

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
DOCTORADO EN CIENCIAS



"FRAGILIDAD SÍSMICA EN EDIFICIOS DE CONCRETO
REFORZADO USANDO MEDIDAS DE INTENSIDAD VECTORIAL
BASADAS EN LA FORMA ESPECTRAL"

Realizado por:

M. en C. Noel Zavala Gutiérrez

Ensenada, Baja California

Octubre de 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

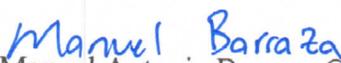
**Fragilidad sísmica en edificios de concreto reforzado usando
medidas de intensidad vectorial basadas en la forma espectral**

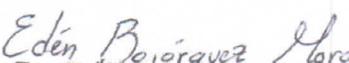
TESIS

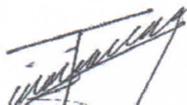
Que para obtener el grado de Doctorado en Ciencias presenta:

Noel Zavala Gutiérrez

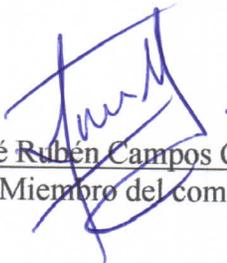
Aprobada por:


Dr. Manuel Antonio Barraza Guerrero
Director de tesis


Dr. Edén Bojórquez Mora
Miembro del comité


Dr. Juan Bojórquez Mora
Miembro del comité


Dra. Almendra Villela y Mendoza
Miembro del comité


Dr. José Rubén Campos Gaytán
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Octubre 2023.

RESUMEN

Resumen de la tesis de Noel Zavala Gutiérrez, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS con especialidad en ESTRUCTURAS, del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada Baja California México, Septiembre de 2023.

“FRAGILIDAD SÍSMICA EN EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO USANDO MEDIDAS DE INTENSIDAD VECTORIAL BASADAS EN LA FORMA ESPECTRAL”

Resumen Aprobado por:

Manuel Barraza

Dr. Manuel Antonio Barraza Guerrero
Director de Tesis

Edén Bojórquez Mora

Dr. Edén Bojórquez Mora
Co-director de Tesis

En el área de la ingeniería sísmica se busca estimar de la manera más precisa la respuesta estructural de un edificio o construcción ante un sismo. Para esto se han implementado a lo largo de la historia diferentes medidas de intensidad (parámetros que describen el potencial destructivo de un movimiento sísmico) que permitan cuantificar el daño en tales estructuras con la mayor certidumbre posible al momento de evaluar la vulnerabilidad sísmica. En fechas recientes, las medidas de intensidad vectorial han demostrado mejores resultados con respecto a las medidas de intensidad escalares tradicionales cuando se analizan estructuras con comportamiento no lineal o dominadas por los modos superiores, pero existe incertidumbre sobre si estas medidas

de reciente creación son capaces de permitir análisis de fragilidad sísmica considerando parámetros de forma espectral. En el presente trabajo se proponen distintas medidas de intensidad sísmica vectorial basadas en la forma espectral para realizar análisis de fragilidad sísmica en edificios de concreto reforzado. Para ello se analizan cuatro modelos estructurales que se someten a treinta registros sísmicos de banda angosta, para evaluar la relación de las medidas de intensidad propuestas con los parámetros de demanda sísmica de distorsión máxima de entrepiso y energía histerética. Con los registros sísmicos seleccionados se realizan análisis dinámicos incrementales de los edificios con el objetivo de medir la eficiencia para determinar la capacidad de cada medida de intensidad sísmica para predecir la respuesta estructural. Finalmente se evalúa la probabilidad de falla (fragilidad sísmica) usando regresión logística multinomial para mostrar aquellas medidas de intensidad sísmica vectorial con una mejor relación para predecir la falla. Los resultados obtenidos muestran que las medidas de intensidad que mejor describen la respuesta estructural en términos estadísticos han sido aquellas basadas en el parámetro de forma espectral N_p y éstas han sido utilizadas para realizar la evaluación de la fragilidad sísmica, la cual indica que los edificios analizados muestran una mejor relación respecto a la probabilidad de falla usando medidas de intensidad vectorial basadas en la forma espectral sobre las medidas de intensidad tradicionales. Esta información resulta de gran interés para los códigos vigentes de construcción por su enfoque ligado a parámetros de demanda sísmica y una medida de intensidad sísmica apropiada.

Palabras Clave: medidas de intensidad vectoriales, forma espectral, respuesta estructural, desempeño sísmico, probabilidad de falla, superficies de fragilidad.

ABSTRACT

Abstract of the thesis by Noel Zavala Gutiérrez, presented as a partial requirement for obtaining the DOCTOR IN SCIENCES degree with a specialty in STRUCTURES, from the Master's and Doctorate program in Science and Engineering (MYDCI) of the UABC. Ensenada Baja California México, September, 2023.

“SEISMIC FRAGILITY IN REINFORCED CONCRETE BUILDINGS USING VECTOR-VALUED SEISMIC INTENSITY MEASURES BASED ON THE SPECTRAL SHAPE”.

Abstract approved by:

Manuel Barraza

Dr. Manuel Antonio Barraza Guerrero

Thesis Director

Edén Bojórquez Mora

Dr. Edén Bojórquez Mora

Thesis Co-director

In the area of seismic engineering, the aim is to estimate in the most precise way the structural response of a building or construction. For this purpose, different intensity measures (parameters that describe the destructive potential of a seismic ground motion) have been implemented throughout history to quantify the damage to such structures with the greatest possible certainty when assessing seismic vulnerability. In recent times, vector intensity measures have shown better results than traditional scalar intensity measurements when analyzing structures with non-linear behavior or dominated by higher modes, but there is uncertainty as to whether these newly created measures are capable of allow analysis of seismic fragility considering parameters of spectral shape. In the present work, different vector-valued seismic intensity measures based on the spectral shape are proposed to carry out seismic fragility analyzes in

reinforced concrete buildings. To this end, four structural models are analyzed that are subjected to thirty narrow-band seismic records, to evaluate the relationship of the intensity measurements proposed with the seismic demand parameters of maximum interstory drift and hysteretic energy. With the selected seismic records, incremental dynamic analyzes of the buildings are carried out with the objective of measuring the efficiency to determine the capacity of each seismic intensity measure to predict the structural response. Finally, the probability of failure (seismic fragility) is evaluated using multinomial logistic regression to show those vector-valued seismic intensity measures better related to predict the failure. The results obtained show that the intensity measures that best describe the structural response in statistical terms have been those based on the spectral shape parameter N_p and these have been used to carry out the evaluation of seismic fragility, which indicates that the buildings analyzed show a better relation regarding the probability of failure using vector-valued intensity measures based on the spectral shape over traditional intensity measures. This information is of great interest for current building codes due to its approach linked to seismic demand parameters and an appropriate seismic intensity measure.

Keywords: vector-valued intensity measures, spectral shape, structural response, seismic performance, probability of failure, fragility surface.

DEDICATORIAS

A dios, por permitirme estar en esta vida y
disfrutar de las emociones que conlleva.

A mis padres, por educarme según su leal saber
y entender, me han hecho la persona
que soy hoy en día.

A mis hermanos, por motivarme a
superarme en todo momento.

A mi novia, por ser el soporte que se
requería durante esta etapa.

A mis compañeros, por estar motivando a
avanzar en el programa.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada. El apoyo financiero y la confianza depositada en mí me permitieron llegar a la conclusión de mi posgrado.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por permitirme cursar mis estudios de posgrado en tan prestigiosa institución.

A mi director y co-director de tesis, Dr. Manuel Antonio Barraza Guerrero, y Dr. Edén Bojórquez Mora respectivamente, por el apoyo con su conocimiento en la línea de investigación que me permitió llevar a cabo este trabajo y estar siempre presente para despejar mis dudas.

A mis colaboradores, por haber aceptado formar parte de este equipo, en especial a los miembros de mi sínodo, Dra. Almendra Villela y Mendoza, Dr. Juan Bojórquez Mora, Dr. José Rubén Campos Gaytán, y al Dr. José Ignacio Torres Peñuelas, sé que sin su apoyo no hubiera sido posible la pronta culminación de mis estudios.

A los miembros del programa MYDCI por ser motivo de inspiración en la realización de mi trabajo y permitirme ver los distintos enfoques de investigación para aprender nuevas perspectivas de la ciencia, mención especial al M.I. Daniel Aldama Cervantes con quien logré convivir mayor tiempo en mi estadía en el programa de doctorado, se aprecian las horas dedicadas durante esta etapa.

CONTENIDO

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
DEDICATORIAS.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
CONTENIDO.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	5
1.3 JUSTIFICACIÓN	5
1.4 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	8
1.4.1 <i>Hipótesis</i>	8
1.4.2 <i>Objetivo general</i>	8
1.4.3 <i>Objetivos particulares</i>	8
2. ANTECEDENTES	9
2.1 ESTUDIOS PREVIOS EN EL MUNDO.....	9
2.2 ESTUDIOS PREVIOS EN EL PAÍS.....	19
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	21
3.1 CONCEPTOS BÁSICOS.....	21
3.2 MEDIDAS DE INTENSIDAD (MI).....	26
3.2.1 <i>MI basadas en respuesta máxima</i>	26
3.2.2 <i>MI basadas en duración</i>	31
3.2.3 <i>MI basadas en la forma espectral</i>	32
3.3 ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL.....	36
3.4 PARÁMETROS DE DEMANDA SÍSMICA	36

3.4.1	<i>Distorsión máxima de entrepiso (DME)</i>	37
3.4.2	<i>Energía histerética</i>	37
3.4.3	<i>Índice de daño Park y Ang (PyA)</i>	38
3.5	FRAGILIDAD SÍSMICA	39
3.5.1	<i>Curvas de fragilidad</i>	39
3.5.2	<i>Superficies de fragilidad</i>	40
4.	METODOLOGÍA.....	42
4.1	ADQUISICIÓN DE DATOS.....	43
4.1.1	<i>Medidas de intensidad</i>	43
4.1.2	<i>Modelos estructurales</i>	45
4.1.3	<i>Registros sísmicos</i>	47
4.1.4	<i>Parámetros de demanda sísmica</i>	48
4.2	ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL.....	48
4.3	DESEMPEÑO SÍSMICO	51
4.4	ESTIMACIÓN DE FRAGILIDAD SÍSMICA	52
5.	RESULTADOS NUMÉRICOS.....	55
5.1	DESEMPEÑO SÍSMICO	55
5.2	CURVAS DE FRAGILIDAD	62
5.3	SUPERFICIES DE FRAGILIDAD	70
6.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	77
6.1	DE LAS MEDIDAS DE INTENSIDAD SÍSMICA	77
6.2	DE LOS EDIFICIOS Y REGISTROS SÍSMICOS	79
6.3	DEL DESEMPEÑO SÍSMICO	81
6.4	DE LA FRAGILIDAD SÍSMICA.....	84
6.5	DIFERENCIAS ENTRE USAR DIFERENTES MIS, PDS Y/O ECR.	86
7.	CONCLUSIONES	92
	REFERENCIAS.....	95

APÉNDICE 1. ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL CONSIDERANDO LA ENERGÍA HISTERÉTICA COMO PARÁMETRO DE DEMANDA SÍSMICA EN LOS CUATROS MARCOS DE CONCRETO REFORZADO. ...	104
APÉNDICE 2. CURVAS DE FRAGILIDAD SÍSMICA.....	108
APÉNDICE 3. SUPERFICIES DE FRAGILIDAD SÍSMICA.....	144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Algunos de los estudios previos recientes catalogados por resultados positivos, parciales y negativos referentes la ingeniería sísmica.	18
Tabla 3-1 Clasificación del índice de daño Park y Ang (Kalateh-Ahani y Amiri, 2021).	39
Tabla 4-1 Medidas de intensidad sísmica utilizadas como segunda componente de la MISV	43
Tabla 4-2 Conjunto de MISV utilizadas	44
Tabla 4-3 Características principales de los marcos estructurales analizados.....	45
Tabla 4-4 Sismos seleccionados para tomar como referencia.....	47
Tabla 6-1 Conjunto de MISV utilizadas durante este estudio	78
Tabla 6-2 Diferencia entre usar las distintas MISV en comparación con el PDS.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Evolución de las medidas de intensidad a lo largo de los años.....	1
---	---

Figura 2.1 Principales países donde se ha desarrollado investigación sobre ingeniería sísmica y desempeño estructural en los últimos diez años.....	18
Figura 3.1 Espectro de respuesta en términos de aceleración para distintos factores de amortiguamiento (Crisafulli y Villafañe, 2002).	26
Figura 3.2 Historia de tiempo con el valor máximo de aceleración del suelo.	27
Figura 3.3 Historia de tiempo con el valor máximo de velocidad del suelo.	27
Figura 3.4 Ejemplo de espectro de respuesta de desplazamiento (Chopra, 2014).	30
Figura 3.5 Espectro de respuesta que representa el parámetro de forma espectral $R_{T1,T2}$ (Torres, 2018).	32
Figura 3.6 Ejemplo de los ciclos histeréticos de un marco de concreto reforzado (Chopra, 2014). 37	
Figura 4.1 Pasos resumidos de metodología utilizada.	42
Figura 4.2 Modelos estructurales utilizados en el análisis para edificios con a) 4, b) 7, c) 10 y d) 15 niveles. Acotaciones en metros.	46
Figura 4.3 Diagrama de flujo para hacer un ADI, usando como ejemplo el marco 15N.	50
Figura 4.4 ADI para edificio de acero sujeto a sismos de banda angosta en términos de a) S_a y b) I_{Np} (Bojórquez <i>et al.</i> , 2017b).....	51
Figura 4.5 Regresión logística simple (izquierda) para $N_{p_{Sa}}$ con S_a fija y multinomial (derecha) para la MISV $\langle S_a, N_{p_{Sa}} \rangle$	53
Figura 4.6 Diagrama de flujo para calcular curvas/superficies de fragilidad.	54
Figura 5.1 Análisis dinámico incremental con la DME como PDS para el marco 4N sometido a los registros sísmicos escalados para a) S_a , b) V , c) E_i/m , d) I_{Np} y e) I_B	58
Figura 5.2 Análisis dinámico incremental con la DME como PDS para el marco 7N sometido a los registros sísmicos escalados para a) S_a , b) V , c) E_i/m , d) I_{Np} y e) I_B	59

Figura 5.3 Análisis dinámico incremental con la DME como PDS para el marco 10N sometido a los registros sísmicos escalados para a) Sa, b) V, c) E_i/m , d) I_{Np} y e) I_B .	60
Figura 5.4 Análisis dinámico incremental con la DME como PDS para el marco 15N sometido a los registros sísmicos escalados para a) Sa, b) V, c) E_i/m , d) I_{Np} y e) I_B .	61
Figura 5.5 Curvas de fragilidad del ECR 4N con la DME y Sa= 1g como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.	66
Figura 5.6 Curvas de fragilidad del ECR 7N con la DME y Sa= 1g como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.	67
Figura 5.7 Curvas de fragilidad del ECR 10N con la DME y Sa= 1g como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.	68
Figura 5.8 Curvas de fragilidad del ECR 15N con la DME y Sa= 1g como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.	69
Figura 5.9 Superficies de fragilidad del marco 4N con Sa como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para la DME como PDS.	73
Figura 5.10 Superficies de fragilidad del marco 7N con Sa como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para la DME como PDS.	74
Figura 5.11 Superficies de fragilidad del marco 10N con Sa como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para la DME como PDS.	75
Figura 5.12 Superficies de fragilidad del marco 15N con Sa como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para la DME como PDS.	76
Figura 6.1 ADI para marcos a) 4N, b) 7N, c) 10N y d) 15N con Sa(T_1) como MIS y la DME como PDS.	82

