

Vulnerabilidad sísmica de las construcciones del centro histórico de la Ciudad de Salta – Argentina

Seismic Vulnerability of Buildings in the Historic Center of the City of Salta – Argentina

DOI: <https://doi.org/10.51378/ilia.vi2.9884>

Mario W. E. Toledo¹, Sergio Oller², Roberto A. Caro³ y Felipe Biella¹

¹Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ingeniería, Instituto e Ingeniería Civil y Medio Ambiente Salta (ICMASa), CIUNSa, CIMNE IBER, Salta, Argentina mwtoledo15@gmail.com; <https://icmasa.ing.unsa.edu.ar>

²Universidad Nacional de Salta, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONCET), Centro Internacional de Métodos Numéricos para Ingeniería, Salta, Argentina, sergio.oller@upc.edu, <https://cimne-iber.com.ar/>

³Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ingeniería, Instituto e Ingeniería Civil y Medio Ambiente Salta (ICMASa), Argentina robertoadolfocaro@gmail.com; <https://icmasa.ing.unsa.edu.ar/>

Fecha de recepción: 19 de junio de 2025

Fecha de aprobación: 3 de septiembre de 2025

Resumen

El objetivo de este trabajo es la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las construcciones de la Ciudad de Salta y su impacto socio económico utilizando métodos de análisis de riesgo sísmico y herramientas de representación de información georreferenciada (SIG). En esta primera etapa se estudiaron nueve manzanas del casco histórico de la ciudad de Salta. El estudio incluyó la recopilación y digitalización de la documentación técnica existente aprobada por la municipalidad de la Ciudad de Salta, un levantamiento fotogramétrico y una evaluación del nivel socioeconómico del área de estudio. Se aplicó el Método del Índice de Vulnerabilidad Italiano a fin de determinar los índices de vulnerabilidad relacionado con índices de daño mediante funciones de vulnerabilidad. Los resultados obtenidos permitieron obtener mapas de Índices de Vulnerabilidad para distintas tipologías constructivas. Se destaca el trabajo interdisciplinario entre investigadores de las Facultades de Ingeniería, Ciencias Económicas Jurídicas y Sociales y Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Salta (UNSa), junto con profesionales y autoridades del Consejo Profesional de Ingenieros y Profesiones Afines de la Provincia de Salta (COPAIPA).

Palabras clave – vulnerabilidad sísmica, tipología constructiva, funciones de vulnerabilidad.

Abstract

The objective of this study is to assess the seismic vulnerability of buildings in the City of Salta and their socio-economic impact, using seismic risk analysis methods and Geographic Information System (GIS) tools. In this first stage, nine blocks of the city's historic centre were studied. The study involved the collection and digitization of existing technical documentation approved by the Municipality of Salta, a photogrammetric survey, and an assessment of the socioeconomic level of the study area. The Italian Vulnerability Index Method was applied to determine vulnerability indices, which were then related to damage indices through vulnerability functions. The results obtained made it possible to generate Vulnerability Index maps for different building typologies. The interdisciplinary work between researchers from the Faculties of Engineering, Economic, Legal and Social Sciences, and Natural Sciences of the National University of Salta (UNSa), together with professionals and authorities from the Professional Council of Engineers and Related Professions of the Province of Salta (COPAIPA), is a key highlight of this project.

Keyword – seismic vulnerability, building typology, vulnerability functions.

I. INTRODUCCIÓN

La Ciudad de Salta se encuentra en una zona de peligrosidad sísmica elevada, tal como lo define el



Publicamos bajo la Licencia de Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Instituto Nacional de Prevención Sísmica ([1] INPRES CIRSOC 103). Entre los últimos sismos de relevancia que tuvieron impacto en Salta, se pueden mencionar el sismo de El Galpón (febrero del 2010) de magnitud de 4,7 en la Escala Sismológica de Richter y una intensidad en la Escala de Mercalli modificada grado IV a V (moderado) en el epicentro, y el terremoto ocurrido en agosto de 1948 de magnitud 6,8 Richter y de intensidad máxima VIII (destructivo) en la zona epicentral (región cerro la Candelaria a unos 30 km al oeste de Salta Capital) y VII (muy fuerte) en Salta Capital.

Esta investigación se realizó en el marco de un proyecto interdisciplinario en temas estratégicos, donde participaron investigadores de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Naturales y Ciencias Económicas Jurídicas y Sociales de la Universidad Nacional de Salta (UNSa) y el Revisor de las Normas Sismorresistentes del Consejo Profesional de Agrimensores, Ingenieros y Profesiones Afines de Salta ([2] COPAI-PA) y becarios alumnos de grado de la carrera de Ingeniería Civil de la UNSa. El objetivo del proyecto se centra en el estudio de la vulnerabilidad sísmica del microcentro de la ciudad de Salta, a fin de determinar y cuantificar los daños probables en las construcciones existentes bajo un cierto escenario sísmico. De esta manera se obtiene una herramienta que será de utilidad para que las autoridades locales a fin de evitar o minimizar los posibles daños o pérdidas de vidas humanas, los daños a las edificaciones y la afectación económica a la población.

El riesgo sísmico de un lugar, para un elemento expuesto y para un período de tiempo, se define mediante el concepto de convolución ([3] Zarzosa, M. N. L.) de la peligrosidad sísmica por la vulnerabilidad y el coste, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{riesgo}(e,x,t) = p(e,x,t) \otimes v(e,x,t) \otimes c(e,x,t) \quad (1)$$

donde $\text{riesgo}(e,x,t)$ es el riesgo del elemento e , expuesto en el lugar x en el instante t ; $p(e,x,t)$ es la función que define la peligrosidad sísmica entendida como probabilidad de ocurrencia de un sismo; $v(e,x,t)$ es la función que define la vulnerabilidad del elemento expuesto e y que cuantifica el grado de daño que puede sufrir un edificio, estructura o incluso un área urbana frente a un determinado escenario sísmico; y $c(e,x,t)$ es la función de costo o valor económico de restauración o reposición del elemento expuesto. En este trabajo, se definirá la acción sísmica o amenaza

se refiere a la probabilidad de que en una determinada zona y en un período de tiempo determinado se iguale o supere un determinado movimiento de suelo por causa de la acción sísmica. Las escalas de intensidad macrosísmica son precursoras de los estudios de daño sísmico y, en consecuencia, los primeros métodos de análisis de riesgo que definen el terremoto mediante un solo parámetro que inicialmente fue la intensidad y luego la aceleración pico o efectiva. Se tomará como referencia en este trabajo la Escala Macrosísmica MSK (Medevev-Sponheuer-Karnik, 1964).

La investigación se centra en el estudio de la vulnerabilidad sísmica, entendida como el grado de daño que sufre un edificio o infraestructura, debida a la ocurrencia de un movimiento sísmico del terreno. Es una característica intrínseca de cada edificación independiente de la peligrosidad del lugar. Existen diferentes enfoques y técnicas para la determinación del daño y la vulnerabilidad. Por un lado, mediante la inspección del daño ocurrido post-terremoto de edificios se obtiene el índice de daño y a través de *funciones de vulnerabilidad* se correlaciona con alguna característica que describa la peligrosidad. Por el otro, están las técnicas indirectas que no proporcionan el daño en los edificios directamente, sino que primero evalúan un índice de vulnerabilidad de la estructura, que es un índice de calidad estructural del edificio ante cargas sísmicas en función de la tipología estructural considerada. Y en una segunda fase se relacionan los índices de vulnerabilidad con los daños mediante estudios post-terremotos y estadísticos a través de funciones de vulnerabilidad. Éste último es el enfoque que se adoptó en este trabajo.

