de Daño Ligero (ED <sub>2</sub> )
$\delta_y + (\delta_u - \delta_y)/3 < \delta < \delta_y + (\delta_u - \delta_y)2/3$	Estado de Daño Moderado (ED <sub>3</sub> )
$\delta_y + (\delta_u - \delta_y)2/3 < \delta < \delta_u$	Estado de Daño Severo (ED <sub>4</sub> )
$\delta > \delta_u$	Colapso (ED <sub>5</sub> )

Utilizando como base el llamado método de los coeficientes de desplazamientos (FEMA, 2000), es posible determinar para una forma espectral  $Sa(T)$ , el valor del coeficiente de aceleración horizontal del terreno que conduce a cada uno de los límites de desplazamientos que define cada estado de daño, según;

$$\delta_i = C_0 C_1 C_2 C_3 Sa(Te) \left( \frac{Te}{2\pi} \right)^2 g \quad (1)$$

Aceptando que los resultados de aceleraciones obtenidos corresponden a los valores medios de aceleración pico ( $\overline{PGA}$ ) necesarios para alcanzar un determinado estado de daño, se adopta una distribución lognormal  $\Phi[.]$  para describir la curva de fragilidad en los siguientes términos:

$$FD = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{PGA}} \ln \left( \frac{PGA}{\overline{PGA}} \right) \right] \quad (2)$$

- $\overline{PGA}$  - Valor medio de la aceleración horizontal pico del terreno
- $\beta_{PGA}$  - Desviación estándar del logaritmo natural de  $PGA$
- $\Phi[.]$  - Distribución lognormal
- $FD = P[ED \geq ED_i / PGA]$  - Probabilidad que el estado de daño alcanzado ED supere el estado de daño límite ED<sub>i</sub> condicionado a un valor de aceleración horizontal del terreno  $PGA$ .

Ante la ausencia de resultados que permitan estimar la dispersión de los valores medios de aceleración, se adoptan valores referenciales de  $\beta_{PGA}$  en correspondencia con los resultados obtenidos en estudios de edificaciones con similar cultura constructiva (Bonett, 2003).

A continuación se muestran los resultados preliminares obtenidos para el tipo de construcción denominado CAJETON, identificado como Tipo 10 dentro de la planilla de registro del plantel del censo escolar nacional 2006-2007.

Desplazamiento cedente:  $\delta_y = 0.762$  cm  
 Desplazamiento último:  $\delta_u = 1.906$  cm  
 Cortante cedente:  $V_y = 278.58$  Ton  
 Período de vibración:  $T_e = 0.37$  seg.  
 Forma espectral S2

Altura edificación:  $H = 9.30$  m  
 Deriva cedente:  $D_y = 0.082$  %  
 Deriva última:  $D_u = 0.205$  %  
 Ductilidad máxima:  $\mu = \delta_u / \delta_y = 2.50$

Parámetros FEMA 356:

$C_0 = 1.20$   
 $C_1 = 1.00$   
 $C_2 = 1.20$  (para zonas 5, 6 y 7 de la norma Covenin 1756:2001)  
 $C_3 = 1.00$

La Tabla No. 1., resume los valores característicos para el plantel tipo Cajetón que sirven de base para la generación de la curva de fragilidad mostrada en la Figura No. 4.

**Tabla No. 1. Valores característicos plantel tipo CAJETON**

<i>Estado daño EDi</i>	<i>Desplazamiento <math>\delta</math>(cm)</i>	<i>Demanda ductilidad (<math>\delta/\delta_y</math>)</i>	<i><math>\overline{PGA}</math> (g)</i>	<i><math>\beta_{PGA}</math> (adoptado)</i>
Ligero	0.762	1.00	0.059	0.25
Moderado	1.143	1.50	0.089	0.30
Severo	1.525	2.00	0.119	0.35
Colapso	1.906	2.50	0.149	0.35