Figura 6.2 ADI para marcos a) 4N, b) 7N, c) 10N y d) 15N con $S_a(T_1)$ como MIS y la E_H como PDS..	83
Figura 6.3 Comparativa de la probabilidad de falla usando la DME como PDS en el marco de 7 niveles para las 4 MISV basadas en la forma espectral con a) S_a y b) I_{Np} como primera componente del vector.	88
Figura 6.4. Comparativa de la probabilidad de falla usando a) DME y b) E_H como PDS en el marco de 15 niveles para las 4 MISV basadas en la forma espectral con I_{Np} como primera componente del vector.	89
Figura 6.5 Comparativa de la probabilidad de falla usando la E_H como PDS en el marco de a) 4 y b) 10 niveles para las 4 MISV basadas en la forma espectral con I_B como primera componente del vector.	90
Figura A. 1 Análisis dinámico incremental con E_H como PDS para el marco 4N sometido a los registros sísmicos escalados para a) S_a , b) V , c) E_i/m , d) I_{Np} y e) I_B	104
Figura A. 2 Análisis dinámico incremental con E_H como PDS para el marco 7N sometido a los registros sísmicos escalados para a) S_a , b) V , c) E_i/m , d) I_{Np} y e) I_B	105
Figura A. 3 Análisis dinámico incremental con E_H como PDS para el marco 10N sometido a los registros sísmicos escalados para a) S_a , b) V , c) E_i/m , d) I_{Np} y e) I_B	106
Figura A. 4 Análisis dinámico incremental con E_H como PDS para el marco 15N sometido a los registros sísmicos escalados para a) S_a , b) V , c) E_i/m , d) I_{Np} y e) I_B	107
Figura A. 5 Curvas de fragilidad del ECR 4N con E_H y $S_a= 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.	108
Figura A. 6 Curvas de fragilidad del ECR 7N con E_H y $S_a= 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.	109
Figura A. 7 Curvas de fragilidad del ECR 10N con E_H y $S_a= 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.....	110

Figura A. 8 Curvas de fragilidad del ECR 15N con E_H y $S_a = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.....	111
Figura A. 9 Curvas de fragilidad del ECR 4N con DME y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.	112
Figura A. 10 Curvas de fragilidad del ECR 4N con E_H y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.	113
Figura A. 11 Curvas de fragilidad del ECR 7N con DME y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.	114
Figura A. 12 Curvas de fragilidad del ECR 7N con E_H y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.	115
Figura A. 13 Curvas de fragilidad del ECR 10N con DME y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.	116
Figura A. 14 Curvas de fragilidad del ECR 10N con E_H y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.	117
Figura A. 15 Curvas de fragilidad del ECR 15N con DME y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.	118
Figura A. 16 Curvas de fragilidad del ECR 15N con E_H y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.	119
Figura A. 17 Curvas de fragilidad del ECR 4N con DME y $E_I = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.	120
Figura A. 18 Curvas de fragilidad del ECR 4N con E_H y $E_I = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.....	121
Figura A. 19 Curvas de fragilidad del ECR 7N con DME y $E_I = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{S_a}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{S_V}}$ y h) $N_{p_{E_I}}$ como segunda.	122

Figura A. 20 Curvas de fragilidad del ECR 7N con E_H y $E_I = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.....	123
Figura A. 21 Curvas de fragilidad del ECR 10N con DME y $E_I = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.	124
Figura A. 22 Curvas de fragilidad del ECR 10N con E_H y $E_I = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.....	125
Figura A. 23 Curvas de fragilidad del ECR 15N con DME y $E_I = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.	126
Figura A. 24 Curvas de fragilidad del ECR 15N con E_H y $E_I = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.....	127
Figura A. 25 Curvas de fragilidad del ECR 4N con DME e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.	128
Figura A. 26 Curvas de fragilidad del ECR 4N con E_H e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.....	129
Figura A. 27 Curvas de fragilidad del ECR 7N con DME e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.	130
Figura A. 28 Curvas de fragilidad del ECR 7N con E_H e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.....	131
Figura A. 29 Curvas de fragilidad del ECR 10N con DME e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.	132
Figura A. 30 Curvas de fragilidad del ECR 10N con E_H e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.....	133
Figura A. 31 Curvas de fragilidad del ECR 15N con DME e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.	134

Figura A. 32 Curvas de fragilidad del ECR 15N con E_H e $I_{np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.....	135
Figura A. 33 Curvas de fragilidad del ECR 4N con DME e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.....	136
Figura A. 34 Curvas de fragilidad del ECR 4N con E_H e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.....	137
Figura A. 35 Curvas de fragilidad del ECR 7N con DME e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.....	138
Figura A. 36 Curvas de fragilidad del ECR 7N con E_H e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.....	139
Figura A. 37 Curvas de fragilidad del ECR 10N con DME e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.	140
Figura A. 38 Curvas de fragilidad del ECR 10N con E_H e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.....	141
Figura A. 39 Curvas de fragilidad del ECR 15N con DME e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.	142
Figura A. 40 Curvas de fragilidad del ECR 15N con E_H e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.....	143
Figura A. 41 Superficies de fragilidad del marco 4N con S_a como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para E_H como PDS. ...	144
Figura A. 42 Superficies de fragilidad del marco 7N con S_a (T_1) como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para E_H como PDS..	145

Figura A. 43 Superficies de fragilidad del marco 10N con Sa (T_1) como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS. 146

Figura A. 44 Superficies de fragilidad del marco 15N con Sa (T_1) como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS. 147

Figura A. 45 Superficies de fragilidad del marco 4N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS. ... 148

Figura A. 46 Superficies de fragilidad del marco 4N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS. 149

Figura A. 47 Superficies de fragilidad del marco 7N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS. ... 150

Figura A. 48 Superficies de fragilidad del marco 7N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS. 151

Figura A. 49 Superficies de fragilidad del marco 10N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS. 152

Figura A. 50 Superficies de fragilidad del marco 10N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS. ... 153

Figura A. 51 Superficies de fragilidad del marco 15N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS. 154

Figura A. 52 Superficies de fragilidad del marco 15N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS. ... 155

Figura A. 53 Superficies de fragilidad del marco 4N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS. 156

Figura A. 54 Superficies de fragilidad del marco 4N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para E_H como PDS.. 157

Figura A. 55 Superficies de fragilidad del marco 7N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para DME como PDS.
..... 158

Figura A. 56 Superficies de fragilidad del marco 7N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para E_H como PDS.. 159

Figura A. 57 Superficies de fragilidad del marco 10N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para DME como PDS.
..... 160

Figura A. 58 Superficies de fragilidad del marco 10N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para E_H como PDS.. 161

Figura A. 59 Superficies de fragilidad del marco 15N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para DME como PDS.
..... 162

Figura A. 60 Superficies de fragilidad del marco 15N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para E_H como PDS.. 163

Figura A. 61 Superficies de fragilidad del marco 4N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para DME como PDS. 164

Figura A. 62 Superficies de fragilidad del marco 4N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para E_H como PDS. ... 165

Figura A. 63 Superficies de fragilidad del marco 7N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para DME como PDS. 166

Figura A. 64 Superficies de fragilidad del marco 7N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para E_H como PDS. ... 167

Figura A. 65 Superficies de fragilidad del marco 10N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS. 168

Figura A. 66 Superficies de fragilidad del marco 10N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS.. 169

Figura A. 67 Superficies de fragilidad del marco 15N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS. 170

Figura A. 68 Superficies de fragilidad del marco 15N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS.. 171

Figura A. 69 Superficies de fragilidad del marco 4N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS. 172

Figura A. 70 Superficies de fragilidad del marco 4N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS. ... 173

Figura A. 71 Superficies de fragilidad del marco 7N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS. 174

Figura A. 72 Superficies de fragilidad del marco 7N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS. ... 175

Figura A. 73 Superficies de fragilidad del marco 10N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS. 176

Figura A. 74 Superficies de fragilidad del marco 10N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS. ... 177

Figura A. 75 Superficies de fragilidad del marco 15N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS. 178

Figura A. 76 Superficies de fragilidad del marco 15N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{sv}}$ y h) $N_{p_{ei}}$ como segunda para E_H como PDS. ... 179

GLOSARIO

ADI	Análisis Dinámico Incremental
AMS	Aceleración Máxima del Suelo
DME	Distorsión Máxima de Entrepiso
ECR	Edificios de Concreto Reforzado
E_H	Energía Histerética
MIS	Medida de Intensidad Sísmica
MISV	Medida de Intensidad Sísmica Vectorial
PDS	Parámetro de Demanda Sísmica
PF	Probabilidad de Falla
PyA	Park y Ang
RCDMX	Reglamento de la Ciudad de México
RLM	Regresión Logística Multinomial
RLS	Regresión Logística Simple
VMS	Velocidad Máxima del Suelo

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno sísmico ha sido ampliamente estudiado desde principios del siglo XX, y hoy en día se comprende más de este tipo de eventos pero sin poder aún predecirlos. Por lo anterior, las estructuras siguen siendo afectadas de manera aleatoria y, en algunas zonas, de manera frecuente por los terremotos. Por esto, a lo largo de la historia se han establecido diferentes medidas de intensidad sísmica (MIS) (Arias, 1970; Fajfar *et al.*, 1990; Housner, 1975), que predijeran la respuesta estructural de edificaciones, con cierto grado de confiabilidad basadas en modelos numéricos o cuantitativos y no tanto en sistemas cualitativos como aquellas basadas en apreciación u observación de daños utilizados durante el siglo XIV. Es así como las MIS han ido evolucionando a lo largo de las décadas pasando de MIS cualitativas a cuantitativas escalares y finalmente a vectoriales (Figura 1.1).

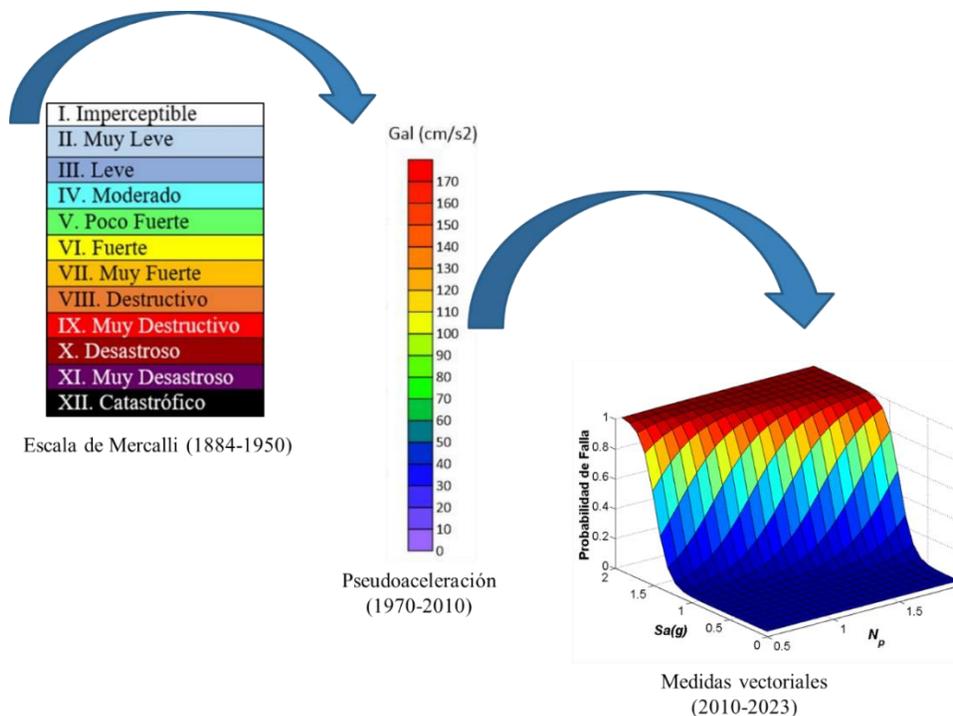


Figura 1.1 Evolución de las medidas de intensidad a lo largo de los años.

Las medidas de intensidad son uno de los parámetros cruciales para definir peligro, fragilidad y riesgo sísmico. Se han propuesto distintas medidas de intensidad a lo largo de la historia (Arias, 1970; Baker y Cornell, 2005; Bojórquez y Iervolino, 2011; Donaire-Ávila *et al.*, 2015; Housner, 1975; Liu *et al.*, 2019) en aras de tener una mayor certidumbre en la estimación de la respuesta estructural para el número de edificios que se construyeron, y que se pretenden seguir construyendo, a lo largo y ancho del mundo.

En fechas recientes, se ha optado por profundizar más en el comportamiento dinámico de estructuras no lineales que sobre los sistemas elástico-lineales típicos dada su alta complejidad de análisis y carga computacional. La interacción suelo-estructura se encarga de determinar cómo afectan las propiedades del suelo al movimiento de la estructura y viceversa, esta interacción juega a favor del diseño sísmico cuando se toma en consideración al momento de planificar una construcción del tipo civil, debido a que convierte a la estructura en un sistema más flexible, aumenta el periodo natural de vibración y optimiza su amortiguamiento crítico (Anand y Satish Kumar, 2018). Algunos códigos de construcción te permiten la opción de ignorar esta interacción o de reducir las fuerzas consideradas que llegan a la base, pero ha quedado documentado que esto lleva a subestimar las demandas estructurales derivando en resultados desastrosos. Por esto se han realizado diversos estudios considerando la interacción suelo-estructura, sobre todo para aquellas construcciones con comportamientos no lineales. La problemática se presenta debido que las medidas de intensidad tradicionales son ineficientes cuando se analizan este tipo de estructuras, debido a que la evidencia actual muestra una carencia para evaluar estas estructuras con medidas de intensidad sísmica más sofisticadas. Por esta razón, diversos autores (Arias, 1970; Baker y Cornell, 2005; Bojórquez y Iervolino, 2011; Housner, 1975) han planteado la alternativa de seleccionar medidas de intensidad que disminuyan los inconvenientes

de tratar con estructuras complejas al momento de evaluar su respuesta estructural ante los efectos sísmicos.

1.1 Planteamiento del problema

Hoy en día, el daño generado por sismos a las edificaciones sigue siendo constante pese a la amplia literatura que se tiene respecto a modelos que intentan predecir el comportamiento dinámico de las estructuras. Desde luego se han logrado grandes avances a lo largo de la historia y actualmente es menos frecuente que se presenten colapsos de edificios a causa de actividad sísmica. No obstante, dada la gama amplia de características que presenta este fenómeno, resulta utópico el tener un modelo universal que calcule de manera eficiente la respuesta estructural ante cada escenario sísmico posible. Por esta razón se han elaborado medidas de intensidad sísmica que permitan estimar el comportamiento de una estructura pero con limitantes en el tipo de sistema (rígido o flexible), tipo de análisis (elástico o inelástico) o respecto al tipo de terreno (suelo blando o roca). Entonces resulta insuficiente evaluar el comportamiento de un edificio considerando solo un parámetro (Riddell, 2007).

Por lo anterior surgió el interés de asociar la respuesta de una estructura con un nivel de intensidad para poder reducir las incertidumbres que se tenían en el comportamiento dinámico de las estructuras. A pesar de tener este tipo de medidas, se siguen teniendo limitaciones para predecir el comportamiento de una estructura, dado que la mayoría de las medidas de intensidad están ligadas a un solo parámetro para determinar la respuesta de una edificación, *e.g* pseudo-aceleración, considerando solo comportamientos lineales de la estructura u omitiendo el efecto de los modos superiores de la misma. Este es precisamente uno de los inconvenientes para los ingenieros estructurales al disponer de manuales o códigos de construcción que basan su fundamentación teórica en las medidas de intensidad

tradicionales, lo que resulta en incertidumbres asociadas a la vulnerabilidad sísmica al momento de utilizarlas.

En la literatura se han propuesto distintos enfoques a lo largo de los años para la evaluación del grado de daño que puede sufrir una estructura según su ubicación geográfica ante la ocurrencia de un evento sísmico (vulnerabilidad sísmica), pero en general se pueden categorizar en cuatro aspectos: 1. Funciones de fragilidad empíricas obtenidas de análisis estadísticos a partir de registros sísmicos; 2. Funciones de apreciación que están basadas en la opinión de expertos; 3. Funciones de fragilidad teóricas, las cuales proveen los resultados más confiables al considerar registros sísmicos disponibles y la respuesta no lineal de estructuras, aunque requieren de una gran carga computacional para obtenerlas; 4. Funciones de fragilidad híbridas resultantes de combinar los enfoques anteriores (Zain *et al.*, 2019).