En esta primera etapa, se presenta el estudio de vulnerabilidad sísmica de un sector de nueve manzanas del casco histórico de Salta, basado en la aplicación del Método Italiano ([4] Benedetti y Pettrini, 1984). Este método utiliza los datos obtenidos mediante inspección para realizar una calificación de la calidad del diseño y construcción sismorresistente de los edificios mediante un coeficiente denominado índice de vulnerabilidad I_v .

La calificación consiste en la evaluación y ponderación de diferentes parámetros relacionados con componentes, estructurales y no estructurales, que tienen un papel importante en el comportamiento sísmico del edificio. La valoración de algunos de estos parámetros se apoya también en cálculos estructura-

les simplificados. El método relaciona luego el índice de vulnerabilidad obtenido con el grado de daño que sufre la estructura, a través de funciones de vulnerabilidad para cada grado de intensidad macrosísmica del sismo o para diferentes niveles de aceleración máxima. Este método fue adaptado y utilizado en estudios previos de riesgos sísmicos en la ciudad de Barcelona ([5] Barbat et al., 1996; [6] Yépez, 1996; [7] Pujades et al., 2000; [8] Mena, 2002).

El método Italiano consiste en la evaluación de 11 parámetros a partir de trabajo de campo. La Tabla 1 muestra la descripción, categorías y pesos correspondientes a cada uno de los once parámetros para los edificios de mampostería no reforzada ([4] Benedetti y Petrini, 1984). El peso de los parámetros 5, 7 y 9 varía entre 0,5 y 1 dependiendo de algunos elementos, como por ejemplo el porcentaje de diafragmas rígidos bien conectados, la presencia de galerías o pasillos y el peso de la cubierta.

Tabla 1: Valor de los parámetros que contribuyen al índice de vulnerabilidad I_v para los edificios de mampostería no reforzada ([4] Benedetti y Petrini, 1984)

I	Descripción del parámetro i	Valor K_i según categoría				W_i
		A	B	C	D	
1	Organización del sistema resistente	0	0	20	45	1,0
2	Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0,25
3	Resistencia convencional	0	5	25	45	1,5
4	Posición del edificio y cimentación	0	5	25	45	0,75
5	Diafragmas horizontales	0	5	15	45	1,0 (variable)
6	Configuración en planta	0	5	25	45	0,5
7	Configuración en elevación	0	5	25	45	1,0 (variable)
8	Separación máxima entre muros	0	5	25	45	0,25
9	Tipo de cubierta	0	15	25	45	1,0 (variable)
10	Elementos no estructurales	0	5	25	45	0,25
11	Estado de conservación	0	5	25	45	1,0

Las categorías A, B, C y D, van respectivamente desde condiciones favorables a desfavorables y su evaluación permite asignar un valor numérico K_i que varía entre 0 y 45.

El índice de vulnerabilidad se obtiene mediante la ecuación (2) que es la suma ponderada de los valores numéricos asignados según la calidad de cada uno de los once parámetros. Cuanto mayor es el índice de vulnerabilidad peor es la capacidad o calidad resistente del edificio.

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i \cdot W_i \quad (2)$$

Para los edificios de hormigón armado, el método considera solo tres categorías: A, B y C. En la Tabla 2 se muestra la descripción, cuantificación y pesos considerados.

Tabla 2: Valor de los parámetros que contribuyen al índice de vulnerabilidad I_v para los edificios de hormigón armado ([4] Benedetti y Petrini, 1984).

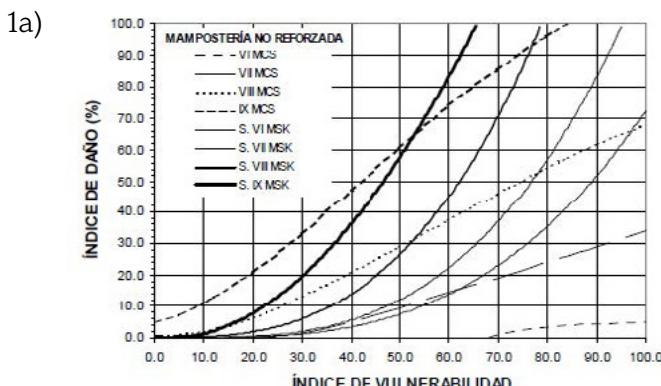
I	Descripción del parámetro i	Valor K_i según categoría			W_i
		A	B	D	
1	Organización del sistema resistente	0	1	2	4,0
2	Calidad del sistema resistente	0	1	2	1,0
3	Resistencia convencional	-1	0	1	1,0
4	Posición del edificio y cimentación	0	1	2	1,0
5	Diafragmas horizontales	0	1	2	1,0
6	Configuración en planta	0	1	2	1,0
7	Configuración en elevación	0	1	3	2,0
8	Separación máxima entre muros	0	1	2	1,0
9	Tipo de cubierta	0	1	2	1,0
10	Elementos no estructurales	0	1	2	1,0
11	Estado de conservación	0	1	2	1,0

En este trabajo, se consideraron los valores y pesos de estas tablas que fueron calibrados y asignados basados en los terremotos ocurridos en España, análisis dinámicos de las estructuras y simulaciones numéricas ([6] Yépez, 1996). En etapas posteriores se incorporará modificaciones del coeficiente de peso W_i en función de las experiencias de expertos y la propia experiencia de este trabajo ([9] Castillo, 2005). La ecuación (2) puede normalizarse para obtener índices en el rango entre cero (nada vulnerable) y 1 (nada resistente) o entre cero y 100. La ecuación (3) muestra la normalización aplicada.

$$I_v = (100/382,5) \cdot \sum_{i=1}^{11} K_i \cdot W_i \quad (3)$$

Una vez obtenido el Índice de vulnerabilidad se relaciona con el índice de daño a través de las funciones de vulnerabilidad. Estas permiten formular el índice de vulnerabilidad para cada grado de intensidad macrosísmica de terremoto (Sistema MSK) y evaluar de manera rápida y sencilla, pero con mayor efectividad que otros métodos de la misma categoría, la vulnerabilidad sísmica de edificios, lo que resulta imprescindibles para desarrollar estudios urbanos a gran escala.

El método ha sido desarrollado tanto para estructuras de mampostería como de hormigón armado. Sin embargo, ambos casos, por las características del método, consideran la influencia de la mampostería. Incluso la concepción misma del método lo hace aplicable a subtipologías de los dos grandes grupos de estructuras. Esta es una de las principales ventajas lo que hacen del método italiano sea más eficiente y adaptable a las tipologías propias de la zona estudiada. Las funciones de vulnerabilidad utilizadas son las curvas adaptadas por [5] Barbat y [6] Yépez, quienes calibraron las funciones basadas en datos del daño observado durante los terremotos ocurridos en Almería (1993 y 1994) y en simulaciones numéricas. El terremoto de Murcia de 1999 permitió confirmar la adecuación del método y de las curvas construidas ([3] Zarzosa). En la figura 1 se presentan las funciones de vulnerabilidad para edificios de mampostería no reforzada (1a) y para los edificios de hormigón armado (1b). Las curvas de trazo continuo corresponden a la propuesta de [5] Barbat et al. (1996) y las de trazo discontinuo a la propuesta original de [10] Angeletti et al., 1988.