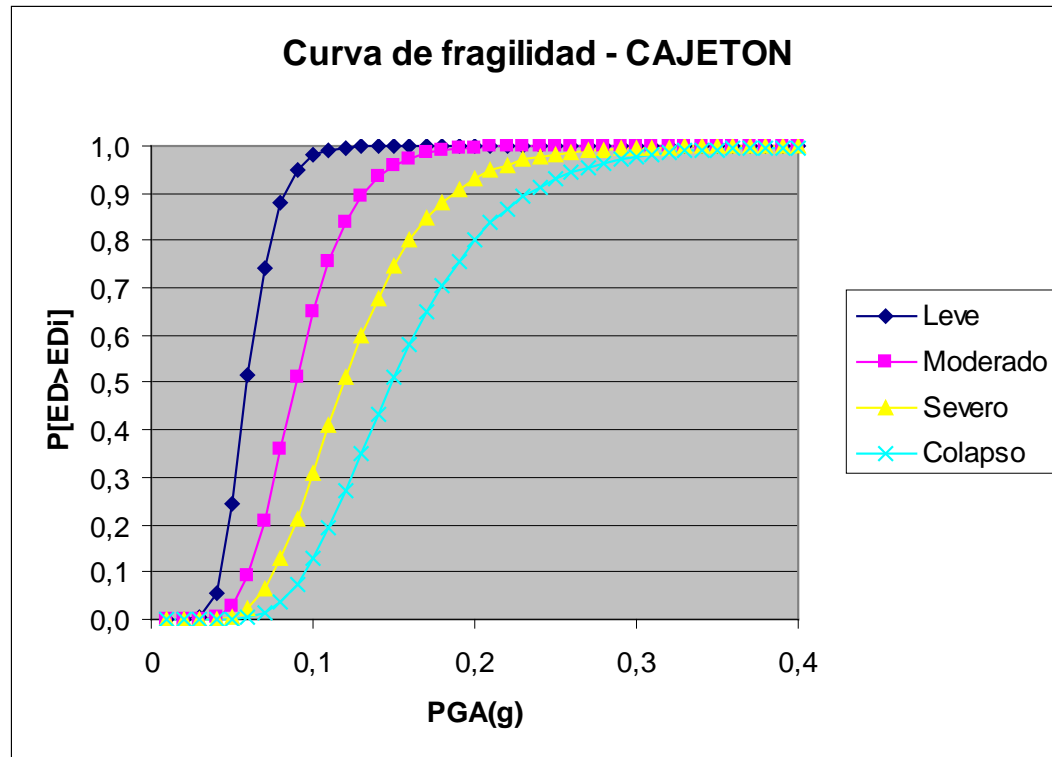


Figura 4. Curva de fragilidad para escuela tipo Cajetón

### 2.3. Caracterización de escenarios sísmicos

La caracterización del escenario sísmico consiste en determinar los niveles de aceleración horizontal del terreno esperados en cada uno de los sitios de implantación de los planteles escolares para un evento sísmico descrito a través de una magnitud y localización que reproduzca un evento histórico de interés o un evento simulado.

Para describir el patrón de atenuación de los niveles de aceleración horizontal con la distancia se adoptó la ley de atenuación propuesta por Campbell (1997) para fallas transcurrentes y suelo firme o aluvión.

$$\ln(a) = -3.512 + 0.904M - 1.328 \ln\left(\sqrt{R^2 + (0.149e^{0.647M})^2}\right) + \varepsilon \quad (3)$$

$$R = \sqrt{H^2 + r^2}$$

$H$  - Profundidad media

$r$  - Distancia horizontal

$M$  - Magnitud de momento (Mw)

La desviación estándar se determina como:

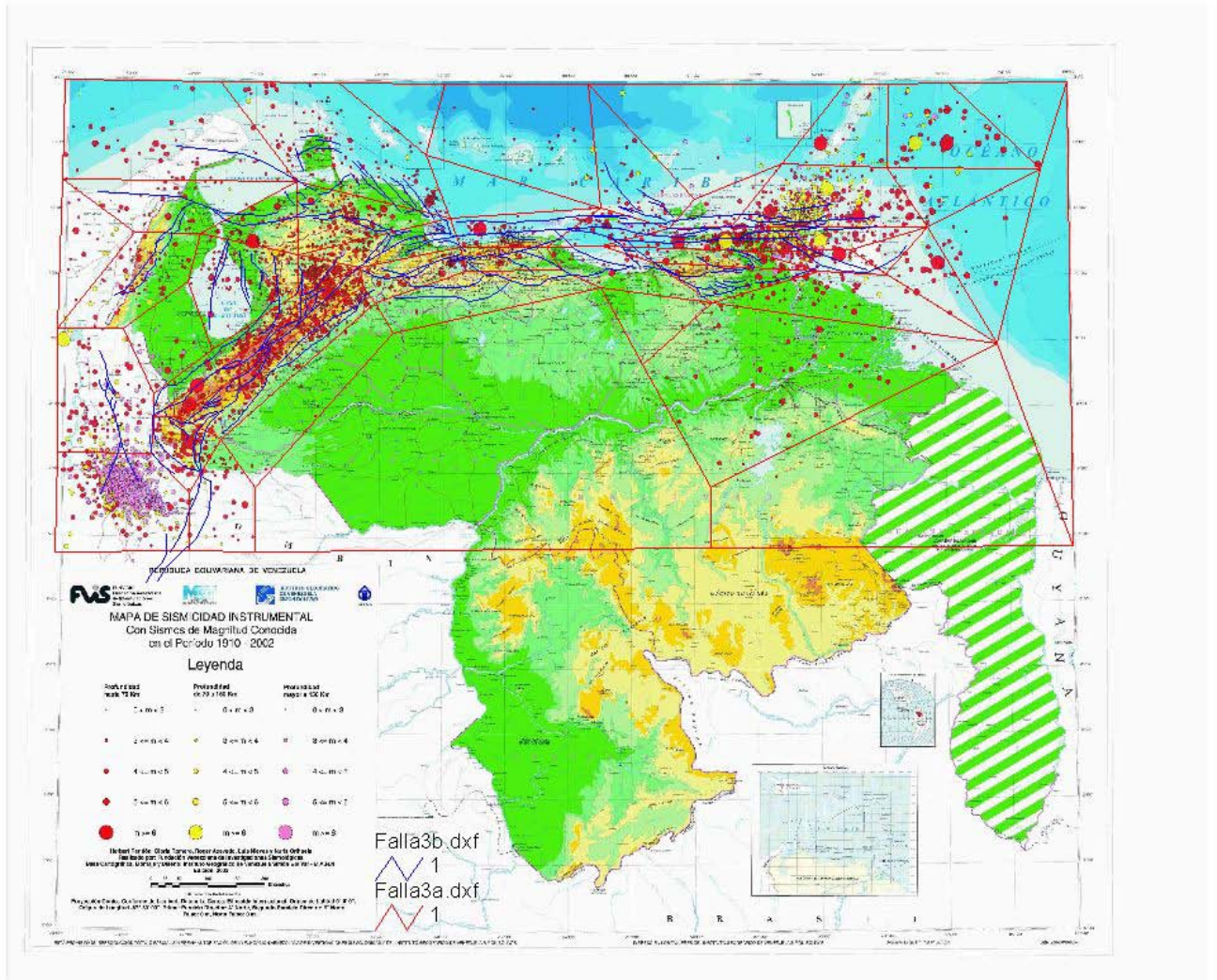
$$a < 0.068g \quad \sigma_{\ln(a)} = 0.55$$

$$\begin{array}{ll} 0.068g < a < 0.210g & \sigma_{\ln(a)} = 0.173 - 0.14 \ln(a) \\ a > 0.210g & \sigma_{\ln(a)} = 0.39 \end{array}$$

Si bien en su formulación original esta ley define la distancia de la fuente al sitio (R) como la distancia más corta entre el sitio de registro y la presunta zona de ruptura sísmogénica sobre la falla, lo cual indica la necesidad de conocer la extensión y orientación del plano de ruptura produciendo formas alargadas de las curvas de isoaceleraciones, para los fines de esta aplicación se adopta la distancia entre el sitio de registro y la proyección vertical del epicentro situada a una profundidad media H, con lo cual las curvas de isoaceleración se mantienen concéntricas al epicentro adoptado.

Para la implementación de los modelos de evaluación de pérdidas probables y riesgo sísmico es necesario además contar con la definición de los parámetros de las fallas geológicas y áreas sísmogénicas de la región. Ante la inconveniencia de obtener tal información, se adoptó una definición preliminar de áreas fuentes con parámetros equivalentes a los empleados en los estudios nacionales a los fines de reproducir la misma sísmicidad en cada región. La geometrización de las áreas fuentes toma como base el mapa de sísmicidad instrumental 1910-2002 (Funvisis, 2002) y el mapa de fallas cuaternarias de Venezuela (Funvisis, 2000). La definición de los parámetros han sido ajustados de manera de reproducir niveles de amenaza sísmica equivalentes a los contenidos en el mapa de zonificación sísmica con fines de ingeniería (Covenin, 2001), para lo cual es necesario asociar a cada área fuente una fracción de la tasa de sísmicidad anualizada derivada del procesamiento de un catálogo sísmico referencial integrando por datos descargados desde diferentes bases de datos públicas de Internet (USGS, Ceresis, etc).

La Figura No.5, muestra la geometría de las áreas fuentes adoptadas (polígonos rojos) superpuestas sobre el mapa de sísmicidad instrumental y donde se han destacado en color azul, las trazas de las principales fuentes sísmogénicas identificadas.