En las últimas dos décadas, se ha investigado el uso de medidas de intensidad vectoriales para estimar la respuesta de una estructura (Arias, 1970; Baker y Cornell, 2005; Bojórquez y Iervolino, 2011; Donaire-Ávila *et al.*, 2015; Housner, 1975; Liu *et al.*, 2019). El uso de estas medidas ha mejorado la estimación de la respuesta estructural y resulta ventajoso al reducir la dependencia de otros parámetros correspondiente al movimiento sísmico, permitiendo garantizar un mejor desempeño al realizar este tipo de evaluaciones.

No obstante, existe incertidumbre respecto a la confiabilidad sísmica que puede obtenerse al analizar estas medidas vectoriales para estudios de fragilidad sísmica. Considerando que el objetivo de usar medidas de intensidad es obtener el conjunto de parámetros que mejor describa la respuesta estructural, resulta necesario aplicar este tipo de medidas para relacionarlo con la evaluación de la probabilidad de falla (fragilidad sísmica), análisis de peligro sísmico y confiabilidad sísmica estructural. Esto daría un panorama más amplio sobre la pertinencia de usar una medida de intensidad u otra (Bojórquez *et al.*, 2012).

1.2 Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles medidas de intensidad (sean tradicionales o de forma espectral) cumplen con los términos estadísticos de eficiencia para evaluar la respuesta estructural?
2. ¿Existen otros parámetros de demanda sísmica además de la distorsión máxima de entrepiso (usada comúnmente) que permitan hacer un análisis de fragilidad sísmica?
3. ¿Es relevante evaluar la fragilidad sísmica de edificios de concreto reforzado utilizando medidas de intensidad vectorial y otros parámetros de demanda sísmica, comparado con los métodos tradicionales?

1.3 Justificación

Contar con una evaluación de la fragilidad sísmica para los edificios de concreto reforzado resulta imperativa dada la demanda constante de infraestructura a nivel mundial. Este tipo de edificios sigue siendo implementado para su uso comercial, industrial y habitacional. En la actualidad, uno de los criterios más demandantes en cuanto a dimensionamiento es precisamente el diseño por sismo, por lo que el tener una caracterización apropiada de este tipo de estructuras ayudará en la optimización de elementos estructurales, traducándose en beneficios económicos y de funcionalidad.

La mayoría de los reglamentos de construcción a nivel mundial utilizan a la aceleración espectral en el periodo fundamental de la estructura, $S_a(T_1)$, como

medida de intensidad, sin embargo, varios estudios han mostrado serias limitaciones de este parámetro debido a que no representa apropiadamente el efecto inelástico (Baker y Cornell, 2005; Cordova *et al.*, 2001). Además, dado los antecedentes que se tienen de otros investigadores que sugieren el uso de medidas de intensidad sísmica vectoriales considerando parámetros de forma espectral (Bojórquez y Iervolino, 2011; Lucchini *et al.*, 2011). Por lo anterior, es lógico fijar como objetivo principal encontrar una medida de intensidad que represente de la mejor manera este parámetro para tener una mayor precisión al estimar la respuesta sísmica de estructuras. Esto la convierte en una herramienta importante para reducir el número de registros sísmicos empleados en análisis no lineales de edificaciones, y con ello de evitar los criterios rigurosos para la selección de registros sísmicos.

Es importante mencionar que debido a la aplicación de medidas de intensidad sísmica vectoriales, será posible evaluar la probabilidad de falla que permita conocer el tipo de intensidad que se adecúa apropiadamente al sujeto de estudio mediante la estimación de superficies de fragilidad, obteniendo la respuesta estructural sometida a condiciones sísmicas. Estas superficies son de gran utilidad para evaluar el nivel de daño alcanzado en estructuras posterior a un sismo. Al día de hoy se usan para múltiples objetivos en la ingeniería civil (*e.g.* estimación de pérdidas, evaluación de riesgo de colapso, revisión de diseño estructural, entre otras). Además pueden ser aplicadas a diferentes tipos de estructuras (*e.g.* edificios irregulares, túneles subterráneos, muelles, turbinas de viento, estructuras de mampostería, por nombrar solo algunas). De esta manera, se vuelven un elemento muy conveniente para evaluar estructuras (Mai *et al.*, 2017).

Los resultados de este trabajo serán evaluados trabajando de manera conjunta, es decir, estarán compuestos por la interacción de varios parámetros individuales como la distorsión máxima de entrepiso, energía histerética o índice de daño, para formar medidas de intensidad sísmica (MIS) que estimen la respuesta estructural

hasta determinar el vector que mejor se adecúa al sistema con base en el nivel de eficiencia.

Finalmente, esto servirá para analizar si los niveles de intensidad sísmica actualmente usados en la vasta literatura son apropiados o no para los casos donde no se cumplan las condiciones de uso de sistemas rígidos y elásticos. Este análisis generará un impacto positivo directo en la ingeniería civil y estructural, así como de manera indirecta en la sociedad en general, dado que el tema de infraestructura es un área de interés común a nivel mundial. La finalidad es encontrar la medida de intensidad que estime con mayor certidumbre, o menor dispersión en los resultados, la respuesta estructural y que de ser posible tenga una fácil aplicación teórica-práctica, o al menos la mejor relación entre estos dos criterios conocida como desempeño sísmico (Lucchini *et al.*, 2011).

En otras palabras, el factor clave en una medida de intensidad sísmica vectorial (MISV) es determinar la mejor combinación de parámetros para estimar la probabilidad de falla, o fragilidad sísmica, con la menor incertidumbre para reducir las limitaciones de las MIS tradicionales (Bojórquez y Iervolino, 2011; Bojórquez *et al.*, 2012). Es precisamente esta necesidad que motiva la presente investigación. Para esto, se ha optado por realizar la evaluación de la probabilidad de falla considerando medidas de intensidad vectoriales que ya no solo consideran un único parámetro como lo hacen las tradicionales, en cambio, consideran al menos dos parámetros que están estrechamente relacionados con los parámetros de demanda sísmica para poder demostrar la ineficacia entre usar un enfoque u otro.

Finalmente, queda abierta la posibilidad de realizar ahora los análisis de fragilidad sísmica planteando un nuevo conjunto de medidas vectoriales basadas en la forma espectral que se ha demostrado tienen una mejor relación tanto para estructuras complejas con comportamientos no lineales o inelásticos, así como con aquellas dominadas por los modos superiores (Bojórquez *et al.*, 2017b).

1.4 Hipótesis y objetivos

1.4.1 Hipótesis

Con la aplicación de distintos parámetros de demanda sísmica y medidas de intensidad vectorial basadas en la forma espectral, se estimará la fragilidad sísmica existente en edificios de concreto reforzado.

1.4.2 Objetivo general

Desarrollar análisis de fragilidad sísmica aplicados a edificios de concreto reforzado, considerando medidas de intensidad vectorial y parámetros de demanda sísmica basados en la distorsión máxima de entrepiso y energía histerética.

1.4.3 Objetivos particulares

1. Determinar las medidas de intensidad que cumplen con los términos de eficiencia.
2. Identificar los distintos parámetros de demanda sísmica que permiten evaluar la fragilidad en edificios de concreto reforzado.
3. Evaluar los niveles de significancia al utilizar análisis de fragilidad sísmica con base en nuevos parámetros de demanda sísmica y medidas de intensidad vectorial, comparados con métodos tradicionales.

2. ANTECEDENTES

2.1 Estudios previos en el mundo

La medida de intensidad más utilizada a nivel mundial como estimador de la respuesta estructural ha sido la aceleración espectral en el primer modo de vibrar $S_a(T_1)$, sin embargo, a principios del siglo XXI, con la innovación constante en edificios altos y/o configuraciones complejas, los ingenieros estructurales se han percatado que debido al comportamiento en el rango no lineal de tales estructuras, esta medida de intensidad sísmica presenta incertidumbre al momento de cuantificar la respuesta de edificaciones (Baker y Cornell, 2005).

Las medidas de intensidad se pueden clasificar como escalares, es decir, una sola variable o parámetro basado normalmente en respuestas máximas (e.g. aceleración, velocidad, deformación) que relaciona al parámetro de demanda sísmica en un sistema coordinado bidimensional; La otra categoría son las medidas de intensidad vectoriales, que son aquellas que relacionan dos o más variables y que su influencia se puede apreciar en un espacio tridimensional o multidimensional (Zhou *et al.*, 2017). Algunos investigadores han orientado el campo de conocimiento hacia encontrar una medida de intensidad que represente de manera confiable la respuesta estructural de edificios ante demandas sísmicas (Arias, 1970; Fajfar *et al.*, 1990; Housner, 1975). Por lo anterior, se empezaron a desarrollar medidas de intensidad más sofisticadas que consideran dos o más parámetros relacionados con la respuesta estructural (Baker y Allin Cornell, 2006; Baker y Cornell, 2005, 2008; Cordova *et al.*, 2001), por lo que Riddell (2007) estableció un índice de medidas de intensidad basadas tanto en respuestas máximas (e.g. aceleración, velocidad,

deformación) como en respuestas estructurales (energía de entrada, energía histerética, deformación, entre otras) haciendo una correlación entre ellas, concluyendo que ninguna se ajustaba de manera satisfactoria para todo el rango de frecuencia de interés (0.10-10 Hz), dado que algunas lo hacían mejor en ciertas circunstancias mientras que para otras el desempeño se veía reducido.

Tothong y Luco (2007) expresaron la incertidumbre de utilizar ϵ como estimador en la medida de intensidad para obtener la respuesta estructural para el caso donde se tenían registros sísmicos de una fuente cercana, donde la estructura analizada no fuera dominada por su primer modo de vibración (comportamiento inelástico). La medida de intensidad escalar propuesta por ellos, basada en el desplazamiento espectral inelástico, resultó ser eficaz para estimar la respuesta de edificios fuera del rango lineal sometidos a registros de fuente cercana considerando la distorsión máxima de entrepiso como parámetro de demanda sísmica. Por lo anterior, Baker y Cornell (2008) incorporaron un parámetro de forma espectral que permite evaluar la confiabilidad estructural en la respuesta y reduce las limitaciones de las medidas de intensidad en estructuras con comportamiento no lineal edificadas en lugares donde se presentan sismos de fuente cercana (que son caracterizados por la presencia de un pulso de velocidad durante el movimiento que genera una mayor demanda a la estructura).

Por otro lado, dado que todos los estudios estaban limitados a estructuras regulares en dos dimensiones, Lucchini *et al.* (2011) realizó pruebas usando cinco medidas de intensidad aplicadas a un edificio irregular de tres dimensiones con problemas de torsión debido al efecto de registros sísmicos bidireccionales superficiales, analizando su comportamiento en todo el rango de no linealidad. Se concluyó que $S_a(T_1)$ muestra una débil correlación con la distorsión máxima de entrepiso y la distorsión máxima de azotea debido a su inhabilidad de capturar los modos fundamentales a través de las ordenadas espectrales. También se hizo notar que con la incorporación de los modos superiores se mejora la capacidad de

predicción y lo haría todavía mejor si se consideran los cambios en las propiedades dinámicas producidas en el rango no lineal (Lucchini *et al.*, 2011).

Conforme las MIS fueron evolucionando, hubo una tendencia a incorporar nuevos parámetros que mejoraran la predicción de la respuesta estructural en edificios. Por esta razón, en fechas recientes se han propuesto MISV compuestas por dos o más componentes para mejorar la eficiencia de las MIS (Bojórquez *et al.*, 2017b; Bojórquez y Iervolino, 2011; Bojórquez *et al.*, 2012; Donaire-Ávila *et al.*, 2015; Ge y Zhou, 2018; Kiani *et al.*, 2018; Rajabnejad *et al.*, 2021; Torres *et al.*, 2021; Yakhchalian *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2019) la cual consiste en la habilidad de una MIS para estimar la respuesta estructural con la menor incertidumbre.

Bojórquez y Iervolino (2011) implementaron el uso de una medida de intensidad que considera el parámetro de aceleración espectral en el primer modo de vibrar de la estructura y el parámetro N_p , considerando sismos de fuente cercana y de banda angosta. Los resultados mostraron que esta nueva MIS se comportaba de manera confiable en cuanto a eficiencia, suficiencia y robustez al escalamiento, con respecto a otras intensidades que se han usado históricamente.

Dada la gran cantidad de estudios que se tenía respecto a MI, Buratti (2012) hizo una comparación, en cuanto a eficiencia y suficiencia, de las MIS recientes (vectoriales) y de las que se han usado históricamente (escalares), con fines de evaluar su desempeño al aplicar registros sísmicos a sistemas inelásticos de uno y múltiples grados de libertad (SDOF y MDOF, por sus siglas en inglés, respectivamente). Lo anterior demostró algo que se venía estableciendo en estudios previos, que las medidas de intensidad vectoriales son las que mayor confiabilidad tienen para estimar la respuesta estructural.

Debido a los resultados de las investigaciones en la primera década del siglo XXI respecto a medidas de intensidad vectoriales, y sobre todo de aquellas basadas en la forma espectral, surgieron un gran número de estudios (Buratti, 2012; Donaire-Ávila *et al.*, 2015; Ge y Zhou, 2018; Grigoriu, 2016; Kiani *et al.*, 2018; Kiani y Pezeshk, 2017; Mollaioli *et al.*, 2013; Palanci y Senel, 2019; Torres, 2018; Tsantaki *et al.*, 2016; Yakhchalian *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2019) en los cuales revisaban el desempeño sísmico de diferentes medidas de intensidad. De manera general se destaca que algunas medidas son más apropiadas que otras para ciertos casos puntuales, pero que, en general, las medidas de intensidad vectoriales basadas en la forma espectral representan la mejor opción en cuanto a predicción de la respuesta con la menor incertidumbre, sobre todo para aquellas estructuras que se alejan del rango de comportamiento elástico. Durante la última década se ha dedicado a determinar el desempeño sísmico de las MISV (Javadi y Yakhchalian, 2019; Kiani *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2019; Tomeo *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2017). Los resultados de muchos investigadores (Buratti, 2012; Grigoriu, 2016; Kiani y Pezeshk, 2017; Mollaioli *et al.*, 2013; Palanci y Senel, 2019; Torres *et al.*, 2021; Tsantaki *et al.*, 2016) resaltan el uso de MISV más sofisticadas como aquellas basadas en la forma espectral, debido a que tienen la habilidad de predecir más apropiadamente la respuesta estructural, y sobre todo con una menor incertidumbre en edificios que se encuentran en el rango inelástico (Bojórquez y Iervolino, 2011; Lucchini *et al.*, 2011). Por esto, en años recientes se han propuesto MISV basadas en el parámetro espectral N_p (Bojórquez *et al.*, 2015; Bojórquez *et al.*, 2014; Torres *et al.*, 2021).

Es por esto que una buena eficiencia significa una alta relación entre la medida de intensidad y el parámetro de demanda sísmica, lo que se traduce en la posibilidad de reducir el número de registros sísmicos utilizados sin afectar la precisión de la respuesta estructural. En este sentido se han hecho estudios para evaluar la influencia de las medidas de intensidad en la selección de registros (Baker y Lee, 2017; Kiani *et al.*, 2019; Kohrangi *et al.*, 2019), para garantizar una estimación imparcial en la respuesta y el riesgo sísmico sin que altere la relación entre el peligro y la vulnerabilidad.

Se ha reportado en estudios previos que la importancia de S_a se ve reducida cuando el parámetro de demanda sísmica es diferente a la distorsión máxima de entrepiso, comúnmente usada en la literatura. Además, se hace énfasis en considerar los efectos de la duración del movimiento cuando se considera la degradación de la resistencia, rigidez y efectos de segundo orden en la estructura, debido a que se ha demostrado que la duración influye en la respuesta estructural dependiendo de la medida de intensidad seleccionada, y por lo tanto, también lo hará en la probabilidad de falla. Al ignorar los efectos de duración, se obtendrán subestimaciones en la respuesta estructural, por lo menos así se ha documentado para los casos de sismos superficiales, donde sus efectos son debidos a la corta duración del movimiento y la rápida liberación de la energía (Kiani *et al.*, 2019).