1b)

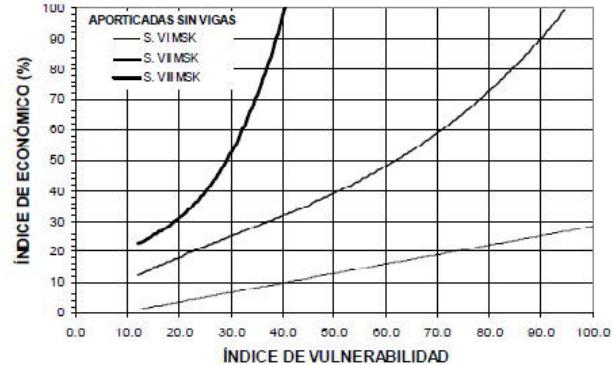


Fig. 1. Funciones de vulnerabilidad. 1a) Edificios de mampostería no reforzada; 1b) Edificios de hormigón armado.

ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD EN EL MICROCENTRO DE LA CIUDAD DE SALTA (ARGENTINA)

En esta primera etapa la zona de estudio incluye nueve manzanas correspondientes al casco histórico de la ciudad de Salta, ubicadas en el microcentro, entre las calles Martín Miguel de Güemes y España (dirección Norte-Sur) y las calles Pueyrredón y 20 de Febrero (dirección Este-Oeste). En la Figura 2 se muestra la zona estudiada.

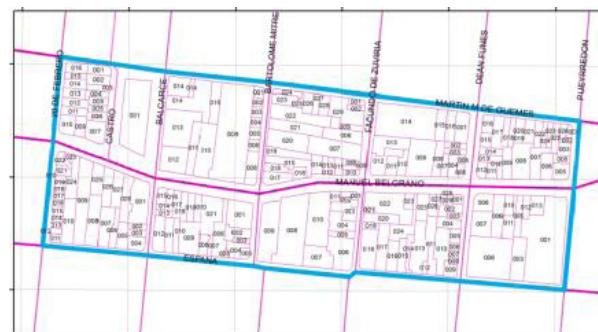


Fig. 2. Zona de estudio 1ra etapa.

La zona de estudio comprende nueve manzanas: identificadas como Sección B, Manzanas 84, 85, 86, 88, 89, 97, 98^a, 111 y 112, que incluyen un total de 192 parcelas. En la Figura 3 se muestra la clasificación de los edificios según su destino, que se resumen en: viviendas (27%), locales comerciales (71%), edificios públicos (36%); hoteles (6%); bancos (9%); teatros (1%); Estacionamientos vehiculares (16%). No se incluye en este estudio la manzana que contiene a la Iglesia Catedral.

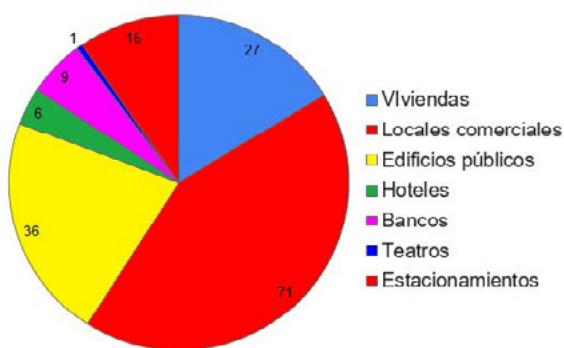


Fig. 3. Clasificación de edificios según su destino o uso.

1.1 Metodología aplicada

En la figura 4 se presenta un resumen de la metodología de trabajo realizada. El estudio comprende tres etapas: a) Evaluación de los datos obtenidos; b) Aplicación del Método Italiano y c) Resultados: obtención de los mapas. Toda la información se incluye en un sistema georreferenciado (GIS), lo que permite un acceso rápido a la misma. La primera etapa se llevó a cabo a partir del relevamiento de documentación técnica aprobada, la inspección ocular y la información aerofotogramétrica.

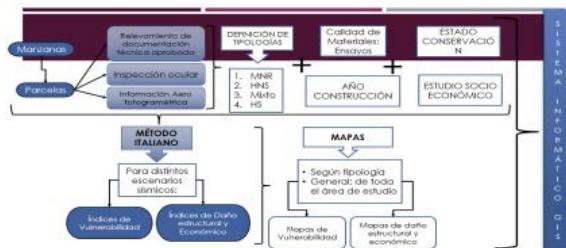


Fig. 4. Resumen de la metodología de trabajo. a) Evaluación de datos; b) Aplicación del Método Italiano; c) Resultados.

1.2 Recopilación y digitalización de la documentación técnica

A fin de basar el estudio de vulnerabilidad en documentación probada y fehaciente, se realizó un estudio de recopilación y digitalización de documentación gráfica que tienen validez legal y técnicas emitidos por autoridades competentes. Esta documentación consistió en: Planos aprobados por la Municipalidad de la Ciudad de Salta: Planos de Arquitectura, Estructura y/o Relevamientos; Dirección General de Inmuebles: Planos de mensuras y/o Subdivisiones en PH; base de datos del COPAIPA: Planos de estructuras. Esta tarea insumió mucho tiempo, por tratarse de organismos oficiales y documentación de cierta antigüedad como ocurrió en algunos planos que databan de los años 1932 aproximadamente. En la Tabla 3 se presenta un resumen del relevamiento realizado, se puede observar que un 63% de las 192 parcelas de la zona de estudio tienen algún tipo de documenta-

ción gráfica aprobada por organismos oficiales lo cual es un buen referente para basar este estudio.

Con esta información, se pudo clasificar las construcciones que, según el criterio fijado en este trabajo, se consideran construidas con o sin normativa sismorresistentes. En Tabla 3 se muestra que aproximadamente un 68% del total de parcelas estudiadas son consideradas construcciones no sismorresistentes. El criterio fijado de común acuerdo entre los miembros del proyecto se basó en que las construcciones ejecutadas antes del año 1980 se consideraron como construcciones no sismorresistentes. Los autores del proyecto acordaron tomar como referencia el año 1980, ya que a partir de ese año se pone en vigencia la Ley N° 5.556 de Verificación de Normas Sismorresistentes en la Provincia de Salta, por la cual todas las construcciones públicas o privadas, se exige que cuenten con estructuras sismorresistentes de acuerdo a las normas establecidas por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica y se faculta al COPAIPA a través de la figura del Revisor de Normas Sismorresistentes verificar su cumplimiento.

Tabla 3: Resumen de parcelas con y sin documentación técnica aprobada

Manz.	Cantidad Parcelas por manzana	Parcelas con Doc. Técnica aprobada	% Parcelas con Doc. Técnica aprobada	Año de construcción			TOTAL	
				Antes 1980	Sin Doc. Técnica	Cantidad Construcciones No Sismorresistente (antes 1980)		
84	26	14	54%	10	12	22	4	26
85	16	12	75%	6	4	10	6	16
86	27	16	59%	10	7	17	10	27
88	29	19	66%	9	10	19	10	29
89	11	8	73%	3	3	6	5	11
97	16	8	50%	3	7	10	6	16
98A	16	8	50%	6	8	14	2	16
111	28	21	75%	13	7	20	8	28
112	23	15	65%	9	4	13	10	23
	192	121	63%	69	62	131	61	192
			36%	32%	68%		32%	100%

En la Figura 5 se muestra la clasificación de las construcciones según su año de construcción. Se observa que aproximadamente un 36% fueron construidas entre los años 1920 y 1970. Posteriormente se evidencia un importante crecimiento en las construcciones entre los años 1970 y 1980 del orden de un 32%, mientras que aproximadamente un 18% fueron construidas entre 1980 y 2005 y un 14% restante representan las construcciones posteriores al año 2005. En nuestro país, coexisten tres generaciones de reglamentos. La primera generación corresponde a las [11] CONCAR 70 (1972) y [12] NA 80 (1981), en las cuales las estructuras se diseñaban para resistir fuerzas sísmicas, pero sin criterios de ductilidad y con un detallado insuficiente. Luego en una segunda generación [13] INPRES CIRSOC 103 – Vs. 1983-1991 se incorporan los conceptos de ductilidad, factores de reducción de respuesta y exigencia de armado

transversal en zonas críticas. Finalmente, a partir de la versión INPRES CIRSOC Vs. 2005 se incorpora el diseño por capacidad basado en mecanismos plásticos dúctiles adecuados y se fijan criterios detallados de regularidad estructural de los edificios.