**Figura No.5. Definición de áreas fuentes**

Partiendo de la sismicidad global de la región es posible caracterizar la recurrencia de eventos mediante los parámetros  $a$  y  $b$  de la ley de Gutenberg-Richter

$$\log N = a - bM \quad (4)$$

$N$  número de sismos de magnitud  $\geq M$   
 $a, b$  parámetros de la ley

Estos valores se determinan a partir de estadísticas sismológicas de la región que consideran las ocurrencias de eventos dentro de determinados lapsos de tiempo e intervalos de magnitudes (Ramos y Mendoza, 1991). Así, la sismicidad de cada fuente puede ser caracterizada por una ley de recurrencia sísmica truncada del tipo:

$$n(M) = \alpha \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_o} - e^{-\beta M_u}} \quad (5)$$

$\alpha$  - Tasa anualizada de sismos con  $M > M_o$

$\beta$  - Parámetro regional

$M_o$  - Magnitud a partir del cual se esperan daños ( $M_o=4.5$ )

$M_u$  - Magnitud máxima probable de la fuente

La determinación del resto de parámetros sismogénicos tales como tipo de falla, magnitud máxima probable y su período de retorno, longitud de ruptura probable, velocidad de movimiento, entre otros, se fundamentan en el concepto de segmento característico de la falla (Audemard y Singer, 1994) y usa como base los lineamientos señalados por Audemard et al. (2000).

#### 2.4. Estimación del daño

Conocida la curva de fragilidad de cada plantel escolar y la aceleración esperada en su sitio de implantación para un sismo dado, es posible estimar la probabilidad de alcanzar y superar cada uno de los estados de daño límites a través de la aplicación del Teorema de la Probabilidad Total, según el cual,

$$P[ED \geq ED_i] = \sum P[ED \geq ED_i | PGA] P[PGA] \quad (6)$$

Siguiendo la propuesta de Blondet et al. (2005), en su estudio sobre estimación de pérdidas sísmicas en edificaciones escolares, se han ponderado las probabilidades de alcanzar cada estado de daño límite a través de un porcentaje de daño ( $PDi$ ), de manera que el factor de daño ponderado de un plantel escolar ( $FDP$ ) queda determinado como:

$$FDP = \sum_{i=1}^5 P[ED = ED_i] PDi \quad (7)$$

**Tabla No.2. Porcentaje de daño  $PDi$  asociado a cada estado de daño**

Estado de Daño ( $ED_i$ )	Porcentaje de Daño (%) ( $PDi$ )
Sin daño	0
Leve	5
Moderado	20
Severo	65
Colapso	100

Asimismo, siguiendo la propuesta del ATC(1985), es posible estimar los efectos de los daños en los planteles escolares sobre sus ocupantes asumiendo que el evento sísmico ocurre en horas de actividad escolar, para lo cual el número de personas afectadas ( $NPA$ ) se determina en función del factor de afectación de ocupantes ( $FAOi$ ) asociado a cada estado de daño.

$$NPA = \sum_{i=1}^5 P[ED = ED_i] FAOi \quad (8)$$

**Tabla No. 3. Factor de afectación ocupantes  $FAO_i$  asociado a cada estado de daño**

<i>Estado de Daño (EDi)</i>	<i>Heridos leves</i>	<i>Heridos graves</i>	<i>Muerte</i>
Sin daño	33/100000	4.4/100000	1.1/100000
Leve	30/10000	4/10000	1/10000
Moderado	30/1000	4/1000	1/1000
Severo	30/100	4/100	1/100
Colapso	2/5	2/5	1/5

Finalmente, el modelo reconoce que el costo de reposición de un plantel escolar no depende solamente de los efectos sobre su infraestructura física sino también de las consecuencias sociales que su afectación tiene en la comunidad. En este sentido, se define el factor de costo de reposición ( $FCR$ )

$$FCR = FDP \times A \times C \times F1 \times F2 \quad (9)$$

- $FDP$  Factor de daño ponderado
- $A$  Área de construcción del plantel ( $m^2$ )
- $C$  Costo promedio por unidad de área de construcción ( $Bs/m^2$ )
- $F1$  Factor asociado al nivel educativo
- $F2$  Factor de importancia social.

Para el factor  $F1$  se han establecido tres niveles (básico, medio, alto) atendiendo al nivel educativo de la escuela, en el sentido que los planteles de mayor nivel cuentan en general con una infraestructura más costosa de reponer representada por laboratorios, salas de computación, etc. La Tabla No. 4., resume los valores adoptados en el presente estudio.