Zhou *et al.* (2017) demostraron que lo más apropiado es seleccionar una medida de intensidad según el tipo de estructura que se esté analizando. Por ejemplo, para edificios dominados por el primer modo de vibración, el impacto de la no linealidad puede ser importante y por lo tanto debe ser considerado en la medida de intensidad utilizada. También se notó que para las medidas de intensidad que consideran los modos superiores, resulta más eficiente utilizar medidas de intensidad con valores múltiples de S_a que solamente usando dos valores de aceleración espectral.

Por último, debido a la complejidad en los diferentes tipos de estructuras y que las propiedades de los movimientos del suelo con respecto a la amplitud, frecuencia y duración no pueden ser caracterizadas por una sola medida de intensidad, Liu *et al.* (2019) establecieron una medida de intensidad compuesta de seis diferentes medidas de intensidad escalares denominada IM_{PLS} . El objetivo principal de su estudio no fue buscar la mejor medida de intensidad sino proponer un nuevo enfoque para desarrollar una medida de intensidad para predecir respuestas estructurales bajo los supuestos de los análisis de demanda sísmica probabilística para sistemas de un solo grado de libertad, bajo la premisa de que no tiene por qué utilizarse una sola medida cuando se pueden abarcar un conjunto de estas para minimizar los problemas de dependencia estructural. Los resultados implican que IM_{PLS} es lo suficientemente robusta para predecir la respuesta en edificios con comportamiento histerético no lineal y se considera con suficiente utilidad para los parámetros de demanda sísmica. Esto indica que la suficiencia de esta medida puede ser usada para desacoplar el peligro sísmico y el análisis estructural en la evaluación de la probabilidad de falla o vulnerabilidad. También se resalta la importancia de incluir múltiples medidas de intensidad y de cómo esto reduce los problemas de multicolinealidad en los modelos de regresión multivariable.

Dejando atrás el desempeño sísmico utilizando medidas de intensidad escalares y vectoriales, se ha iniciado un enfoque dirigido hacia la vulnerabilidad sísmica utilizando medidas de intensidad (Dall'Asta *et al.*, 2019; Omar y Mahmoud, 2017). Las curvas de fragilidad, representadas en función de la probabilidad de falla ligada a una medida de intensidad, pueden ser obtenidas a partir de dos o más componentes en el vector de la medida de intensidad (Baker, 2007). Las superficies de fragilidad sísmica están compuestas por un conjunto de curvas de fragilidad sísmica. Estas son usadas para evaluar la vulnerabilidad de estructuras ante sismos, al estimar los niveles de daño alcanzados (Hosseinpour y Abdelnaby, 2017).

No obstante, estas solo usan MIS tradicionales o MISV con $Sa(T_1)$ como la primera componente del vector y N_p basada solamente en $Sa(T_1)$ como segunda componente; además, aplicado solamente a marcos de acero bidimensionales (Bojórquez *et al.*, 2012).

Por lo anterior, algunos autores (Baker, 2007; Bojórquez *et al.*, 2012; Ge y Zhou, 2018) aplicaron este enfoque para realizar estimaciones de pérdidas en edificios de concreto reforzado a causa de sismos usando medidas de intensidad vectoriales donde aquel que se comportaba de manera más eficiente era el caso de Sa con N_p como primer y segundo parámetro del vector respectivamente, dado que la desviación estándar se veía reducida hasta un 40% comparado con otros vectores (Modica y Stafford, 2014). Uno de los retos que se vienen presentado es obtener curvas de fragilidad de manera rápida, con el menor número de análisis y/o con la menor carga computacional posible, sin alterar los resultados finales (Baker, 2015).

Existe un gran número de enfoques para elaborar curvas de fragilidad con distintas suposiciones y restricciones a considerar (Zentner *et al.*, 2017). Se han abordado distintos enfoques como simulaciones con el método de Montecarlo para reducir las incertidumbres asociadas a las demandas sísmicas y probabilidades de colapso (Gokkaya *et al.*, 2016), análisis en la nube basados en modelos de regresión lineal (Jalayer *et al.*, 2017) y estimaciones de densidad de Kernel para calcular la probabilidad condicional de la respuesta estructural para un registro sísmico dado para obtener superficies de fragilidad (Mai *et al.*, 2017). Las ventajas del primero es la reducción del sesgo inducido por el escalamiento de registros a niveles muy elevados con tal de llegar al nivel de intensidad predefinido. De hecho, investigaciones pasadas han demostrado que usar factores de escala superiores a 10 genera resultados sesgados. Por esto se debe tener cuidado cuando se evalúa la vulnerabilidad sísmica ante sismos y/o réplicas (Wen *et al.*, 2017).

La fragilidad sísmica es estimada regularmente con base en medidas de intensidad escalar representada mediante las curvas de fragilidad que describen la relación entre la respuesta estructural y el peligro sísmico (Hosseinpour y Abdelnaby, 2017; Karapetrou *et al.*, 2017; Kassem *et al.*, 2019; Olteanu *et al.*, 2016; Pejovic y Jankovic, 2015; Zain *et al.*, 2019). Sin embargo, si actualmente se cuenta con medidas de intensidad vectoriales, se pueden formar, en lugar de curvas, superficies de fragilidad que estarán ligadas a una respuesta estructural más apropiada. Por ello, Radu y Grigoriu (2018) propusieron un vector caracterizador del movimiento del terreno para realizar el análisis de fragilidad donde se aprecia que las MIS vectoriales tienen un mejor comportamiento que las MIS escalares. Posteriormente, Minas y Galasso (2019), se exploraron el comportamiento de distintas medidas de intensidad, tanto escalares como vectoriales, en los análisis de fragilidad.

Yakhchalian *et al.* (2015) evaluaron la eficiencia de medidas de intensidad vectoriales aplicadas al análisis de colapso en edificios, proponiendo finalmente una nueva medida de intensidad que se adecúa mejor para este tipo de estudios, $S_a(T_1)/DSI$ (intensidad del espectro de desplazamiento), la cual captura el daño de registros sísmicos con periodos largos. Para esto utilizó el enfoque peligro sísmico probabilístico. Los resultados de este estudio probaron que las medidas de intensidad vectoriales basadas en S_a como primer componente nos llevan a una mejor eficiencia, pero la suficiencia aún es un tema a considerar en trabajos futuros; finalmente se traduce en una mayor certidumbre en la probabilidad de falla de estructuras. Al final la medida de intensidad vectorial que mayor eficiencia produjo fue la de la aceleración espectral en el periodo fundamental de la estructura, S_a , como primer componente y la relación de esta con la intensidad del desplazamiento espectral, $S_a(T_1)/DSI$. Este vector reduce la dispersión de los resultados hasta en un 50% si lo comparamos con la medida de intensidad escalar $S_a(T_1)$ por si sola.

Considerando esto, Amiri y Yakhchalian (2020) decidieron aplicar el mismo enfoque pero ahora para estructuras irregulares, aunque bidimensionales, en virtud que la mayoría de los estudios de desempeño sísmico se enfocan a estructuras regulares y que estas pueden tener diferencias significativas si las comparamos con las irregulares, generando incertidumbre en la respuesta estructural. Para lograrlo se consideró la eficiencia y suficiencia de varias medidas (tanto escalares como vectoriales) para predecir la probabilidad de falla en marcos de acero estructural con irregularidad en la masa vertical. Los resultados confirmaron que la mejor medida de intensidad fue aquella basada en el vector $S_a(T_1)/DSI$ para predecir la capacidad de colapso y por lo tanto fue la que mayor confiabilidad produjo al momento de calcular las funciones de fragilidad.

En otras palabras, el factor clave en una MISV es determinar la mejor combinación de parámetros para estimar la probabilidad de falla, o fragilidad sísmica, con la menor incertidumbre para reducir las limitaciones de las MIS tradicionales (Bojórquez y Iervolino, 2011; Bojórquez *et al.*, 2012). Es precisamente esta necesidad la que motivó la presente investigación.

A continuación se hace un breve resumen de las investigaciones llevadas a cabo recientemente (últimos 10 años) en los países más importantes que se encuentran trabajando en el tema de medidas de intensidad sísmica. Esto permite conocer los distintos puntos abordados por los investigadores, dónde se aplican y finalmente si los resultados han sido positivos conforme a los objetivos planteados (ver Tabla 2-1 y Figura 2.1).

Tabla 2-1 Algunos de los estudios previos recientes catalogados por resultados positivos, parciales y negativos referentes la ingeniería sísmica.

Enfoque teórico	Estudios con resultados positivos	Estudios con resultados parciales	Estudios con resultados negativos	Temas abordados
Desempeño sísmico	Chávez (2018) Zameeruddin (2016) Bojórquez (2014)	Yang (2019) Palanci (2019)		Aislamiento sísmico Resiliencia sísmica Edificios altos de concreto Probabilidad de ocurrencia Tasas de excedencia
Fragilidad sísmica	Omar (2017) Kassem (2019) Minas (2019)	Karapetrou (2017) Modica (2014)	Dall’Asta (2019)	Edificios históricos Análisis dinámico lineal Curvas de fragilidad Efecto de envejecimiento Probabilidad de falla Espectros de respuesta no lineal

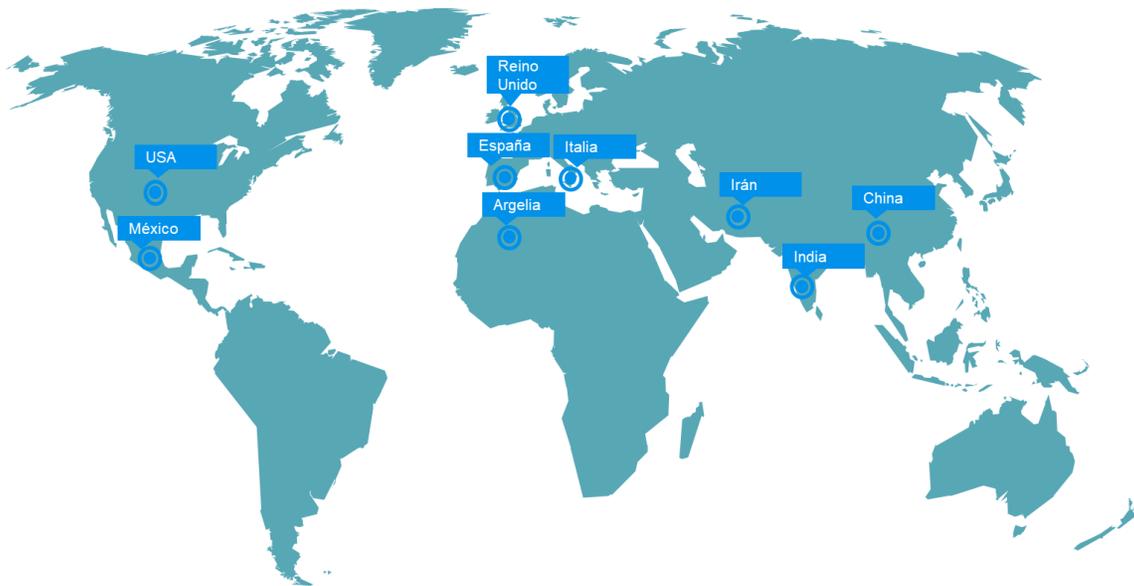


Figura 2.1 Principales países donde se ha desarrollado investigación sobre ingeniería sísmica y desempeño estructural en los últimos diez años.

2.2 Estudios previos en el país

Bojórquez et al. (2012), con fines de asociar las MISV con la fragilidad sísmica, aplicó su uso para evaluar la probabilidad de falla en edificios de acero ante efectos sísmicos. Además, también se buscó proveer nuevas MISV para predecir demandas de energía histerética, debido a su importancia, ya que en algunas circunstancias se puede obtener un diseño insatisfactorio si se considera la duración del movimiento del suelo o si no son consideradas las demandas acumuladas, y no solo las clásicas demandas máximas. Con esto, se ha logrado utilizar a las MISV basadas en $S_a(T_1)$, también denominada simplemente como S_a , como primer parámetro para estimar de manera eficiente la distorsión máxima de entrepiso y las demandas de energía histerética en marcos de acero sometidos a registros sísmicos de banda angosta (Bojórquez *et al.*, 2015; Bojórquez *et al.*, 2017a; Bojórquez *et al.*, 2014).

Lo anterior condujo a la aplicación de este enfoque para abrir nuevos temas de investigación, como el de (Torres, 2018), quien calibra diferentes medidas de intensidad escalares y vectoriales en términos de demandas máximas de edificios de concreto reforzado bidimensionales. También como producto de esta línea de investigación se utilizaron las medidas de intensidad vectorial, particularmente I_{Np} , para calcular el peligro sísmico para la región del estado de Sinaloa (Chávez y Bojórquez, 2016), con la intención de desligarse de aquellas medidas de intensidad tradicionales basadas en respuesta máxima como aceleración, velocidad, deformación, en las que se basan la mayoría de reglamentos de construcción. Finalmente, al hacer el análisis de peligro sísmico con una medida de intensidad más apropiada, fue posible la elaboración de mapas de peligro sísmico en función de los niveles de intensidad obtenidos, los cuales son más confiables con respecto a las medidas tradicionales, lo que permite determinar de manera gráfica las zonas con peligro (Chávez y Bojórquez, 2017).

Es importante mencionar que, tomando en cuenta el efecto de los modos superiores como una de las pocas limitaciones de I_{NP} , Bojórquez *et al.* (2017b) optaron por crear una nueva medida de intensidad vectorial (Intensidad de Bojórquez) la cual contiene los parámetros de forma espectral N_p y R_{T_1, T_2} que predice con mayor aproximación la respuesta no lineal de estructuras dado que provee mayor información que la aceleración espectral al generar un segundo punto en el espectro de respuesta en pseudo-aceleración (Cordova *et al.*, 2001). La validación de esta nueva medida se realizó mediante una comparativa de rendimiento con respecto a trabajos previos que estiman la respuesta estructural de edificios en términos de la distorsión máxima de entrepiso, donde se concluye que la intensidad de Bojórquez resulta ser la más eficiente además de ser un gran predictor en sistemas no lineales con modos superiores de vibrar significativos.

Por otro lado, no solo se ha estudiado la eficiencia de estas MIS en predecir la respuesta estructural sino también en obtener curvas de fragilidad sísmica. Las superficies de fragilidad sísmica están compuestas por un conjunto de curvas de fragilidad sísmica. Estas son usadas para evaluar la vulnerabilidad de estructuras ante sismos al estimar los niveles de daño alcanzados (Hosseinpour y Abdelnaby, 2017). Al día de hoy se usan para múltiples propósitos en la ingeniería civil (*e.g.* estimación de pérdidas, evaluación de riesgo de colapso, revisión de diseño estructural, entre otras). También pueden ser aplicadas a diferentes tipos de estructuras (*e.g.* edificios irregulares, túneles subterráneos, muelles, turbinas de viento, estructuras de mampostería, por nombrar solo algunas). Esto las convierte en una herramienta importante para evaluar estructuras (Mai *et al.*, 2017). No obstante, estas solo usan MIS tradicionales o MISV con $S_a(T_1)$ como la primera componente del vector y N_p basada solamente en $S_a(T_1)$ como segunda componente; además, aplicado solamente a marcos de acero bidimensionales (Bojórquez *et al.*, 2012).

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Previo a detallar la metodología a utilizar, es importante plantear las técnicas o herramientas más significativas para este trabajo sustentadas en las formulaciones matemáticas o empíricas que las componen. Para esto, se indican los aspectos más relevantes con los que se va a interactuar en esta investigación y que serán de gran ayuda para el lector al momento de intentar comprender los motivos de aplicar unas variables específicas.

3.1 Conceptos básicos

Medida de intensidad (MI): Es el vector consistente de una función λ y depende del acelerograma sin escalar A_1 , incrementándose monótonamente con el valor λ (Vamvatsikos y Cornell, 2002).

Factor de escala: Consideremos A_1 una historia de tiempo (e.g. acelerograma) con varios intervalos de tiempo t . El factor de escala es el valor positivo que genera el número deseado de $A(t)$ cuando es multiplicado el valor escalada por la historia de tiempo (Vamvatsikos y Cornell, 2002).

Medida de daño: Es un vector compuesto de un escalar no negativo que caracteriza la respuesta adicional del modelo estructural debido a cargas sísmicas (Vamvatsikos y Cornell, 2002).