1.3 Relevamiento aerofotogramétrico

A fin de corroborar los datos obtenidos con los planos aprobados de organismos oficiales, se realizó un relevamiento utilizando drones que permitieron obtener un modelo digital de superficie georreferenciado con puntos de control terrestres y fotografías aéreas con precisión de 2cm/pixel. Esto permitió corregir y adecuar los parámetros (superficies, alturas referenciadas al nivel del mar, cotas de veredas entre otros) necesarios para la determinación del índice de vulnerabilidad. La figura 6 muestra un resumen de la metodología aplicada y resultados obtenidos.

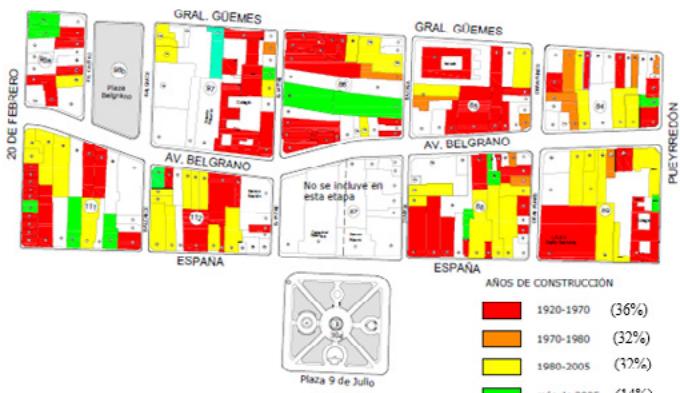


Fig. 5. Clasificación por el año de construcción.

1.4 Tipologías constructivas

Con la información obtenida de los planos aprobados, el relevamiento aerofotogramétrico e inspecciones visuales, se determinaron las cuatro tipologías a estudiar que se muestran en la figura 6 y se describen a continuación:

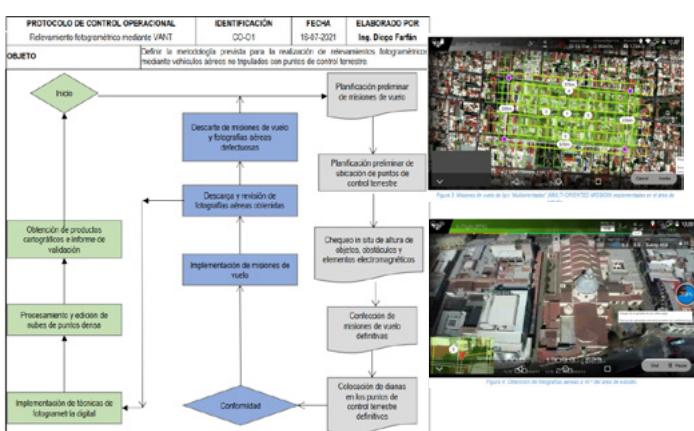


Fig. 6. Relevamiento aerofotogramétrico.

a. Mampostería No Reforzada (MNR) o no Sismorresistente: constituyen un 43 % del total de edificios estudiados. Es la típica construcción de los años 1950 a 1970, consiste en edificios de 1 a 2 niveles (ocasionalmente 3 niveles, ver figura 9), cuyo sistema estructural principal está constituido por muros portantes paralelos, generalmente medianeros arriostrados por muros transversales, diseñados a cargas verticales y sobre los cuales apoya una losa nervurada de hormigón armado generalmente armada en una dirección. En general los muros principales son de ladrillo macizo de espesores de 20 - 30 cm, pero también se presentan muros de piedra y combinaciones, aunque son el menor de los casos. En la figura 7 se muestra una planta típica y un corte de la losa nervurada, las mismas constan en la parte inferior de nervios espaciados entre 40 cm a 50 cm armados por dos barras de acero liso (recién hacia los 1980 se cambian por acero corrugado), con aliviamiento de bloques de cerámica y capa superior de compresión de aproximadamente 5 cm de espesor. La cubierta del segundo nivel puede también ser losa nervurada unidireccional o bien una estructura de madera (tirantes con apoyo de tejas cerámicas) o metálica (chapas).

- b. Hormigón No Sismorresistente (HNS): constituyen aproximadamente un 10 % del total de edificios estudiados. Estas construcciones fueron reemplazando a las MNR hacia los 1980, consisten en edificios bajos de 1 a 3 niveles, cuyo sistema resistente principal son pórticos de hormigón armado rellenos de mampostería, diseñados a cargas verticales, sobre los cuales apoyan losas macizas o nervurada de hormigón armado.
- c. Hormigón Sismorresistentes (HS): constituyen aproximadamente un 8% del total de edificios estudiados. Son construcciones posteriores a 1980, proyectadas respetando normativa sismorresistente de la época.



Fig. 7. Tipologías constructivas.

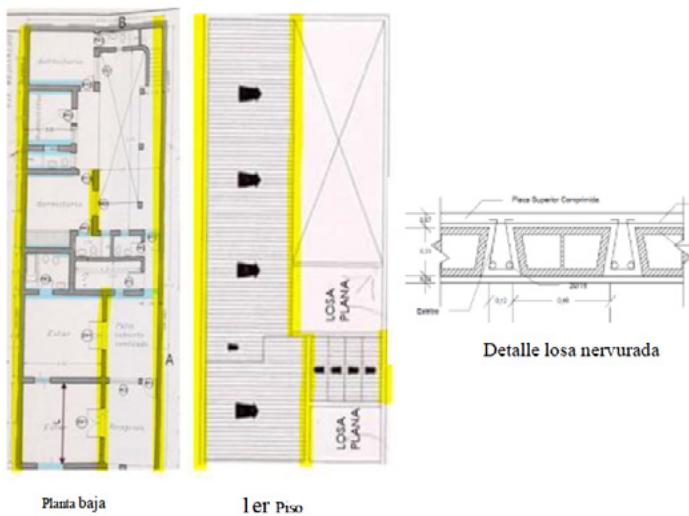


Fig. 8. Tipología constructiva: Mampostería No Reforzada (MNR).

d. Edificios mixtos: constituyen aproximadamente un 7 % del total de edificios estudiados. Son construcciones que combinan los sistemas descriptos anteriormente. Se puede mencionar, por ejemplo, edificios de un nivel constituido por un sistema resistente basados en muros portantes diseñados a cargas verticales con cubiertas livianas de madera y/o metálicas con pórticos de hormigón armado. Los pórticos de hormigón armado en algunos casos constituyen ampliaciones que se encuentran conectadas parcialmente al sistema resistente original. Las estructuras metálicas que se observaron corresponden a playas de estacionamientos y/o locales comerciales y en general presentan estructura principal de hormigón armado con cubierta metálica y chapas.