**Tabla No. 4. Factor asociado al nivel educativo  $F1$**

<i>Nivel educativo</i>	<i><math>F1</math></i>
Básico	1.0
Medio	1.2
Alto	1.5

Asimismo, para el factor de importancia social ( $F2$ ) se han establecido tres niveles (básico, medio, alto) atendiendo a la densidad de habitantes por planteles de cada estado (ver Fig. 3). La Tabla No. 5., resume los valores adoptados en el presente estudio.

**Tabla No. 5. Factor de importancia social  $F2$**

<i>Nivel importancia</i>	<i>No Hab/ No planteles</i>	<i><math>F2</math></i>
Básico	<1000	1.0
Medio	1000 – 2000	1.2
Alto	>2000	1.5

### 3. Resultados

A continuación se presentan los *resultados preliminares* obtenidos con el modelo implementado, los cuales deben ser considerados sólo como referenciales, debido al hecho que la base de datos debe ser completada y actualizada con la información recopilada del Censo Escolar Nacional 2006-2007, a los fines de incorporar para cada plantel (referido al CodSISE) otros campos fundamentales para la evaluación como son;

- Tipología de construcción (según códigos del censo)
- Nivel educativo (básico: 0, medio: 1, alto: 2)
- No de personas que ocupan el plantel e condiciones ordinarias de operación
- Área de construcción (m<sup>2</sup>)

Los resultados que se presentan asumen para TODOS los planteles escolares:

1. Igual tipología de construcción (se adoptó una tipología media equivalente al llamado Cajetón (tipo T10).
2. Nivel educativo básico (F1=1.0)
3. Media 200 personas por plantel educativo
4. Media 400 m<sup>2</sup> de área de construcción.
5. Costo de construcción promedio: 1.0 MM Bs/m<sup>2</sup>

#### 3.1. Estudios de escenarios

El estudio de escenarios sísmicos permite estimar los efectos de un sismo singular sobre una región. Sobre la base de un sismo característico se determina la distribución de aceleraciones a partir del cual se estiman los efectos y consecuencias sobre los planteles escolares.

La definición del evento supone la definición de la magnitud y la localización del epicentro. La Tabla No. 6 describe los escenarios sísmicos singulares empleados en la presente evaluación. (Funvisis, 1997) (Grases, 1994)

**Tabla No. 6. Escenarios sísmicos singulares estudiados**

<i>Escenario Sísmico</i>	<i>Magnitud (Mw)</i>	<i>Longitud (grados)</i>	<i>Latitud (grados)</i>
Cariaco 1997	6.9	-63.51	10.54
Caracas 1967	6.6	-67.40	10.68
Mérida 1812	7.0	-71.30	8.50
Barquisimeto 1812	6.2	-69.10	10.20

A través de las leyes de atenuación se establece para cada plantel el valor de aceleración esperado. Finalmente, a partir de las curvas de fragilidad se determina la probabilidad de alcanzar los diferentes estados de daño y el factor ponderado de daño. La Tabla No. 7, resume para cada escenario sísmico evaluado, el número de planteles afectados discriminados para cada rango de daño.

**Tabla No. 7. Número de planteles por rango de daño**

<i>Escenario Sísmico</i>	<i>1-10%</i>	<i>10-30%</i>	<i>30-60%</i>	<i>60-100%</i>	<i>Total</i>
Cariaco 1997	264	244	144	308	960
Caracas 1967	1717	133	48	10	1898
Mérida 1812	527	248	257	324	1356
Barquisimeto 1812	200	123	221	225	769

El Anexo A (versión digital de este informe), reproduce los mapas de isoaceleraciones para cada uno de los escenarios estudiados y la correspondiente distribución de daños esperados sobre los planteles escolares de la región afectada por el evento sísmico discriminados por rango de daño.

### 3.2. Estudios de pérdidas probables

El estudio de pérdidas probables está orientado a cartografiar los efectos de un nivel de amenaza en una región. Constituyen una herramienta indispensable para la toma de decisiones y definición de políticas de mitigación y prevención del riesgo. Su desarrollo implica la compilación y síntesis de una importante variedad de escenarios sísmicos asociados a una misma probabilidad de ocurrencia o determinado período medio de retorno. Se utilizan para destacar de manera relativa las regiones expuestas a mayores niveles de riesgo con miras a priorizar la aplicación de políticas y programas de mitigación.

En particular se presentan los resultados asociados a tres niveles de sismicidad correspondientes a los llamados *sismos frecuentes* (con períodos medios de retorno de 75 años), *sismos extremos* (con períodos medios de retorno de 500 años) y *sismos excepcionales* (con períodos medios de retorno de 1.000 años).