Eficiencia: Es la capacidad de una medida de intensidad para estimar la respuesta estructural de una edificación sometida a sismo o como la capacidad de reducir la incertidumbre asociada a ésta respuesta (Luco, 2002).

Suficiencia: Es la no dependencia de información o características sísmicas (e.g. magnitud y distancia epicentral) al momento de calcular la respuesta estructural (Luco, 2002).

Robustez al escalamiento: Indica la nula influencia en la estimación de la respuesta estructural, al haber utilizado el factor de escala en los acelerogramas (Luco, 2002).

Épsilon: Es el parámetro que define, en ingeniería sísmica, el número de desviaciones estándar que difiere la aceleración espectral logarítmica observada con respecto a la aceleración espectral logarítmica promedio de la ecuación de predicción de movimiento del terreno (Baker y Cornell, 2005).

Análisis Dinámico Incremental (ADI): Es un estudio de análisis dinámico de un modelo estructural parametrizado por el factor de escala de un determinado acelerograma del suelo (Vamvatsikos y Cornell, 2002).

Curva ADI: Es la gráfica del índice de daño obtenido en el estudio de ADI, contra una o más MIS que caracterizan el acelerograma escalado aplicado (Vamvatsikos y Cornell, 2002).

Periodo estructural y del suelo: La definición de periodo se traduce a la cantidad de tiempo que toma desde que el sistema comienza a oscilar y regresa a su punto de inicio original (recorriendo un ciclo completo). Este valor se calcula al aplicar un movimiento horizontal al edificio o al terreno, generando un traslado alternante pasando por el punto inicial. El concepto es ampliamente utilizado en el área de ingeniería sísmica y determina cuál es la respuesta de la estructura ante este tipo de movimientos (Geofísicasismospgf, 2012).

Resonancia: Se le conoce como el fenómeno que se produce cuando el periodo estructural y el de suelo coinciden entre sí, haciendo que los efectos del movimiento se amplifiquen y repercutan en todo el sistema, aumentando así la

probabilidad de colapso. Este término es sumamente conocido en el ámbito de la ingeniería civil debido a los desastres que han ocurrido en el pasado a causa de este fenómeno y precisamente se busca evitar que se produzca al diseñar las estructuras para minimizar la probabilidad de que esto suceda (Ambher, 2014).

Parámetro de Demanda Sísmica (PDS): Los parámetros de demanda sísmica identifican la cantidad de daño o pérdidas para el sistema estructural (no necesariamente debido a su naturaleza estructural). Algunos ejemplos de ellos son: la distorsión máxima de entrepiso, deformación máxima en azotea, cortante basal, energía histerética, entre otros (Kiani y Pezeshk, 2017).

Diseño sísmico basado en desempeño: En la actualidad los códigos vigentes siguen considerando el diseño sísmico basado en fuerza-desplazamiento, que considera la estructura dentro del rango elástico independientemente si se diseñan una estructura con comportamiento lineal o no lineal, aplicando solamente un factor por corrección para este último caso. Por otro lado, el diseño sísmico basado en desempeño se enfoca en predecir el potencial sísmico donde los criterios de diseño son expresados en términos del comportamiento apropiado de la estructura acorde al nivel de peligro sísmico donde ésta se encuentra; es decir, se trata de un proceso iterativo donde se plantean los objetivos de demanda a soportar, se hace un diseño preliminar para probar que soporte las cargas y, si se requiere, se diseña el modelo definitivo. También se tiene al diseño sísmico basado en desplazamiento, que en cierta forma es un diseño basado en desempeño, y trata de mejorar las principales debilidades del diseño basado en fuerza pero sobre simplifica el efecto de otros factores como el índice de daño, las cargas cíclicas, la duración de los sismos y su intensidad. El diseño sísmico basado en desempeño, expresado en términos de distorsiones o desplazamientos, se ha utilizado para superar las limitaciones de los métodos basados en fuerza y desplazamiento respecto a los efectos de cargas cíclicas o comportamiento no lineal en estructuras con resultados satisfactorios para mitigar el riesgo sísmico (Zameeruddin y Sangle, 2016).

Registros de banda angosta: Son aquellos que afectan a estructuras en un corto intervalo de periodos, es decir, registros de larga duración como los que ocurren en la zona de lago de la CDMX (Teran-Gilmore y Jirsa, 2004).

Registros de fuente cercana: Los registros de fuente cercana muestran pulsos de alta amplitud y larga duración del movimiento (sea velocidad o aceleración) al inicio del terremoto, lo que produce mayores demandas a las estructuras. En las zonas de fuente cercana, los así llamados registros de “pulso” ocurren en la dirección normal de la falla (Kohrangi *et al.*, 2019).

Registros superficiales: Son registros que se producen en todo el mundo pero que suelen tener poca magnitud y son de corta duración (largos periodos) ocurriendo a escasas profundidades (Pérez, 2018).

Riesgo y peligro sísmico: El riesgo sísmico está asociado a la cantidad de daño estimado ante la ocurrencia de un sismo, abarcando distintas categorías como daños económicos, humanos y sociales. Por otro lado, el peligro sísmico se relaciona con la tasa de excedencia (probabilidad de que un valor sea excedido en un periodo de retorno determinado) de un evento sísmico de ciertas características en una zona específica (Pérez, 2018).

Efectos P-Delta: A estos también se les denomina efectos de segundo orden y consisten en considerar las fuerzas cortantes y momentos según las deformaciones, además de la influencia de la carga axial en las rigideces, el estado inelástico y agrietamiento de los materiales, duración de las cargas, diferencias en el volumen debido a flujo plástico y la interacción con la cimentación provocadas por las cargas verticales al obrar en la estructura desplazada lateralmente (RCDMX, 2017).

Análisis *Pushover*: También son conocidos como análisis estáticos no lineales. Se trata de un método simplificado que permite determinar, para un patrón de cargas dado, la curva de capacidad de una estructura. Mediante este análisis se determina la capacidad de una estructura con una distribución de carga similar a la del modo dominante (Chopra, 2014).

Energía de entrada: Es la suma de las energías cinéticas, de amortiguamiento, de deformación y disipadas presentes en un sistema idealizado de un grado de libertad al momento de ser excitado sísmicamente y se obtienen como consecuencia de la integración de la ecuación fundamental de movimiento (Torres, 2018). El término de energía de entrada representa la energía suministrada por una fuerza en un instante de tiempo. En vista de que el desplazamiento y la velocidad relativos causan las fuerzas en una estructura, una ecuación de energía expresada en términos del movimiento relativo es más significativa que otra expresada en términos de la velocidad y desplazamiento absolutos (Chopra, 2014).

Espectro de respuesta: La definición de espectro de respuesta ha sido implementada desde siglos pasados. En la actualidad se utiliza de manera abundante en todas partes del mundo. Se puede expresar como la respuesta de un sistema ante la excitación del mismo mediante fuerzas externas (viento, sismo, impactos, entre otros). Se visualiza mediante gráficas de periodo contra la respuesta en términos de una medida de intensidad basada en respuesta máxima (Figura 3.1), tomando en consideración la capacidad de disipar energía de la estructura (Crisafulli y Villafañe, 2002).

Energía histerética: En términos conceptuales se puede definir como la energía presente en el ciclo de fuerza-deformación de una estructura que incursiona en el rango no lineal debido a la acción de fuerzas sísmicas o cíclicas. Su valor se determina con la suma del área bajo la curva del ciclo de histéresis también conocido como lazo de histéresis (Vamvatsikos y Cornell, 2002).

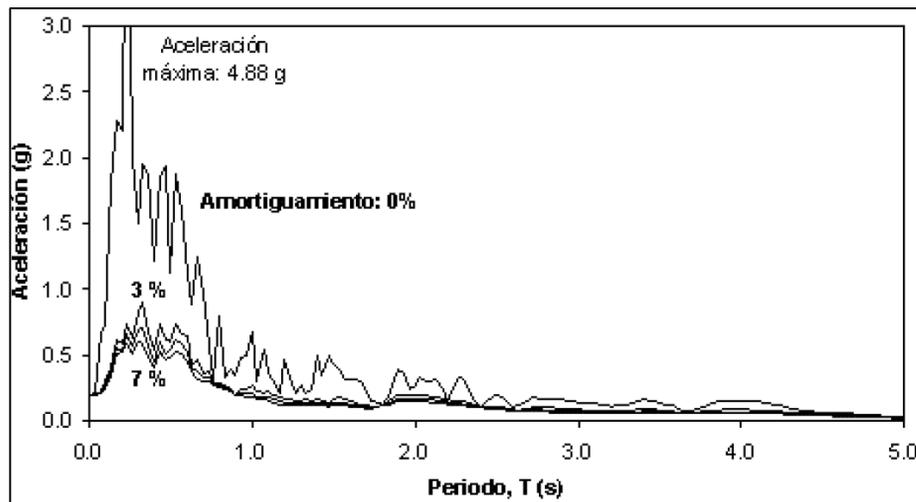


Figura 3.1 Espectro de respuesta en términos de aceleración para distintos factores de amortiguamiento (Crisafulli y Villafañe, 2002).

3.2 Medidas de Intensidad (MI)

3.2.1 MI basadas en respuesta máxima

Aceleración máxima del suelo (AMS)

Este parámetro consiste únicamente en obtener el valor máximo de aceleración registrado en la historia de tiempo (acelerograma). Este valor puede ser negativo o positivo y deberá tomarse como el valor absoluto máximo en los análisis. En la Figura 3.2 se muestra el momento en que se produce el pico y el valor correspondiente de aceleración.

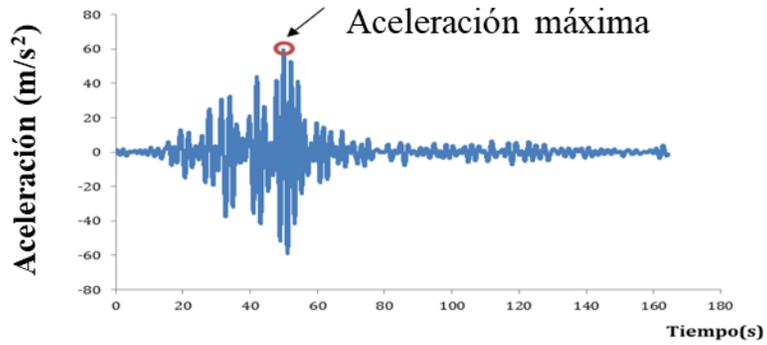


Figura 3.2 Historia de tiempo con el valor máximo de aceleración del suelo.

Velocidad máxima del suelo (VMS)

Este parámetro consiste únicamente en obtener el valor máximo de velocidad registrado en la historia de tiempo. Este valor puede ser negativo o positivo y deberá tomarse como el valor absoluto máximo en los análisis. En la Figura 3.3 se muestra el momento en que se produce el pico y el valor correspondiente de velocidad.

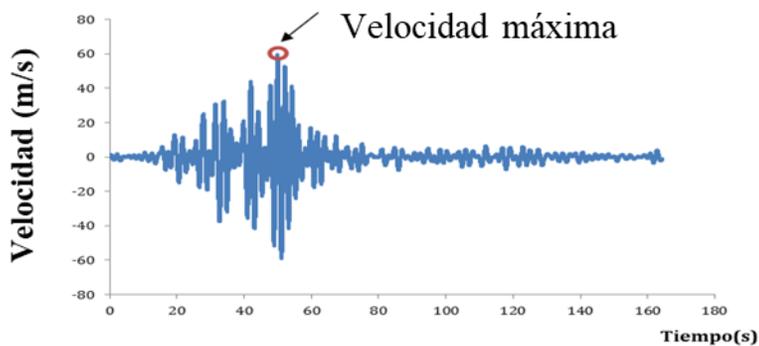


Figura 3.3 Historia de tiempo con el valor máximo de velocidad del suelo.

Aceleración espectral promedio

Debido a la incertidumbre para predecir la respuesta estructural de las medidas de intensidad utilizadas, Baker y Cornell (2005) propusieron una nueva medida de intensidad en función de dos parámetros (S_a y ϵ), mejorando la precisión y eficiencia. Con esto fue posible establecer una descripción de la respuesta considerando el parámetro de la ecuación (1) (Baker y Allin Cornell, 2006)

$$S_{a_{avg}} = (T_1, T_2, \dots, T_N) = \left[\prod_{i=1}^n S_a(T_i) \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

donde:

$S_{a_{avg}}$ = Aceleración espectral promedio.

$S_a(T_i)$ = Pseudo-aceleración espectral medida en un periodo de la estructura.

T_1, \dots, T_N = Los "n" periodos de interés.

Pseudoaceleración: Debido a que en la práctica se utilizan algunas suposiciones y métodos matemáticos para estimar espectros de respuesta con un espectro de diseño objetivo, se añade el prefijo "pseudo" para diferenciar respecto a aquellos espectros que son obtenidos de manera empírica mediante la instrumentación de estos sistemas. Es por esto que el espectro de respuesta de pseudoaceleración puede o no representar la aceleración real en comparación a las estimaciones obtenidas durante el diseño (Crisafulli y Villafañe, 2002). En este caso se puede considerar la ecuación (2) para obtener este espectro (Chopra, 2014).

$$A = \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D$$

(2)

donde:

A= Aceleración en el sistema.

ω_n = Frecuencia natural no amortiguada.

D= Deformación máxima debida al movimiento sísmico del terreno.

T_n = Periodo natural de vibración del sistema.

Pseudovelocidad:

El espectro de respuesta de pseudovelocidad se representa mediante una gráfica del valor de la velocidad en el eje vertical y el periodo de vibración natural la estructura en el eje horizontal. El valor máximo para este espectro puede ser determinado mediante la ecuación (3).

$$V = \omega_n D = \frac{2\pi}{T_n} D$$

(3)

donde:

V= Velocidad en el sistema.

ω_n = Frecuencia natural no amortiguada.

D= Deformación máxima debida al movimiento sísmico del terreno.

T_n = Periodo natural de vibración del sistema.

Espectro de desplazamiento: Es una gráfica del desplazamiento generado por la fuerza en función del periodo estructural del sistema (Figura 3.4), considerando un factor de amortiguamiento crítico fijo, calculada mediante la ecuación (4). En general, el valor máximo se genera durante la ocurrencia del sismo, sin embargo, en aquellos casos donde se tenga estructuras con poco amortiguamiento y periodos estructurales muy largos la respuesta máxima puede presentarse durante la fase de vibración libre posterior a que el sismo haya terminado (Chopra, 2014).

$$D = \text{Max} |u(t, T_n, \zeta)| \tag{4}$$

donde:

D= Deformación máxima debida al movimiento sísmico del terreno.

u= Desplazamiento o deformación del sistema total.

t= Tiempo durante cual el sistema es excitado.

T_n= Periodo natural de vibración del sistema.

ζ= Fracción del amortiguamiento crítico del sistema.

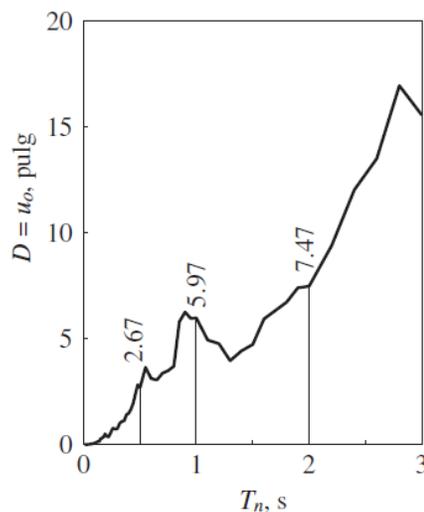


Figura 3.4 Ejemplo de espectro de respuesta de desplazamiento (Chopra, 2014).

3.2.2 MI basadas en duración

Duración del movimiento del suelo:

La duración del movimiento del suelo t_D es el tiempo que toma alcanzar el 95% de la intensidad de Arias partiendo desde el 5% de la misma. La intensidad de Arias se calcula mediante la ecuación (5). Nótese que algunas veces se expresa con una constante que multiplica a la integral, pero la base principal es integrar las aceleraciones del terreno al cuadrado.

$$IA = \int_0^{t_f} a(t)^2 dt$$

(5)

donde:

IA= Intensidad de Arias

a(t)= Aceleración en el instante de tiempo t.