En la Figura 9 se muestra en 3D la clasificación de edificios por número de pisos.

El Método Italiano se adapta muy bien a las tipologías descriptas ya que las mismas tienen similitudes a las tipologías en las cuales se desarrolló el méto-

do. Además, las curvas de vulnerabilidad propuestas por [5] Barbat et al., se a adecuan también a los edificios estudiados.

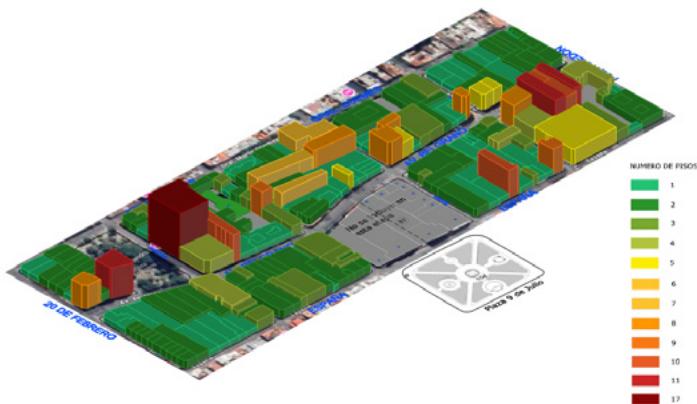


Fig. 9. Clasificación de edificios por número de pisos.

1.5 Materiales

El segundo parámetro que evalúa el Iv se refiere específicamente a la calidad de los materiales utilizados. En el caso de la tipología de Muros No Reforzados (MNR) según el tipo de material utilizado, homogeneidad y forma de los mampuestos asigna desde la mejor calidad A: Ladrillos de buena calidad, bloques de buena calidad, unidades homogéneas y de tamaños constantes con buen ligamento entre las unidades a la peor calidad D: de piedra con unidades irregulares y sin trabazón o mampostería de ladrillo de mala calidad sin ligamento en todo el panel.

En casos puntuales que se pudo acceder por tratarse de edificios públicos, como el caso de la Escuela Urquiza) se tomaron muestras de mampuestos que luego fueron ensayados a flexión y compresión en laboratorio de materiales, esto permitió calibrar las curvas que relacionan el número de golpes con la resistencia superficial en un ensayo con Martillo de Schmidt. En la Figura 10 se muestra la metodología aplicada.

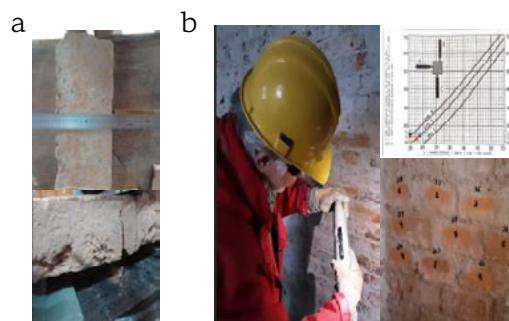


Fig. 10. Ensayo a flexión y compresión de mampuesto; b) Ensayo con martillo Schimdt

1.6 Elementos no estructurales

El método permite considerar la presencia de cornisas, parapetos, balcones, cielorrasos livianos que no están debidamente sujetados a la estructura principal o a un elemento resistente. Este parámetro castiga con una alta vulnerabilidad cuanto más pesado es el elemento y carece de conexión adecuada. En la Figura 11 se muestran algunos ejemplos.



Fig. 11. Elementos no estructurales: cornisas, parapetos, balcones.

1.7 Población. Nivel socio económico. Coste económico

El análisis del riesgo sísmico es una tarea multidisciplinaria que, además del daño físico directo, abarca otros aspectos tales como la población, su nivel socio económico y sobre las características y el valor de la construcción. En esta primera etapa se evalúo el nivel socioeconómico de la población, lo que nos permitirá en etapas futuras, evaluar la capacidad económica para mejorar las condiciones actuales de vulnerabilidad (antes del evento) y la capacidad de respuesta ante un evento de estas características (resiliencia post evento). Por otro lado, el coste económico es fundamental para conocer el impacto financiero de la crisis y su repercusión en la desaceleración del desarrollo y en las tasas de crecimiento de la comunidad.

En la investigación social es de vital importancia la clasificación de la población según su capacidad de consumo o poder adquisitivo. El Índice de Nivel Socioeconómico (INSE; [14] AMAI, 2018; [15] Benza, G & Kessler, G, 2020) es una herramienta utilizada en varios países, especialmente en América Latina, para clasificar a los hogares según su nivel socioeconómico, considerando variables como ingresos, educación, ocupación y condiciones de vivienda. El Instituto Nacional de Estadística y Censos de Argentina ([16] INDEC, 2023) aplica clasificaciones socioeconómicas basadas en variables similares (ingresos, educación, condiciones de vivienda y ocupación) en sus encuestas como la Encuesta Permanente de Hogares (EPH).

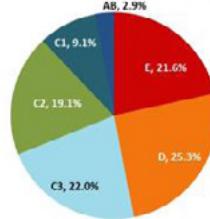
Se realizó una encuesta a los residentes de viviendas en la ciudad de Salta, se propuso un muestreo por conglomerados estratificado con un tamaño de muestra de 243 casos efectivos, con un error esta-

dístico menor al 5% con una confiabilidad del 95% de acuerdo con la distribución Binomial aproximada a la normal. En la Figura 12a) se muestra la composición socioeconómica (INSE) desagregado de la zona estudiada, obtenida a través de un cuestionario diseñado para estimar el INSE. Para ello se entrevistó a algún miembro de la vivienda y se consultó sobre las características de la familia, vivienda y actividades del jefe de familia. De acuerdo con las respuestas se calculó un puntaje cuya suma está normalizada entre 0 y 100 denominado INSE. Según los resultados obtenidos, el 21,6% presenta un nivel socioeconómico (NSE) Bajo Inferior (Segmento E), 25,3% Bajo (Segmento D), en conjunto suman un total de NSE bajo (Segmento DE) de 46,9% Figura 12b). Se considera clase Alta a la unión de los segmentos AB y C1 que son clases de mayor INSE, C1 se considera clase media superior y sus hábitos, comportamientos, deseos suelen coincidir con los de AB que son los considerados en la cumbre del NSE denominados clase alta. Juntos conforman el NSE denominado ABC1 y se estima en 12% (ver la Figura 12 b). La clase media típica es de 19,1% (Segmento C2) y clase media inferior es de 22% (Segmento C3), juntos conforman lo que se denomina clase media y se estima en 41,1% (Figura 12b).

En las figuras 13 a) y b) se muestran el nivel educativo alcanzado por el principal sostenedor del hogar y la cobertura asistencial de salud de la familia.

Además, se incluyó en la encuesta consultas sobre las características de la vivienda, tales como tipo cubierta, cantidad de baños, si cuenta con planos aprobados. En la Figura 14a) se muestra que un 21,7% respondió que su vivienda tiene techo de chapa, en la Figura 14b) se observa que un 62,7% presenta un solo baño y que un 27,8% tiene dos baños y en la Figura 14c) se observa que aproximadamente un 62,2% respondió que si cuenta con planos aprobados lo cual es congruente con el relevamiento de documentación técnica que se realizó en los organismos correspondientes.

a



b

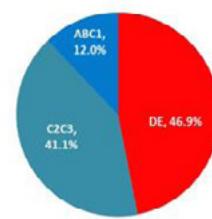


Fig. 12. a) Nivel Socioeconómico desagregado (INSE); b) Nivel Socioeconómico segmentado: bajo (DE), intermedio (C2C3) y alto (ABC1)

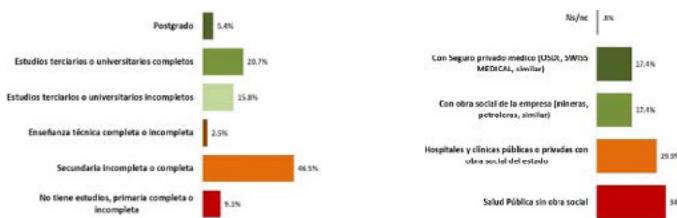


Fig. 13. a) Máximo nivel educativo alcanzado por el sostenedor del hogar. b) Instituciones de asistencia de salud del grupo familiar.