Siguiendo la metodología propuesta por Safina (2003), la evaluación se realiza sobre una matriz de puntos (posibles epicentros). A cada punto se asocia un evento sísmico cuya magnitud corresponda al periodo de retorno conocido y en concordancia con los parámetros sismogénicos de la fuente. Evaluado el escenario sísmico, se sintetizan los resultados sobre el punto en cuestión, permitiendo la generación de mapas de probabilidades de pérdidas. En particular, se ha empleado una matriz de 12.236 puntos equiespaciados a 0.10 grados, de manera que para cada período de retorno estudiado el sistema evalúa 12.236 escenarios sísmicos, y para cada escenario evaluado se cuantifican los efectos sobre los 18.685 planteles escolares, sintetizando los resultado en cada epicentro en un mapa temático.

El Anexo B (versión digital de este informe), presenta una muestra de los mapas temáticos obtenidos para los tres niveles de sismicidad estudiados correspondientes a los períodos de retorno de 1.000, 500 y 75 años. En particular se representa el número de planteles escolares que alcanzan un daño medio igual o superior al 60%, el número de víctimas mortales esperado en caso de ocurrir el evento en horas de actividad escolar y el costo estimado de reposición en los términos antes señalados.

### 3.3. Estudios de riesgo

El estudio de riesgo sísmico, persigue estimar los niveles de pérdidas en cada plantel escolar debido a todos los posibles eventos ocurridos durante un período de tiempo

determinado, de manera que el resultado es una curva de riesgo por cada plantel. Nuevamente, la evaluación se realiza sobre una matriz de puntos (posibles epicentros). A cada punto se asocia una sucesión de eventos sísmicos con magnitudes entre  $M_0$  y  $M_u$  y en concordancia con los parámetros sismogénicos de la fuente asociada a dicho punto. Para cada plantel se cuantifican los daños y se acumula la frecuencia media anual de sismos capaces de producir dicho nivel de daño, que permitirá a través de un modelo de Poisson determinar la probabilidad media anual de excedencia y construir la curva de riesgo correspondiente.

En particular, se ha empleado una matriz de 12.236 puntos equiespaciados a 0.10 grados y la magnitud se varía con incrementos  $\Delta M = 0.10$ , para un total de 244.700 escenarios. Para cada escenario se cuantifican los efectos sobre los 18.685 planteles escolares acumulando la frecuencia media anual de sismos capaces de producir daños con rangos incrementales del 10%. En total se obtienen 18.685 curvas de riesgo (una por plantel) similares a las mostradas en la Figura C.1 del Anexo C (versión digital de este informe).

El criterio adoptado para calificar el nivel de riesgo sísmico de cada plantel escolar (Safina, 2003) consiste en determinar el nivel de daño asociado a una probabilidad anual de excedencia igual a 0.0021 (correspondiente a una probabilidad de excedencia del 10% en un tiempo de exposición de 50 años – equivalente al inverso del período de retorno de 475 años). Así es posible definir cuatro rangos de riesgo sísmico. La Tabla No. 8, resume el número de planteles y su proporción dentro de la base de datos para cada nivel de riesgo sísmico adoptado.

**Tabla No. 8. Número de planteles por nivel de riesgo**

Nivel de Riesgo	Rango de daño	No. planteles	Porcentaje
Muy alto	> 60%	2952	15.80%
Alto	30% - 60%	7457	39.90%
Medio	10% - 30%	5537	29.64%
Bajo	< 10 %	2739	14.66%

La Figura C.2 (versión digital de este informe), representa la distribución de de los planteles de acuerdo con el porcentaje de daño esperado para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años.

#### 4. Productos

Además de la plataforma SIG implementada en el entorno ArcView 3.2. (ESRI, 2004), que permite la representación gráfica de los resultados y la generación de mapas temáticos de práctica interpretación, se consignan los programas de cálculo que permiten la generación de los escenarios sísmicos, la cuantificación de las pérdidas esperadas y la estimación del riesgo de los planteles escolares.

##### 4.1. Programa ESCENA

Objetivo: Simulación de escenario sísmico singular.

Datos de entrada:    Coordenadas del epicentro (grados)  
                                  Magnitud de momento ( $M_w$ )

Resultado:    Archivo RESULT.OUT con 18685 registros y 11 campos

1. CodSISE código del plantel
2. Longitud (grados)
3. Latitud (grados)
4. Distancia R (Km)
5. Aceleración máxima del terreno (g)
6. P[ED=ED1]
7. P[ED=ED2]
8. P[ED=ED3]
9. P[ED=ED4]
10. P[ED=ED5]
11. FDP Factor de daño medio

Archivo GRID.OUT con 22196 registros y 3 campos correspondientes a las aceleraciones en una grid de puntos equiespaciadas, empleada para representar los mapas de isoaceleraciones.