Potencial de movimiento sísmico:

El potencial de movimiento sísmico es una medida de daño usado desde hace años y se obtiene conforme lo establece la ecuación (6), considerando el daño producido por el sismo estimando la intensidad de Arias normalizado con respecto al producto de las MI de respuesta máximas tratadas en la sección anterior.

$$I_D = \frac{\int_0^{t_f} a(t)^2 dt}{AMS \cdot VMS}$$

(6)

donde:

I_D = Potencial del movimiento sísmico.

$\int_0^{t_f} a(t)^2 dt$ = Intensidad de Arias.

AMS= Aceleración máxima del suelo.

VMS= Velocidad máxima del suelo.

3.2.3 MI basadas en la forma espectral

Parámetro de forma espectral R (Cordova *et al.*, 2001)

En la Figura 3.5 se puede apreciar una descripción gráfica de cómo se obtiene el parámetro espectral R considerando los puntos clave del espectro de pseudoaceleración. Este parámetro R es obtenido mediante la ecuación (7).

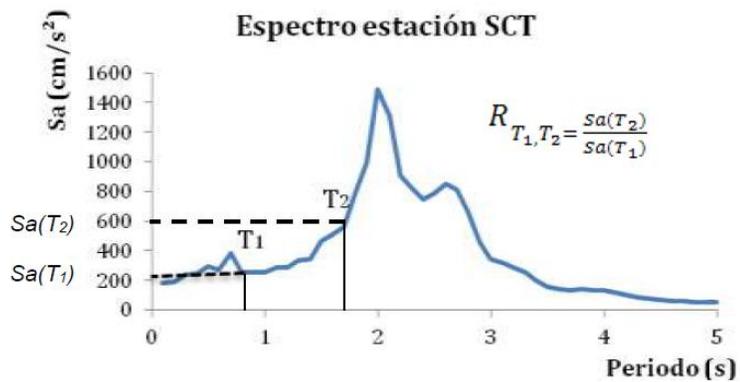


Figura 3.5 Espectro de respuesta que representa el parámetro de forma espectral R_{T_1, T_2} (Torres, 2018).

$$R_{(T_1, T_{modo i})} = \frac{S(T_{modo i})}{S(T_1)} \quad (7)$$

donde:

T_1 = Primer modo de vibrar.

$T_{modo i}$ = Periodo de vibrar mayor al que representa la estructura en el rango inelástico (dañada).

$S(T_1)$ = Aceleración espectral en el primer modo de vibrar de la estructura

Parámetro espectral N_p

En fechas recientes, Bojórquez y Iervolino (2011) crearon una MI basada en el parámetro N_p que se obtiene como la media geométrica de la ordenada espectral en un intervalo de periodos desde T_1 hasta T_N como se muestra en la ecuación (8) y representa la forma espectral que mejora el conocimiento acerca de la trayectoria de la estructura desde su comportamiento elástico hasta su incursión en el intervalo de comportamiento no lineal. De esta fórmula se desprenden todas las medidas espectrales basadas en N_p como pueden ser N_{pSa} , N_{pV} , N_{pSv} y N_{pEI} .

$$N_p = \frac{S_{avg}(T_i \dots T_f)}{S(T_j)} \quad (8)$$

donde:

N_p = Parámetro de forma espectral.

S_{avg} = Media geométrica de el parámetro espectral.

T_i = Periodo inicial analizado.

T_f = Periodo final analizado.

$S(T_j)$ = Parámetro espectral en un periodo específico.

Parámetro espectral I_{Np} .

I_{Np} , otra medida basada en N_p , fue creada y desarrollada por Bojórquez *et al.* (2017a), como se muestra en la ecuación (9), para estimar demandas máximas en marcos de acero.

$$I_{Np} = Sa(T_1) \left[\frac{Sa_{avg}(T_1, \dots, T_N)}{Sa(T_1)} \right]^\alpha \quad (9)$$

donde:

I_{Np} =Medida de intensidad sísmica basada en la forma espectral.

α = Parámetro calibrado dependiendo del tipo de estructura y el parámetro de demanda sísmica.

$Sa(T_1)$ = Pseudo-aceleración espectral medida en el periodo fundamental de la estructura.

Sa_{avg} = Aceleración espectral promedio.

T_1, \dots, T_N = Los "n" periodos de interés.

Intensidad de Bojórquez

A pesar de que I_{NP} ha resultado más eficiente en la respuesta estructural comparado con otros parámetros, una de sus limitaciones es la falta de consideración del efecto de los modos superiores. Por eso Bojórquez *et al.* (2017b) desarrollaron la denominada Intensidad de Bojórquez, I_B , descrita en la ecuación (10), que está compuesta por dos variables ligadas a la forma espectral, N_p y R_{T_1, T_2} , y predice con una mejor precisión la respuesta estructural de edificios con comportamiento inelástico. Uno de los objetivos principales para I_B es encontrar los valores de α_1 , α_2 y α_3 para los cuales dicha medida es más eficiente, mediante un análisis de regresión (Bojórquez *et al.*, 2017a).

$$I_B = S(T_1)^{\alpha_1} \cdot N_p^{\alpha_2} \cdot \prod_{i=2}^{i=\#modos} \left[R_{(T_i, T_{modoi})}^{\alpha_3} \right] \quad (10)$$

donde:

I_B = Intensidad de Bojórquez.

$S(T_1)$ = Parámetro espectral (pseudo-aceleración, velocidad y/o desplazamiento).

$R(T_i, T_{modoi})$ = Cociente de parámetro espectral en el periodo i -ésimo modo de vibrar de la estructura.

$S(T_{modoi})$ =Parámetro espectral en el periodo fundamental de vibración $S(T_1)$.

α_1 , α_2 , α_3 = Parámetros asociados a un modo de vibrar que deben ser calibrados.

N_p =Parámetro para caracterizar la forma espectral.

3.3 Análisis dinámico incremental

El ADI es un método de análisis que sirve para conocer el desempeño estructural de un edificio sometido a varios registros sísmicos escalados a distintos niveles de intensidad. Este análisis permite trazar curvas de respuesta según el nivel de intensidad aplicado expresada en términos de una medida de intensidad y una medida de daño o parámetro de demanda sísmica. Se considera el factor de escala positivo λ que modifica la amplitud de cualquier acelerograma $a_i(t_i)$ incrementándolo hasta la falla del sistema estructural mediante un análisis dinámico no lineal (Vamvatsikos y Cornell, 2002).

3.4 Parámetros de demanda sísmica

Es común encontrar en la literatura diversos estudios sobre parámetros de demanda sísmica directamente relacionados a las demanda máximas de una estructura. Generalmente se usa la distorsión máxima de entrepiso debido a su fácil aplicación y amplio reconocimiento en los códigos de construcción de muchos países, pero esta no captura la imagen completa del panorama en cuanto a daño estructural. Por lo tanto, para evaluar el daño sujeto a distintos movimientos del terreno, se deben considerar distintos parámetros de respuesta representando diferentes características de daño (Kiani y Pezeshk, 2017). Por lo anterior, se han implementado distintas medidas de daño que complementen las limitantes de los parámetros de demanda sísmica ampliamente usados. Para esto se debe mencionar cuáles son y en qué consisten cada uno de ellos.

3.4.1 Distorsión máxima de entrepiso (DME)

Es el parámetro de demanda sísmica más utilizado en cuanto a diseño por sismo se refiere, está dado por la ecuación (11) donde D_i es el desplazamiento del nivel i , D_{i-1} es el desplazamiento del nivel $i-1$ y H es la altura total del entrepiso (RCDMX, 2017).

$$DME = \frac{D_i - D_{i-1}}{H} \quad (11)$$

3.4.2 Energía histerética

La energía histerética, E_H , es un parámetro de demanda sísmica que considera el comportamiento cíclico de una estructura. Si este valor es cero significa que la estructura se encuentra en el rango lineal. La E_H , mediante las gráficas de fuerza-deformación (Figura 3.6), proporciona una idea y magnitud promedio de los ciclos de histéresis en los que una estructura incursiona en su comportamiento plástico. Su valor se determina con la suma del área bajo la curva del ciclo de histéresis también conocido como lazo de histéresis (Vamvatsikos y Cornell, 2002).

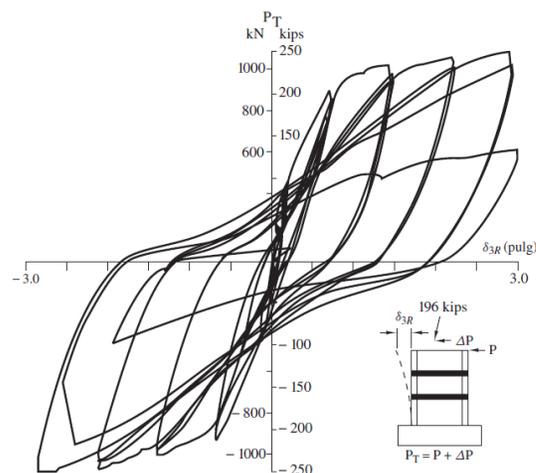


Figura 3.6 Ejemplo de los ciclos histeréticos de un marco de concreto reforzado (Chopra, 2014).

3.4.3 Índice de daño Park y Ang (PyA)

Este índice es una combinación de PDS que incluye a las deformaciones excesivas así como la energía histerética acumulada disipada en el sistema estructural (Kalateh-Ahani y Amiri, 2021) y su clasificación de daño se muestra en Tabla 3-1. Además, ha mostrado ser más efectivo al momento de establecer el daño adicional producido por réplicas de sismos principales comparado con los PDS basados en respuestas máximas (Wen *et al.*, 2017). El índice PyA es una cuantificación de la energía de disipación y caracteriza el daño inducido a una estructura y se estima acorde a la ecuación (12) (Zameeruddin y Sangle, 2016).

$$PyA = \frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} + \beta \frac{E_H}{F_y \delta_u}$$

(12)

donde:

δ_m = Desplazamiento máximo durante la ocurrencia del sismo.

δ_y = Desplazamiento a la fluencia.

δ_u = Capacidad de deformación última ante cargas monotónicas.

E_H = Energía histerética disipada.

F_y = Fuerza de fluencia.

β = Parámetro adimensional que ajusta el efecto de E_H con valores que oscilan entre -0.3 y 1.2. Un valor de 0.15 es un valor experimental aceptado acorde con Cosenza *et al.* (1993).

Tabla 3-1 Clasificación del índice de daño Park y Ang (Kalateh-Ahani y Amiri, 2021).

PyA	Estado de daño
$PyA < 0.11$	Daño menor- reparable
$0.11 \leq PyA < 0.40$	Daño moderado - reparable
$0.40 \leq PyA < 0.77$	Daño severo – irreparable
$0.77 \leq PyA$	Colapso

3.5 Fragilidad sísmica

3.5.1 Curvas de fragilidad

La fragilidad sísmica es obtenida mediante curvas o superficies de probabilidad de falla. La curva de fragilidad representa la probabilidad de que un parámetro de demanda sísmica, en relación con una medida de intensidad, exceda una resistencia calculada. Estas curvas son ampliamente usadas para diferentes propósitos relacionados a la ingeniería sísmica (estimación de pérdidas, evaluación de riesgo de colapso, revisión de daño, entre otros) y se aplican a varios tipos de estructuras, tales como edificios, túneles, muelles, plantas nucleares, presas, puentes, entre otros (Mai *et al.*, 2017).

Las curvas de fragilidad son obtenidas mediante la aplicación de una regresión logística simple considerando la ecuación (13) para evaluar el enfoque de la vulnerabilidad sísmica. La regresión logística simple es un procedimiento matemático usado en diversos datos que requieren definir si una variable está relacionada con otra en términos probabilísticos donde la respuesta es binaria (Kleinbaum y Klein, 2010).

$$P_F = P[F|Sa(T_1) = x_1, IM_2 = x_2] = \frac{1}{1 + e^{-\beta_1 - \beta_2 \cdot x_2}} \quad (13)$$

donde:

P_F =Probabilidad de falla.

$Sa(T_1)$ =Pseudo-aceleración espectral en el periodo fundamental de la estructura.

$P[F|Sa(T_1)]$ =Probabilidad de falla en el valor de pseudo-aceleración espectral medida en el periodo fundamental de la estructura.

IM_2 = Medida de intensidad como parámetro secundario del vector.

X_1 =Valor resumido de probabilidad de falla en el valor de pseudo-aceleración espectral medida en el periodo fundamental de la estructura.

X_2 = Valor de la medida de intensidad como parámetro secundario del vector.

β_1, β_2 =Coeficientes producto de la regresión de los resultados de registros escalados en $Sa(T_1)=x_1$.

3.5.2 Superficies de fragilidad

Para el caso de las superficies de fragilidad, donde no solo depende de la variación de una MI con respecto a otra fija sino de la influencia de dos o más MI en la probabilidad de falla, es necesario aplicar una regresión logística multinomial (RLM) (Bojórquez *et al.*, 2012). El concepto es el mismo que para la regresión logística simple, con la diferencia que aquí se relacionan múltiples variables. Este modelo matemático se ha vuelto muy popular porque el intervalo de su valor está entre 0 y 1, y es fácil interpretar su gráfica en forma de S. Es útil para modelar la

probabilidad de un evento ocurriendo como función de otros factores (Kleinbaum y Klein, 2010). Su formulación matemática se puede apreciar en la ecuación (14).

$$P_F = P_F(I_{Dy} > x | IM_1 = x_1, IM_2 = x_2) = \frac{1}{1 + e^{(-\beta_0 - \beta_1 x_1 - \beta_2 x_2)}} \quad (14)$$

donde:

P_F =Probabilidad de falla.

IM_1 = Medida de intensidad como parámetro principal del vector.

IM_2 = Medida de intensidad como parámetro secundario del vector.

X_1 =Valor resumido de probabilidad de falla en el valor de IM_1 medida en el periodo fundamental de la estructura.

X_2 = Valor resumido de probabilidad de falla en el valor de IM_1 en el parámetro secundario del vector.

β_0, β_1 y β_2 =Coeficientes producto de la regresión de los resultados de registros escalados en $Sa(T_1)=x_1$.

4. METODOLOGÍA

Los subcapítulos referentes a la metodología a utilizar, se resumen mediante la Figura 4.1, donde se muestra de manera generalizada los pasos a seguir durante esta etapa. Los pasos a detalle se mostrarán a lo largo de este capítulo.