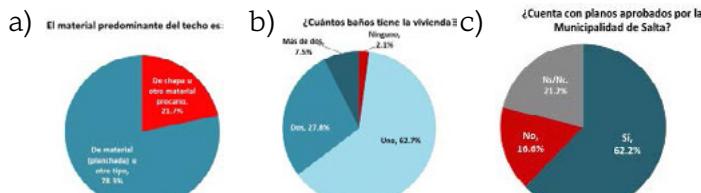


Fig. 14. Resultados de las encuestas realizadas: a) Material de la cubierta; b) Cantidad de baños; c) documentación técnica.

La evaluación del coste socio económico producto de una catástrofe sísmica es compleja, ya que no sólo involucra la estimación del coste de reparación o reconstrucción de los edificios e infraestructuras dañadas, sino también de otros aspectos, tales como: tipología estructural; recuperación de funcionamiento de empresas e instituciones financieras; daño funcional; incremento en los precios de materiales y mano de obra consecuencia de una alta demanda en un entorno de baja capacidad; variación de tasas financieras; presión especulativa y restablecimiento de las tasas de crecimiento económico anteriores a la crisis, entre otros, lo que hace variar notablemente las previsiones del impacto económico post sismo. Además, la recuperación es un proceso de larga duración que suele durar años, complicando aún más este tipo de evaluaciones de costos ya que inciden variables macroeconómicas. En este trabajo se decidió hacer un estudio previo del nivel socioeconómico y dejar para la siguiente etapa el análisis detallado para obtener un índice de daño económico global para cada una de las tipologías consideradas, evaluar el posible número de víctimas y personas sin hogar utilizando un modelo probabilístico adecuado.

2. RESULTADOS OBTENIDOS

2.1 Mapas de vulnerabilidad

En la Figura 15 se muestra el mapa de Vulnerabilidad (índice de vulnerabilidad Iv) obtenido aplicando el método Italiano para las cuatro tipologías estudiadas: Mampostería no reforzada (MNR); Hormigón No Sismorresistente (HNS); Hormigón Sismorresistente (HS) y Estructuras Mixtas. Se hace notar que en esta primera etapa sólo se incluyó las parcelas de las cuales se disponía de documentación técnica

respaldatoria, en etapas posteriores se extenderá el estudio al resto de las edificaciones.

INDICE DE VULNERABILIDAD



Fig. 15. Mapa de vulnerabilidad del casco histórico de Salta.

El índice de vulnerabilidad determinado por este método no es el daño propiamente dicho, que como se mencionó anteriormente, es un índice que califica la capacidad y características estructurales y no estructurales del edificio. La principal aplicación es que permite una evaluación rápida de los edificios de la zona estudiada y por lo tanto definir las prioridades de intervención en cada caso. Los resultados obtenidos permiten identificar los edificios críticos con vulnerabilidad sísmica alta ($I_v > 55\%$) que requieren un refuerzo estructural a fin de disminuir su nivel de vulnerabilidad. En las Figura 16, 17, 18 y 19 se muestran los porcentajes de vulnerabilidad detallados por tipología, mientras que en la Figura 20 se muestra un resumen de todas las tipologías. En el caso de los edificios de Mampostería No Reforzada (Fig. 16) se observa que un 9,3% de dichos edificios tienen una vulnerabilidad mayor al 55%, en tanto que para la tipología Edificios No Sismorresistente (Fig. 17) los casos críticos representan un 22% de dicha tipología, para el caso de los edificios de Hormigón Sismorresistente, como era de esperarse, ningún edificio supera la vulnerabilidad del 55% y finalmente los edificios Mixtos presentan 22,2% de casos críticos. Si se consideran todas las tipologías un 10,61% de edificios presentan un I_v mayor a 55% aplicando el Método Italiano.

Mampostería No Resistente

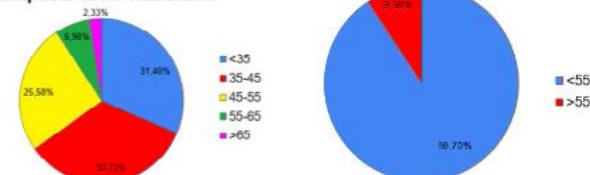


Fig. 16. Porcentajes de vulnerabilidad por tipología: Mampostería No Reforzada (MNR).

Hormigón No Sismorresistente

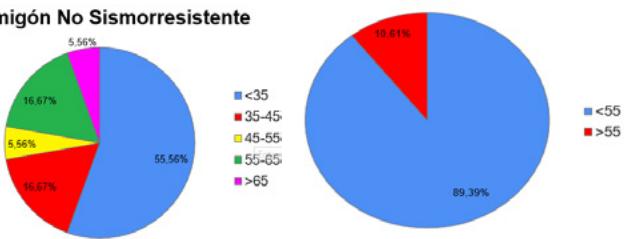


Fig. 17. Personajes de vulnerabilidad y tipología. Hormigón no Sismorresistente. (HNR)

Hormigón Sismorresistente

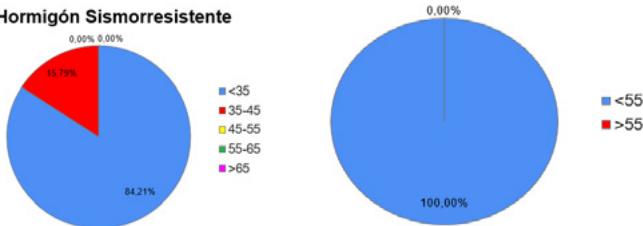


Fig. 18. Personajes de vulnerabilidad y tipología. Hormigón Sismorresistente. (HNR).

MIXTO

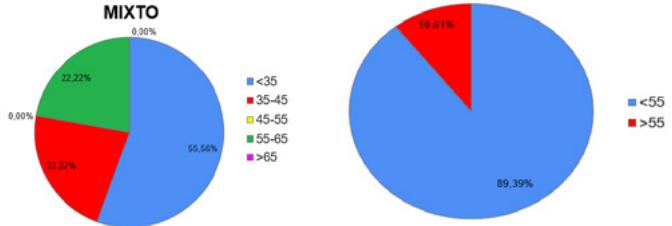


Fig. 19. Porcentajes de vulnerabilidad por tipología: Mixto.

TOTALES

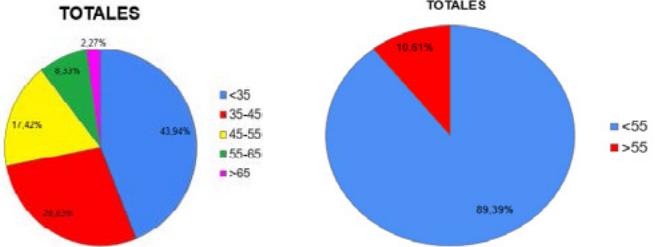


Fig. 20. Porcentajes de vulnerabilidad incluidas todas las tipologías.