1. Longitud (grados)
2. Latitud (grados)
3. Aceleración máxima del terreno (g)

#### 4.2. Programa ESCENAT

Objetivo: Cuantificación de las pérdidas probables esperadas

Dato de entrada: Período de retorno (años)

Resultado: Archivo RESULT.OUT con 12236 registros y 10 campos

1. Longitud del epicentro (grados)
2. Latitud del epicentro (grados)
3. No planteles con daño entre 1-10%
4. No planteles con daño entre 10-30%
5. No planteles con daño entre 30-60%
6. No planteles con daño entre 60-100%
7. No de heridos leves
8. No de heridos graves
9. No de muertes
10. Factor de costo reposición (Millones Bs)

#### 4.3. Programa ESCENAR

Objetivo: Estudio de riesgo sísmico de planteles escolares

Datos de entrada: No requiere suministro de dato alguno

Resultado: Archivo RESULT.OUT con 18685 registros y 10 campos que permite graficar la curva de riesgo de cada plantel.

1. Probabilidad anual  $D > 0\%$
2. Probabilidad anual  $D > 10\%$

3. Probabilidad anual  $D > 20\%$
4. Probabilidad anual  $D > 30\%$
5. Probabilidad anual  $D > 40\%$
6. Probabilidad anual  $D > 50\%$
7. Probabilidad anual  $D > 60\%$
8. Probabilidad anual  $D > 70\%$
9. Probabilidad anual  $D > 80\%$
10. Probabilidad anual  $D > 90\%$

#### 4.4. Otros archivos de interés

Además se consignan una serie de archivos auxiliares empleados por los programas de análisis con los datos de los planteles escolares, las fuentes, etc.

- Archivo PLANTEL.TXT con 18685 registros y 10 campos
  1. CodSISE código del plantel
  2. Longitud (grados)
  3. Latitud (grados)
  4. Tipología de construcción (código 1 – 15) [por actualizar]
  5. Tipo de terreno [por actualizar]
  6. Nivel educativo [por actualizar]
  7. Factor de importancia social
  8. No. Ocupantes [por actualizar]
  9. Área de construcción ( $m^2$ ) [por actualizar]
  10. [campo disponible]
  
- Archivo TIPOL.TXT con 15 registros y 8 campos. Para cada tipología de construcción,
  1. Aceleración media del terreno asociada al estado de daño leve
  2. Aceleración media del terreno asociada al estado de daño moderado
  3. Aceleración media del terreno asociada al estado de daño severo
  4. Aceleración media del terreno asociada al estado de colapso
  5. Desviación estándar aceleración asociada estado de daño leve
  6. Desviación estándar aceleración asociada estado de daño moderado
  7. Desviación estándar aceleración asociada estado de daño severo
  8. Desviación estándar aceleración asociada estado de colapso
  
- Archivo ZONAS.TXT vértices de las áreas fuentes
 

Np Número de vértices  
( $X_i, Y_i$ ) Coordenadas de los vértices (grados) [Np puntos]  
Nf Número de área fuentes  
( $n_1, n_2, n_3, \dots, n_m$ ) Secuencia de vértices que definen el área fuente – en sentido antihorario [Nf secuencias]
  
- Archivo GAUSS.TXT puntos de integración de la campana de Gauss

## 5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio están limitados por la falta de actualización y representatividad de las bases de datos de los planteles escolares, sin embargo constituyen una primera orientación sobre la situación del sistema escolar nacional ante la ocurrencia de un evento sísmico.

De los resultados de los estudios de escenarios y de pérdidas probables se desprende que las consecuencias sobre los planteles escolares está fundamentalmente condicionada a la ubicación del epicentro y la intensidad del movimiento sísmico. En este sentido destaca la región capital donde la importante concentración de planteles escolares eleva significativamente los niveles de vulnerabilidad haciendo que las consecuencias de eventos sísmicos en su entorno sean significativamente mayores que otras regiones con mayor grado de amenaza sísmica, incluso con sismos de moderada intensidad.

En este sentido, puede afirmarse que de acuerdo con la distribución y características de los planteles escolares, en términos absolutos, las mayores consecuencias sobre dicha infraestructura y sus ocupantes se obtiene para sismos cercanos a la región capital y sus alrededores (Libertador, Miranda, Aragua y Carabobo). También destacan como regiones con alto impacto sobre la infraestructura escolar, las regiones andinas comprendidas entre los estados Tachira, Mérida, Trujillo y Lara, y la región nororiental comprendida entre los estados Sucre y Anzoátegui, debido fundamentalmente a los elevados niveles de amenaza de tales regiones y sistemática concentración de población.