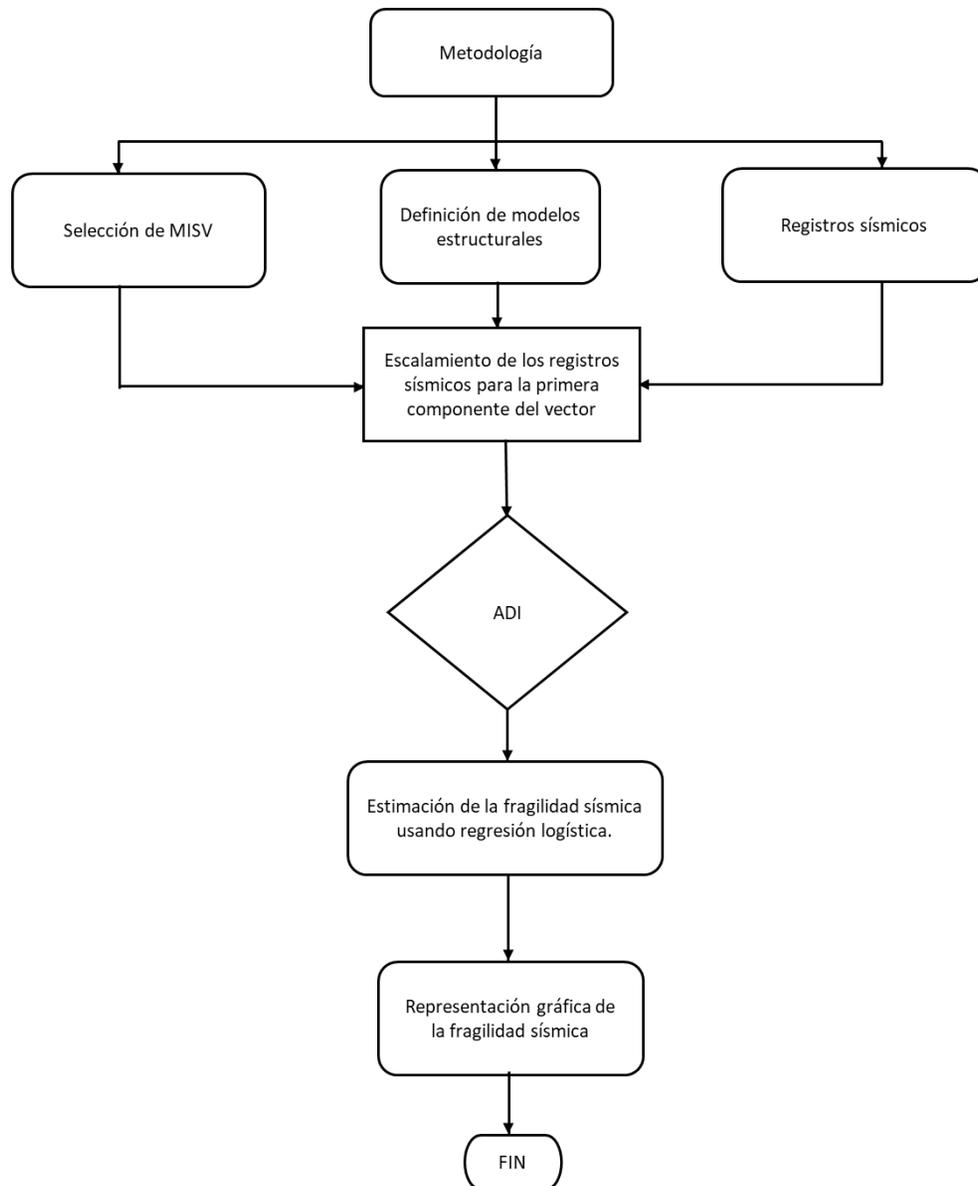


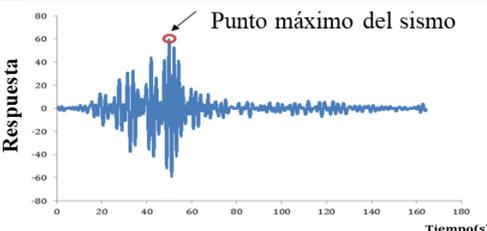
Figura 4.1 Pasos resumidos de metodología utilizada.

4.1 Adquisición de datos

4.1.1 Medidas de intensidad

Para determinar la MIS que mejor describa el comportamiento sísmico de un edificio de concreto reforzado es necesario hacer una comparativa entre distintos tipos de MIS. Las MIS consideradas son $Sa(T_1)$, $V(T_1)$, $EI/m(T_1)$, I_{Np} e I_B como primera componente del vector, mientras que para la segunda componente se utilizó AMS, VMS t_D , I_D , Np_{Sa} , Np_V , Np_{Sv} y Np_{EI} . Los ocho parámetros seleccionados como segunda componente del vector se muestran en Tabla 4-1. Lo anterior significa que las MISV están compuestas conforme se muestra en Tabla 4-2.

Tabla 4-1 Medidas de intensidad sísmica utilizadas como segunda componente de la MISV

Medida de intensidad	Formulación matemática	Referencia
Aceleración Máxima del Suelo (AMS)		-
Velocidad Máxima del Suelo (VMS)		-
Duración efectiva (t_D) ¹	$I_A = \int_0^{t_f} a^2(t) dt$	(Trifunac y Brady, 1975)
Potencial del movimiento sísmico (I_D)	$I_D = \frac{\int_0^{t_f} a^2(t) dt}{PGA \cdot PGV}$	(Cosenza <i>et al.</i> , 1993)
Parámetro espectral Np_{Sa}	$Np_{Sa} = \frac{Sa_{avg}(T_i \dots T_f)}{Sa(j)}$	(Bojórquez y Iervolino, 2011)
Parámetro espectral Np_V	$Np_V = \frac{V_{avg}(T_i \dots T_f)}{V(j)}$	(Bojórquez y Iervolino, 2011)
Parámetro espectral Np_{Sv}	$Np_{Sv} = \frac{Sv_{avg}(T_i \dots T_f)}{Sv(j)}$	(Bojórquez y Iervolino, 2011)
Parámetro espectral Np_{EI}	$Np_{EI} = \frac{EI_{avg}(T_i \dots T_f)}{EI(j)}$	(Bojórquez y Iervolino, 2011)
Parámetro espectral I_{Np}	$I_{Np} = Sa(T_1) \left[\frac{Sa_{avg}(T_i \dots T_f)}{Sa(T_i)} \right]^{\alpha}$	(Bojórquez <i>et al.</i> , 2012)
Parámetro espectral I_B	$I_B = Sa(T_1)^{\alpha_1} \cdot Np^{\alpha_2} \cdot \prod_{i=2}^{\#modos} \left[R_{(T_1, T_{modoi})}^{\alpha_3(modoi)} \right]$	(Bojórquez <i>et al.</i> , 2017b)

¹ Tiempo que lleva pasar del 5% al 95% de la Intensidad de Arias (I_A), donde $a(t)$ representa la aceleración del suelo y t_f la duración del movimiento sísmico.

Tabla 4-2 Conjunto de MISV utilizadas

MISV	Respuesta Máxima	Duración	Forma Espectral
<Sa, AMS >	*		
<Sa, VMS>	*		
<Sa, tD>	*	*	
<Sa, ID>	*	*	
<Sa, Np _{sa} >	*		*
<Sa, Np _v >	*		*
<Sa, Np _{sv} >	*		*
<Sa, Np _{el} >	*		*
<V, AMS >	*		
<V, VMS >	*		
<V, tD>	*	*	
<V, ID>	*	*	
<V, Np _{sa} >	*		*
<V, Np _v >	*		*
<V, Np _{sv} >	*		*
<V, Np _{el} >	*		*
<E _l , AMS >	*		
<E _l , VMS >	*		
<E _l , tD>	*	*	
<E _l , ID>	*	*	
<E _l , Np _{sa} >	*		*
<E _l , Np _v >	*		*
<E _l , Np _{sv} >	*		*
<E _l , Np _{el} >	*		*
<I _{np} , AMS >	*		*
<I _{np} , VMS >	*		*
<I _{np} , tD>		*	*
<I _{np} , ID>		*	*
<I _{np} , Np _{sa} >			*
<I _{np} , Np _v >			*
<I _{np} , Np _{sv} >			*
<I _{np} , Np _{el} >			*
<I _b , AMS >	*		*
<I _b , VMS >	*		*
<I _b , tD>		*	*
<I _b , ID>		*	*
<I _b , Np _{sa} >			*
<I _b , Np _v >			*
<I _b , Np _{sv} >			*
<I _b , Np _{el} >			*

* Corresponde al tipo de respuesta que caracteriza a la MIS.

4.1.2 Modelos estructurales

Con fines de tener una amplia muestra de escenarios, se eligieron 4 modelos de edificios de concreto reforzado (ECR) con distintas geometrías y características de los elementos estructurales. Las características principales del ECR como nombre del marco, número de pisos y periodo fundamental se muestran en la Tabla 4-3. Los edificios analizados cuentan con simetría en sus topología, variando solo el número de niveles de 3.5 metros de altura por cada piso. Los marcos 4N, 7N y 10N se componen de 3 crujiás en dirección X y Y de 8 metros de longitud cada una y 4 crujiás en dirección X y Y de 10 metros de longitud para el marco 15N (Figura 4.2). El amortiguamiento se consideró igual al 5% del amortiguamiento crítico, la resistencia del concreto igual a 300 kg/cm^2 , el módulo de elasticidad de $2.45 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ y una relación de Poisson de 0.20. Además, el edificio fue diseñado y dimensionado de manera que cumpliera con el reglamento de construcción de la CDMX edificado sobre un tipo de suelo de la zona III de la ciudad. Los datos de los ECR fueron introducidos en el programa RUAUMOKO 3D dado que permite hacer análisis de comportamiento dinámico inelástico (Carr, 2015). Para introducir el modelo dentro de este software es necesario crear un archivo de texto que esté estructurado de manera que cumpla con la interfaz del programa, es decir, se deben incluir línea por línea los parámetros correspondientes para que sea posible la ejecución de los comandos; entre los parámetros más importantes a introducir se encuentran el tipo de análisis, número de nodos-elementos-secciones del edificio, las cargas actuantes, el intervalo de tiempo y la duración del registro sísmico.

Tabla 4-3 Características principales de los marcos estructurales analizados.

Marco	No. De pisos	T1(s)
4N	4	0.50
7N	7	0.90
10N	10	1.07
15N	15	1.54

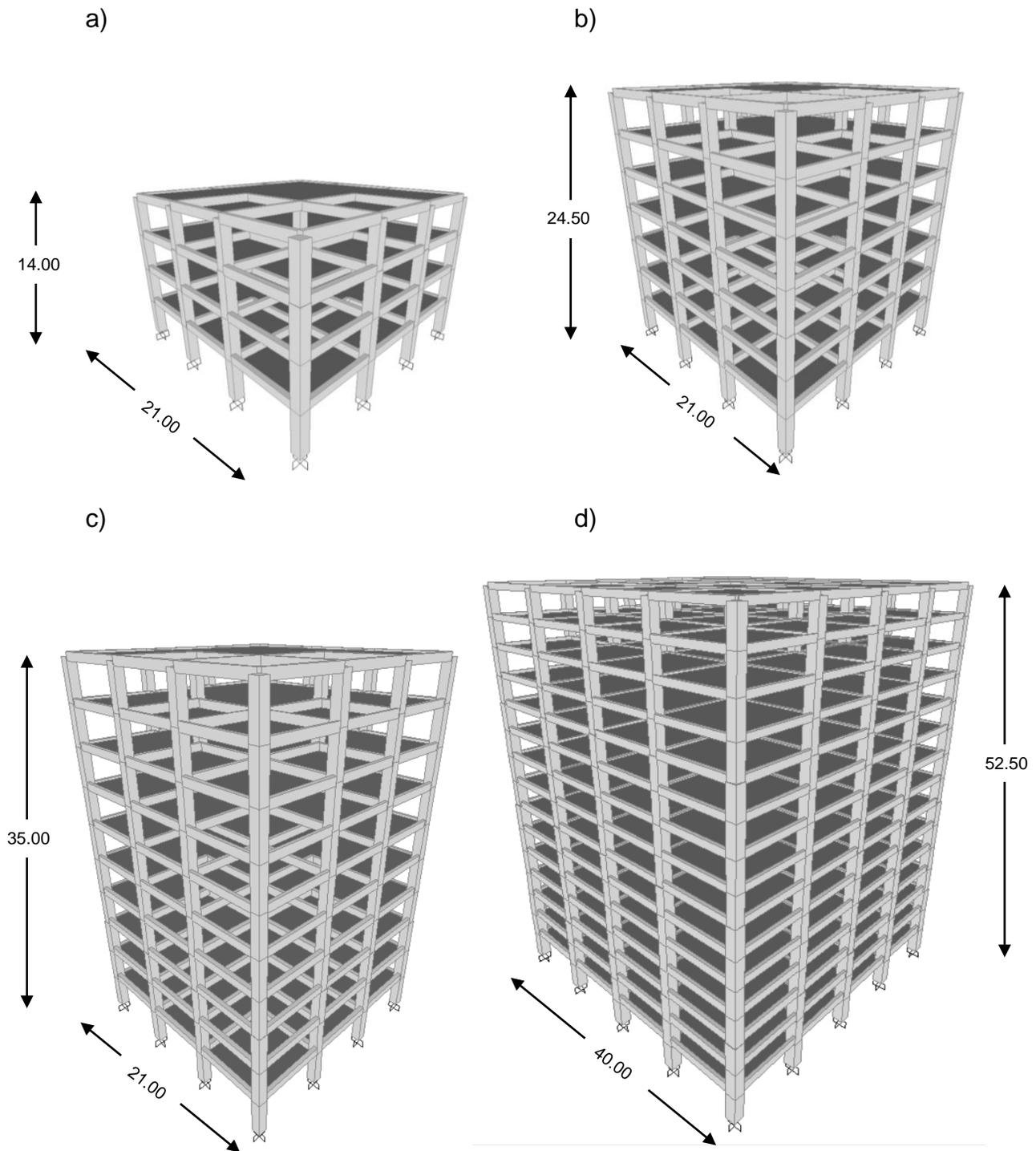


Figura 4.2 Modelos estructurales utilizados en el análisis para edificios con a) 4, b) 7, c) 10 y d) 15 niveles. Acotaciones en metros.

4.1.3 Registros sísmicos

Se eligieron registros sísmicos con magnitudes a partir de 6.8 en la escala de magnitud de momento (Mw), disponibles en la base de datos de la Red Acelerográfica de la CDMX, que fueron registrados en suelo blando. El resultado de la búsqueda se detalla en la Tabla 4-4, donde se muestran las historias de tiempo con los parámetros de mayor importancia para este trabajo.

Tabla 4-4 Sismos seleccionados para tomar como referencia.

Evento	Fecha	Estación	Longitud (°) **	Latitud (°) **	Magnitud d (Mw)	AMS (cm/s ²)	VMS (cm/s)	td (s)	Id (*)
1	19/09/1985	SCT	-102.468	18.419	8.1	178	59.5	63.34	13.12
2	21/09/1985	Tláhuac Deportivo	-101.681	17.828	7.6	48.7	14.6	133.79	0.76
3	25/04/1989	Alameda	-99.275	16.795	6.8	45.0	15.6	115.78	17.09
4	25/04/1989	Garibaldi	-99.275	16.795	6.8	68.0	21.5	117.74	8.69
5	25/04/1989	SCT	-99.275	16.795	6.8	44.9	12.8	128.44	14.16
6	25/04/1989	Sector Popular	-99.275	16.795	6.8	45.1	15.3	117.44	28.26
7	25/04/1989	Tlatelolco TL08	-99.275	16.795	6.8	52.9	17.3	118.92	9.43
8	25/04/1989	Tlatelolco TL55	-99.275	16.795	6.8	49.5	17.3	132.31	7.33
9	14/09/1995	Alameda	-98.667	16.752	7.3	39.3	12.2	105.34	13.79
10	14/09/1995	Garibaldi	-98.667	16.752	7.3	39.1	10.6	89.62	24.12
11	14/09/1995	Liconsa	-98.667	16.752	7.3	30.1	9.62	92.27	14.12
12	14/09/1995	Plutarco E.C	-98.667	16.752	7.3	33.5	9.37	95.86	16.69
13	14/09/1995	Sector Popular	-98.667	16.752	7.3	34.3	12.5	122.10	36.36
14	14/09/1995	Tlatelolco TL08	-98.667	16.752	7.3	27.5	7.8	142.42	28.23
15	14/09/1995	Tlatelolco TL55	-98.667	16.752	7.3	27.2	7.4	124.70	56.91
16	09/10/1995	Cibeles	-104.245	18.993	8.0	14.4	4.6	125.32	35.87
17	09/10/1995	CU Juárez	-104.245	18.993	8.0	15.8	5.1	122.51	34.62
18	09/10/1995	C.U.P.J	-104.245	18.993	8.0	15.7	4.8	130.07	33.17
19	09/10/1995	Córdoba	-104.245	18.993	8.0	24.9	8.6	113.46	23.44
20	09/10/1995	Liverpool	-104.245	18.993	8.0	17.6	6.3	147.10	17.22
21	09/10/1995	Plutarco E.C	-104.245	18.993	8.0	19.2	7.9	98.99	33.66
22	09/10/1995	Sector Popular	-104.245	18.993	8.0	13.7	5.3	123.85	37.87
23	09/10/1995	Valle Gómez	-104.245	18.993	8.0	17.9	7.18	131.26	24.51
24	11/01/1997	CU Juárez	-102.580	18.340	7.1	16.2	5.9	117.74	21.44
25	11/01/1997	C.U.P.J	-102.580	18.340	7.1	16.3	5.5	109.49	23.31

26	11/01/1997	García Campillo	-102.580	18.340	7.1	18.7	6.9	104.55	9.32
27	11/01/1997	Plutarco E.C.	-102.580	18.340	7.1	22.2	8.6	112.26	14.26
28	11/01/1997	Estación 10 Roma-	-102.580	18.340	7.1	21.0	7.76	88.72	25.61
		A							
29	11/01/1997	Estación 11 Roma B-	-102.580	18.340	7.1	20.4	7.1	96.54	27.05
30	11/01/1997	Tlatelolco TL08	-102.580	18.340	7.1	16.0	7.2	120.88	14.93

* = Adimensional, **= Coordenadas del epicentro.