Además, estos mapas resultan claves para futuras acciones de prevención y reducción del riesgo sísmico a cargo de las autoridades de Defensa Civil de la Provincia de Salta. Existen ejemplos en otros países como Italia ([17] Ministerio delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2018; [18] Dolce, M & Manfredi, G, 2020; [19] Galasso, C, et al., 2021), cuyo gobierno instrumentaron medidas de incentivo fiscal para promover la rehabilitación y el reforzamiento sísmico de edificios existentes, especialmente aquellos con alta vulnerabilidad sísmica. Estas medidas fomentan la prevención incentivando la realización de obras de reforzamiento antisísmico en edificios antiguos, reduce el impacto humano y económico minimizando

los daños a las personas y propiedades en eventos futuros. En estos casos, se requiere la presentación de un informe técnico que certifique la vulnerabilidad inicial y la mejora obtenida, en tal sentido, este mapa puede ser un punto de partida inicial para luego con estudios más específicos en cada caso y bajo la supervisión de un profesional especialista interviniente, permitirá determinar el proyecto estructural adecuado de refuerzo y/o reconstrucción con criterios sismorresistentes.

2.2 Mapas de daño

Utilizando las funciones de vulnerabilidad descritas previamente se determinó el índice de daño probable para tres escenarios de sismos: Intensidad VI, VII y VIII del sistema MSK. En las Figuras 21 a 23 se muestran los mapas de daños obtenidos para las diferentes tipologías considerando los escenarios de daño mencionados de Intensidad VI, VII y VIII (MSK) respectivamente.

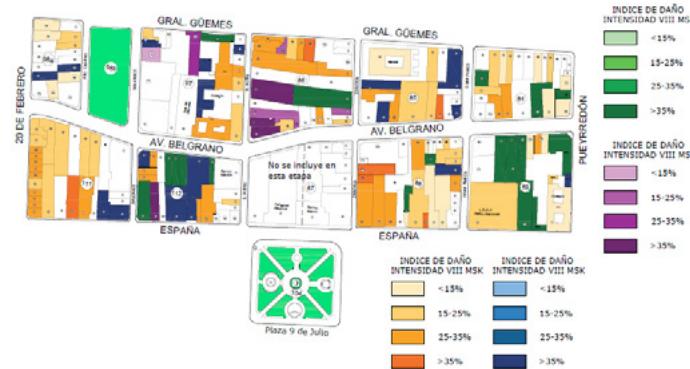


Fig. 21. Índice de Daño - Escenario Intensidad VI MSK.

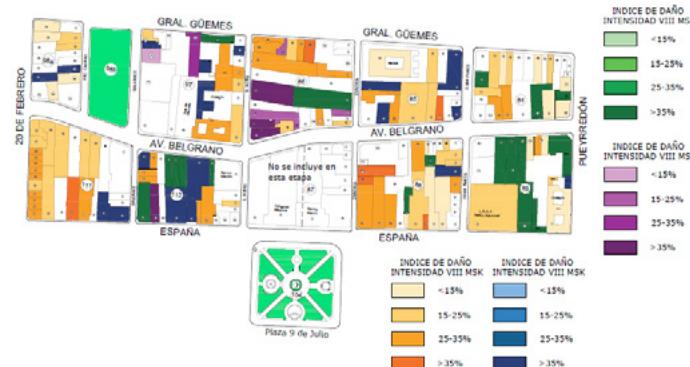


Fig. 22. Índice de Daño - Escenario Intensidad VII MSK.

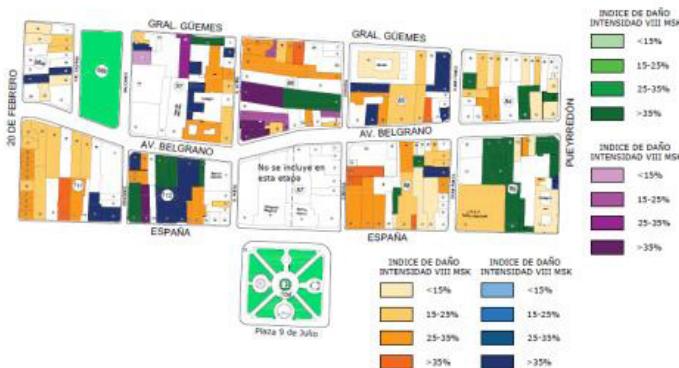
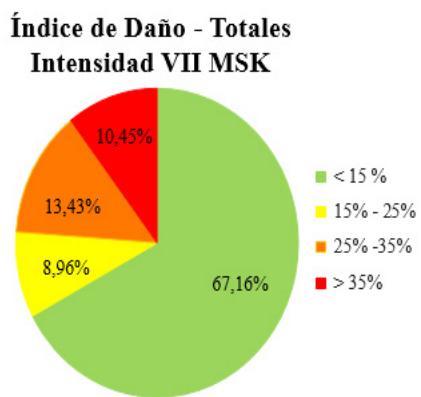
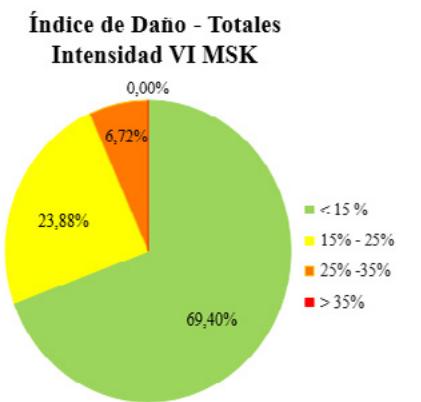


Fig. 23. Índice de daño – Escenario Intensidad VIII MSK.

Finalmente, en la Figura 24 se presentan los porcentajes de edificios con índices de daño: menor a 15%, entre 15% y 25%, entre 25% y 35% y mayor a 35%. Se puede observar que, según este método, para un sismo de Escala VI (Moderado) el daño esperado es menor de un 35%, mientras que para un sismo de Escala VII (Fuerte) un 10,45% de edificios superan un índice de daño del 35% y para un escenario de Escala VIII (Muy Fuerte) se obtuvieron un 35,82% de edificios críticos que superan el 35%.



Índice de Daño - Totales

Intensidad VIII MSK

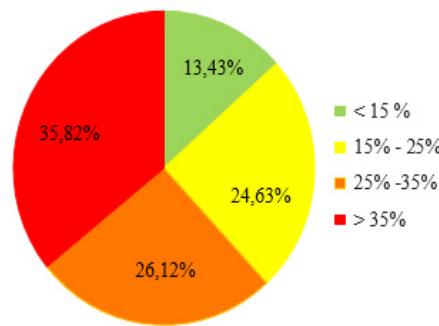


Fig. 24. Porcentajes de edificios con Índices de daño segmentados.

III. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la primera etapa de un estudio de vulnerabilidad sísmica del microcentro del casco histórico de la ciudad de Salta, Argentina. El objetivo propuesto por el grupo interdisciplinario de investigadores, profesionales y alumnos becarios colaboradores fue el de establecer una metodología de trabajo para luego replicar en el macrocentro y finalmente en toda la ciudad de Salta.

Como resultado, se obtuvieron mapas de índices de vulnerabilidad y escenarios de daños estimados que constituyen un primer paso para un Sistema de Gestión de Riesgo que permitirá a las autoridades municipales y provinciales tomar decisiones preventivas de protección civil y activar los servicios de emergencias y mitigación correspondientes.