Los resultados del análisis de riesgo están significativamente condicionados a la suposición de una vulnerabilidad homogénea para todos los planteles escolares lo cual conduce a una relación directa con la amenaza sísmica, en el sentido que la distribución de los planteles con diferente niveles de riesgo prácticamente reproduce la forma del mapa de amenaza. Sobre esta base se obtiene que 15.80% de los planteles presentan un nivel de riesgo sísmico muy alto y están fundamentalmente ubicados en los estados Sucre y los estados andinos situados sobre la falla de Boconó. Prácticamente un 40% de los planteles presentan un riesgo sísmico alto, 30% un nivel de riesgo sísmico medio y el resto un riesgo bajo. Estos resultados deberían ser fuertemente afectados al incorporar una descripción de vulnerabilidad más apropiada lo cual depende de la apropiada caracterización de la tipología constructiva existente en cada plantel.

Los resultados anteriores señalan que si bien en términos particulares las escuelas con mayores niveles de riesgo se sitúan sobre las zonas de mayor amenaza, las consecuencias de un evento sísmico en la región central tendrá en términos absolutos un mayor impacto sobre la infraestructura escolar nacional, lo cual indica la necesidad de orientar las políticas de mitigación hacia las regiones antes señaladas con especial énfasis sobre la región central del país y su capital.

## 6. Referencias

ATC (1985). *Eartquake damage evaluation data for California*. ATC-13. Applied Technology Council, Redwood City. California, USA.

- AUDEMARD, F. y SINGER, A. (1994). *Parámetros sismotectónicos para fines de evaluación de la amenaza sísmica en el noroccidente de Venezuela*. VII Congreso venezolano de geofísica. Caracas. Septiembre 1994.
- AUDEMARD, F., MACHETTE, M., COX, J., DART, R. and HALLER, K (2000). *Map and database of quaternary faults in Venezuela and its offshore regions*. Open-File report 00-018. USGS.
- BLONDET, M., MUÑOZ, A., VELÁSQUEZ, J. y LEÓN, H. (2005). *Estimación de pérdidas sísmicas en edificaciones educativas peruanas*. IX Congreso chileno de sismología e ingeniería antisísmica. Concepción. Chile. Nov. 2005.
- BONETT, R. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña UPC. Barcelona. España.
- COVENIN (2001), *Norma venezolana para edificaciones sismorresistentes*. Covenin-Mindur 1756-1:2001. Ministerio de infraestructuras. Fondonorma. Caracas. Venezuela Caracas, Venezuela.
- CAMBELL, K.W. (1997). *Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra*. Seismological research letters. Vol. 68. Number 1. pp154-179.
- FEMA (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation building*. FEMA-356. Prepared by American Society of Civil Engineers ASCE. Reston. Virginia. USA. November 2000.
- FUNVISIS (1997). *Evaluación preliminar del sismo de Cariaco del 9 de Julio de 1997, Estado Sucre, Venezuela*. Fundación venezolana de investigaciones sismológicas. Octubre 1997.
- FUNVISIS (2000). *Mapa de fallas cuaternarias de Venezuela*. Fundación venezolana de investigaciones sismológicas. Disponible: <http://funvisis.gob.ve/> [consulta: 21 Marzo 2007]
- FUNVISIS (2002). *Mapa de sismicidad instrumental 1910-2002*. Fundación venezolana de investigaciones sismológicas. Disponible: <http://funvisis.gob.ve/> [consulta: 21 Marzo 2007]
- GRASES, J. (1994), *Terremotos destructores del Caribe, 1502-1990*. UNESCO-RELACIS, Montevideo. Chile.
- INE(2001). *Censo de población y vivienda*. Instituto Nacional de Estadística. Caracas. Disponible: <http://www.ine.gov.ve> [consulta: 21 Marzo 2007]]
- ESRI (2004). *ArcView 3.2. Integrated Software for Geographic Information Systems*. ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC., California, USA.
- McGUIRE, R. K. (2004). *Seismic Hazard and Risk Analysis*. MNO-10. Earthquake Engineering Research Institute EERI. California. USA.
- RAMOS, C. y MENDOZA, J. (1991). *Return periods for Venezuelan earthquakes based on the analysis of instrumental seismicity 1910-1990*. Funvisis.
- SAFINA, S. (2003). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo sísmico*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña UPC. Barcelona. España.