El método Italiano aplicado resultó ser práctico, eficaz y adaptable a las tipologías de la ciudad de Salta. Presenta la ventaja que considera tanto parámetros tanto estructurales como no estructurales, así como el estado de conservación del edificio. Es aplicable a estudios a nivel urbano, se integra con sistema de información georreferenciada y combina simplicidad y precisión, lo que lo hace recomendable para zonas urbanas y con patrimonio histórico. Además, presenta la ventaja que se puede modificar los factores de peso de cada uno de los once parámetros de manera de considerar efectos locales o modificadores regionales.

La metodología de trabajo aplicada resultó ser adecuada. La etapa de recolección de datos, digitalización de documentación técnica aprobada, ensayos en laboratorio, relevamiento aerofotogramétrico y estudio socioeconómico de la zona permitieron obtener todos los datos necesarios para aplicar el método. Con esta información se determinó que casi un 70%

de las construcciones no contaban con diseño sismorresistente adecuado, considerando como referencia el año 1980, año en el cual se exige por Ley Provincial la obligatoriedad de presentar proyecto sismorresistente tanto para edificios públicos o privados.

Las tipologías identificadas resultan muy similares a las tipologías que constituyen la base del método aplicado. Se determinó que un 43% del total de edificios corresponden a construcciones de 2 o 3 niveles de mampostería no reforzada con muros diseñados a cargas verticales sobre los cuales descargan losas nervuradas típicas de los años 1950 a 1970. También se incluyen las tipologías de hormigón no sismorresistente, así como los sistemas mixtos.

El estudio socio económico permitió identificar el índice de nivel socioeconómico de la zona. Se determinó que un 46,9% de la muestra estudiada presenta un nivel socioeconómico bajo, mientras un 41,1% un nivel medio y un 12% un nivel alto. El estudio se completó con el nivel educativo, asistencia de salud del grupo familiar y algunas características de la vivienda. En etapas posteriores se presentará el índice de daño económico para las tipologías consideradas.

Se obtuvo un mapa de vulnerabilidad para cada una de las tipologías consideradas. Se identificaron los edificios críticos con vulnerabilidad sísmica mayor de 55% y que requieren un refuerzo estructural. Se determinó que un 9,3% de los edificios de mampostería no reforzada (MNR) presenta una vulnerabilidad superior al 55%, frente a un 22,22% de edificios de Hormigón No Sismorresistentes (HNS) y Mixtos que superan dicha vulnerabilidad crítica. En tanto que un 84,21% de los edificios de Hormigón Sismorresistente (HS) tienen una vulnerabilidad menor a 35%.

Se han obtenidos mapas de Índices de daño para tres escenarios sísmicos de intensidad VI, VII Y VIII del sistema MSK, para cada una de las tipologías estudiadas. Del análisis de los índices de daño de todos los edificios, surge que para un sismo de escala moderada (Intensidad VI MSK) el daño esperado no supera el 35%, en tanto que para un escenario de sismo Fuerte (Intensidad VII MSK) un 10,45 de los edificios supera un índice de daño del 35% y finalmente para un escenario de sismo muy fuerte (Intensidad VIII MSK) un 35,82 % de los edificios supera el 35% de daño.

Finalmente, se hace hincapié que este estudio de vulnerabilidad y escenarios de daños estimados constituyen un primer paso para un Sistema de

Gestión de Riesgo Sísmico que permitirá a las autoridades locales tomar decisiones preventivas de protección civil y activar los servicios de emergencias y mitigación del riesgo sísmico.

IV. AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a todos los investigadores, profesionales y alumnos que participaron en el presente proyecto: Ing. Marianela Ibarra y Dr. Lucas Burgos de la Facultad de Ingeniería de la UNSa, Ing. José Luis García Revisor de Normas Sismorresistentes del COPAIPA, Mag. Virgilio Nuñez de la Facultad de Cs. Naturales - UNSa, Dr. Jorge Augusto Paz de la Facultad de Cs. Económicas, Jurídicas y Sociales - UNSa, y especialmente a los alumnos de grado: Gabriela Suyo, Florencia Leguizamón, Juan José Ampuero, Candelaria Rivero, Fabián Saiquita, Mariela Cayampi, Daniel Kevin Cari y Luis Barrios de la Facultad de Ingeniería - UNSa y Gastón Amarilla de la Facultad de Cs. Naturales - UNSa.

V. REFERENCIAS

- [1] INPRES CIRSOC 103. *Reglamento Argentino de Estructuras Resistentes a Sismos – Parte 1: Construcciones en General*. Instituto Nacional de Prevención Sísmica Argentina, Resolución SA 423/2019.
- [2] Consejo Profesional de Agrimensores, Ingenieros y Profesiones afines de Salta (COPAIPA). Ley N° 5.556 – Verificación de Normas Sismorresistentes, Salta, 1980.
- [3] Zarzosa, M. N. L. *Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona*. Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona (Spain). 215 pp., 1996.
- [4] Benedetti, D. y Petrini, V. "Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: proposte di un metodo di valutazione". L'Industria delle Costruzioni 149: pp. 66-78, 1984.
- [5] Barbat, A. H., Yépez, F. y Canas, J. A. "Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones". Earthquake spectra, 12 (3): pp. 371-394, 1996.
- [6] Yépez, F. *Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación*. Tesis docto-

- ral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona (Spain). 215 pp., 1996.
- [7] Pujades, L. G., Canas, J. A., Mena, U., Espinoza, F., Alfaro, A.J. y Caselles, O. *Seismic risk evaluation in Barcelona, Spain*. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Paper N° 2810, 2000.
- [8] Mena, U. *Evaluación del Riesgo Sísmico en zonas urbanas*. Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona (Spain). 215 pp., 2002.
- [9] Castillo, A. *Seismic risk scenarios for buildings in Mérida, Venezuela. Detailed vulnerability assessment for non-engineered housing*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. 348 pp., 2005.
- [10] Angeletti, P., Bellina, A., Guaganti, E., Moretti, A y Petrini V. *Comparison between vulnerability assessment and damage index*. Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, 181-186, 1988.
- [11] *Normas Antisísmicas - CONCAR 70*. Instituto Nacional de Prevención Sísmica, Argentina, 1972.
- [12] *Normas Antisísmicas Argentinas (NA 80)*. Instituto Nacional de Prevención Sísmica, Argentina, 1981.
- [13] *Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes - Parte 1: Construcciones en General. INPRES-CIRSOC 103*. Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) - Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), San Juan, Argentina, 1981; 1991.
- [14] AMAI. *Nivel Socioeconómico AMAI 2018*: Nota Metodológica. México, 2018.
- [15] Benza, G & Kessler, G. *La estratificación social en tiempos de cambio: un análisis de la estructura social argentina*. Revista SAAP (Sociedad Argentina de Análisis Político), 2020.
- [16] INDEC Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de Argentina. *Metodología de la EPH*. Disponible en <https://www.indec.gob.ar>. La Estratificación socioeconómica en la EPH se realiza mediante criterios de ingresos per cápita familiar y condiciones habitacionales, 2023.
- [17] Ministerio delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT). *Norme tecniche per la costruzione (NTC 2018)*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2018.
- [18] Dolce, M., & Manfredi, G. *Seismic risk reduction policies in Italy: The Sismabonus incentive system*. Earthquake Spectra, 36 (3), 1395-1416. 2020.
- [19] Galasso, C, et al. *Tax incentives for seismic retrofit: Evidence from Italy*. International Journal of Disaster Risk Reduction, 55, 102098. 2020.