4.1.4 Parámetros de demanda sísmica

Para la selección de los PDS fue necesario hacer un análisis de aquellos que actualmente se utilizan no solo en la ingeniería sísmica sino en la ingeniería estructural (e.g. distorsión máxima de entrepiso, desplazamiento máximo en azotea, cortante basal, energía histerética, índice de daño Park y Ang, entre otros), con fines de evaluar su aplicación en los análisis de fragilidad que se llevan a cabo para las distintas variables de interacción (medida de intensidad, edificio, registro sísmico). En la actualidad, para fines de vulnerabilidad sísmica se ha utilizado comúnmente el PDS de distorsión máxima de entrepiso, por lo que no se cuenta con muchos estudios que utilicen otros PDS para análisis de fragilidad. Por lo anterior, en este trabajo se aborda la implementación de dos PDS que son de interés en el análisis estructural de edificios con comportamiento tanto lineal como no lineal:

1. Distorsión máxima de entrepiso
2. Energía histerética

4.2 Análisis dinámico incremental

El análisis dinámico incremental es un método que evalúa el desempeño estructural de un edificio sometido a cargas sísmicas considerando un PDS como medida de daño. Para llevarlo a cabo se consideró el trabajo de Vamvatsikos and Cornell (2002), por su amplia aceptación en la literatura aplicada al campo de

investigación de la ingeniería estructural. El primer paso consiste en escalar los registros sísmicos en función de alguna MIS (e.g. pseudoaceleración, velocidad, energía de entrada, u otra). Posteriormente se obtiene el factor de escalamiento necesario para llegar a la intensidad deseada en el periodo fundamental de la estructura. Para este caso se consideró la Sa normalizada respecto a la gravedad (valores de 0 a 2g en incrementos de 0.1g) y Sa sin normalizar (de 0 a 2,000 cm/s² con incrementos de 100 cm/s²). Al final se optó por la primera opción de Sa dado que se tiene una mayor base comparativa con investigaciones de otros autores para este tipo de valores. Adicionalmente, se aplicaron los factores de escalado a los registros sísmicos correspondientes, creando así un total de 20 registros sísmicos escalados (uno para cada nivel de escalamiento, es decir, 0.1g, 0.2g, 0.3g...2g) para cada componente del registro sísmico seleccionado.

El desempeño estructural bajo cargas sísmicas se obtuvo con el apoyo del software RUAUMOKO 3D. Para ello se crea un archivo de texto con la estructura requerida por el programa, donde se debe incluir una serie de datos que lee el programa. Los parámetros más importantes que se requieren para este software son el tipo de análisis (dinámico), las características del marco (número de nodos, elementos, secciones transversales, formas de vibrar, amortiguamiento), la creación de cada nodo y elemento barra de la estructura con sus respectivas coordenadas arbitrarias, los nodos donde se estiman las distorsiones de entrepiso, las propiedades de las secciones transversales (módulo de elasticidad y cortante, área efectiva, momento de inercia), las cargas que se transmiten a los nodos según el análisis estructural y por último el intervalo del paso del tiempo así como la duración de la historia de tiempo del sismo que estará excitando a la estructura. Con lo anterior, se creó un archivo .bat que contiene las instrucciones para que las ejecute el software RUAUMOKO 3D. Se motiva al lector a revisar los manuales con los que cuenta el software RUAUMOKO 3D para profundizar aún más en todas las

funciones que se pueden llevar a cabo con este programa de análisis sísmico no lineal.

Las instrucciones que se incluyeron en el archivo son las siguientes: archivo ejecutable del software, nombre del archivo resultado, modelo del edificio en formato de texto y registros sísmicos escalados (componente norte-sur, este-oeste y vertical). El resultado arroja un archivo por cada sismo escalado (es decir, 600 archivos por cada edificio teniendo una muestra de 30 registros sísmicos), del cual se deberá extraer el parámetro de demanda sísmica. Este proceso puede apreciarse de mejor de manera en el diagrama de flujo de la Figura 4.3.

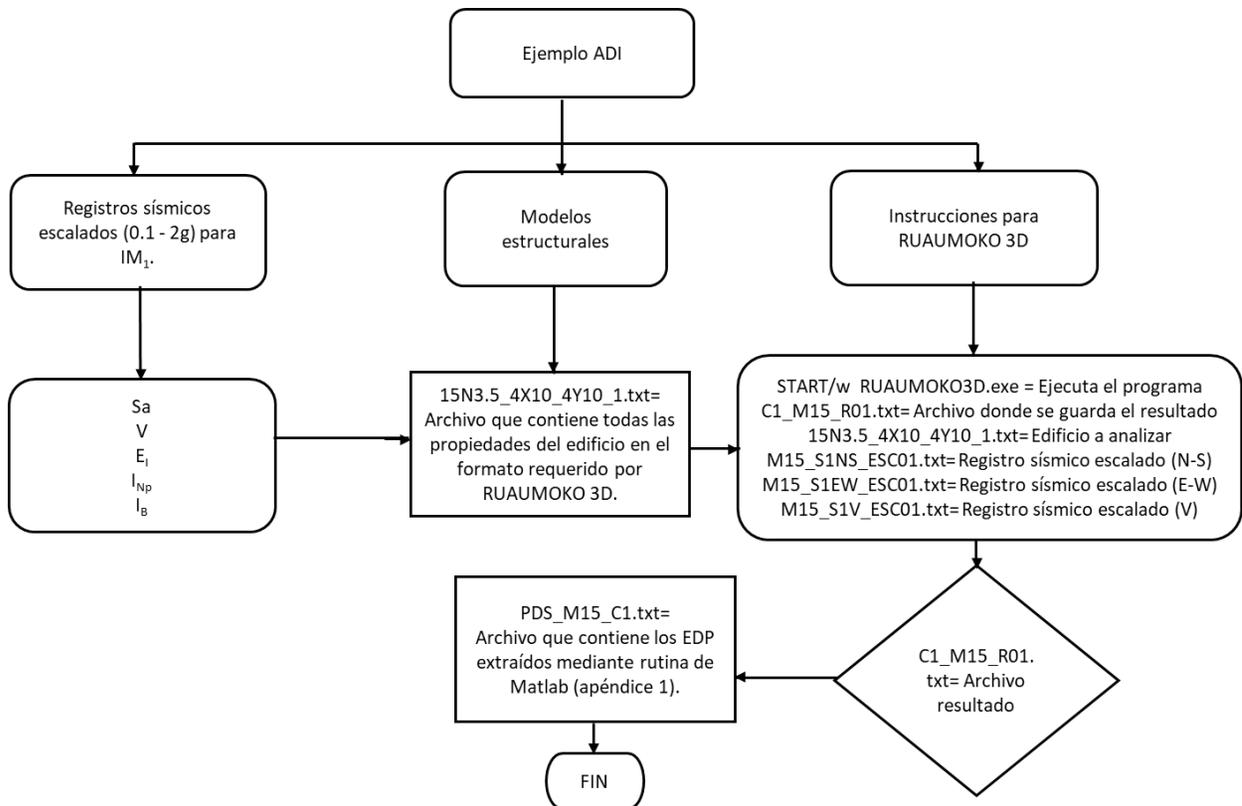


Figura 4.3 Diagrama de flujo para hacer un ADI, usando como ejemplo el marco 15N.

4.3 Desempeño sísmico

El desempeño sísmico de las MIS estará en función de los términos estadísticos de eficiencia, al evaluar las medidas de intensidad correspondientes, por lo que los análisis de fragilidad considerados deberán ser validados primero respecto a estos términos para posteriormente compararlos con los demás casos. Para esto fue necesario estimar primeramente la eficiencia de las medidas de intensidad, debido a que una medida eficiente se ha comprobado ser de igual manera suficiente (Buratti, 2012). Por esta razón se hizo una rutina en Matlab con los PDS extraídos y se grafica la MIS vs el PDS en cada nivel de escalamiento. La eficiencia estará en función de qué tan dispersos se encuentran los resultados conforme se va incrementando la MIS. En la Figura 4.4 podemos apreciar cómo la estimación del PDS, en este caso la distorsión máxima de entrepiso, va perdiendo confiabilidad al obtener resultados cada vez más dispersos al escalar S_a (izquierda) a niveles más grandes, a diferencia de la medida I_{Np} (derecha) quien tiene un mejor comportamiento en todo el intervalo de valores con dispersiones menores al primer caso.

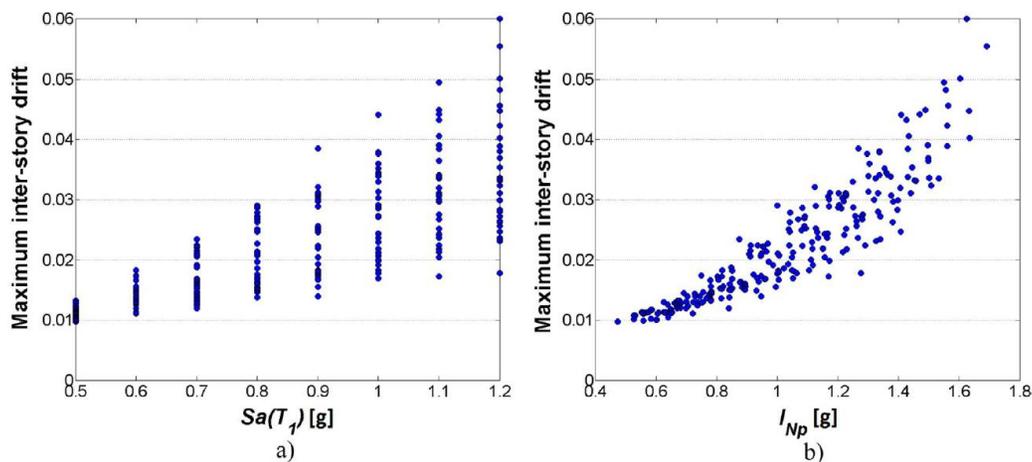


Figura 4.4 ADI para edificio de acero sujeto a sismos de banda angosta en términos de a) S_a y b) I_{Np} (Bojórquez *et al.*, 2017b).

4.4 Estimación de fragilidad sísmica

Las curvas y superficies de fragilidad nos permiten estimar el comportamiento de la MISV en función de la probabilidad de falla. El primer paso para conocer la fragilidad sísmica es conocer cuál es dicha probabilidad en función de las tasas de excedencia de un valor predeterminado, en este caso un PDS. Por un lado se debe establecer la probabilidad de que un valor sea excedido y por el otro cuál es el espectro en función de la falla o no falla del sistema. En este caso se considera que la estructura falla si excede un valor límite dado para cada PDS, asignándole a la probabilidad de falla un valor de 1 si existe colapso (excedió el valor límite) y si no falla (no excedió el valor límite) se le asigna un valor de 0. Después se asocian estos valores a las siguientes MIS: AMS, VMS, t_D , I_D , N_{pSa} , N_{pV} , N_{pSv} y N_{pEI} , para cada sismo utilizado. Finalmente, se tabulan los valores de falla-MIS para trazar las curvas de fragilidad y los de falla-MISV para generar las superficies de fragilidad correspondientes. En la sección anterior las ecuaciones (13) y (14) expresaban la probabilidad de falla en función de las medidas de intensidad y que mediante una regresión logística simple o multinomial se pueden desarrollar curvas o superficies de fragilidad con cada una de las MISV consideradas. Para todas las MISV utilizadas se realiza una correlación entre la probabilidad de falla y el PDS. Lo anterior con motivo de determinar el conjunto de parámetros que mejor describe la respuesta estructural del edificio. En la Figura 4.5 podemos apreciar la diferencia entre trazar curvas de fragilidad (izquierda) y superficies de fragilidad (derecha); La primera solo considera el comportamiento de una MIS mientras se considera S_a fija. En el segundo caso se varía ambos valores de la MISV y se puede conocer la influencia de uno y otro sobre la probabilidad de falla.

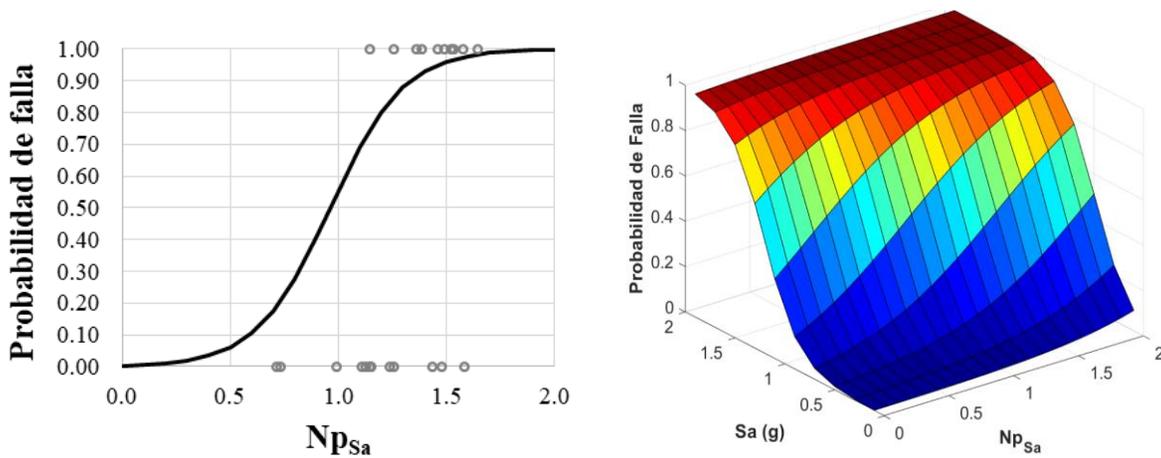


Figura 4.5 Regresión logística simple (izquierda) para Np_{Sa} con Sa fija y multinomial (derecha) para la MISV $\langle Sa, Np_{Sa} \rangle$.

En resumen, el proceso consiste en determinar si el sistema estructural falla o no, y con los espectros de respuesta previamente calculados, se determina la medida de intensidad para cada registro (escalado o no) al cuál se le asigna un valor de 0 o 1 según corresponda. Con estos datos se hace la regresión logística, variando el valor de los parámetros beta hasta que estos converjan en el resultado con el menor estimador del error. La curva de ajuste que abarque todos los puntos de la regresión deberá explicar de manera clara que existe una variación entre usar una medida u otra, dado que se espera que unas tengan una mayor relación con la respuesta estructural, lo que las convierte en eficientes, mientras que otras tendrán nula influencia o ineficientes en la predicción de la respuesta.

Las curvas de fragilidad se trazaron considerando la primera componente del vector de la MISV como fija, la segunda componente de la MISV en el eje de las abscisas y la probabilidad de falla en el eje de las ordenadas. Esto permite evaluar el comportamiento de la MISV a medida que se vaya incrementado la MIS. De manera similar, las superficies de fragilidad calculadas se realizaron creando una matriz de la primera componente de la MISV, otra matriz para la segunda

componente y una tercera matriz, producto de las dos primeras, aplicando la regresión logística multinomial. Los cálculos y creación de superficies de fragilidad fueron llevados a cabo en el software MATLAB y se utilizaron los valores beta que produjeran el menor error haciendo un proceso de optimización de datos. Las superficies de fragilidad se estimaron considerando la falla del edificio, es decir, cuando el parámetro de demanda sísmica excedía su valor de referencia o tasa de excedencia. Para el caso de los PDS aquí considerados, se tomó como base un valor límite de $10E_H$ para la energía histerética (Teran-Gilmore y Jirsa, 2004) y 0.03 para la distorsión máxima de entrepiso acorde al reglamento de construcción vigente (RCDMX, 2017), para evaluar la falla o no falla de la estructura. En la Figura 4.6 se muestra el diagrama de flujo sobre el proceso para realizar un análisis de fragilidad sísmica.

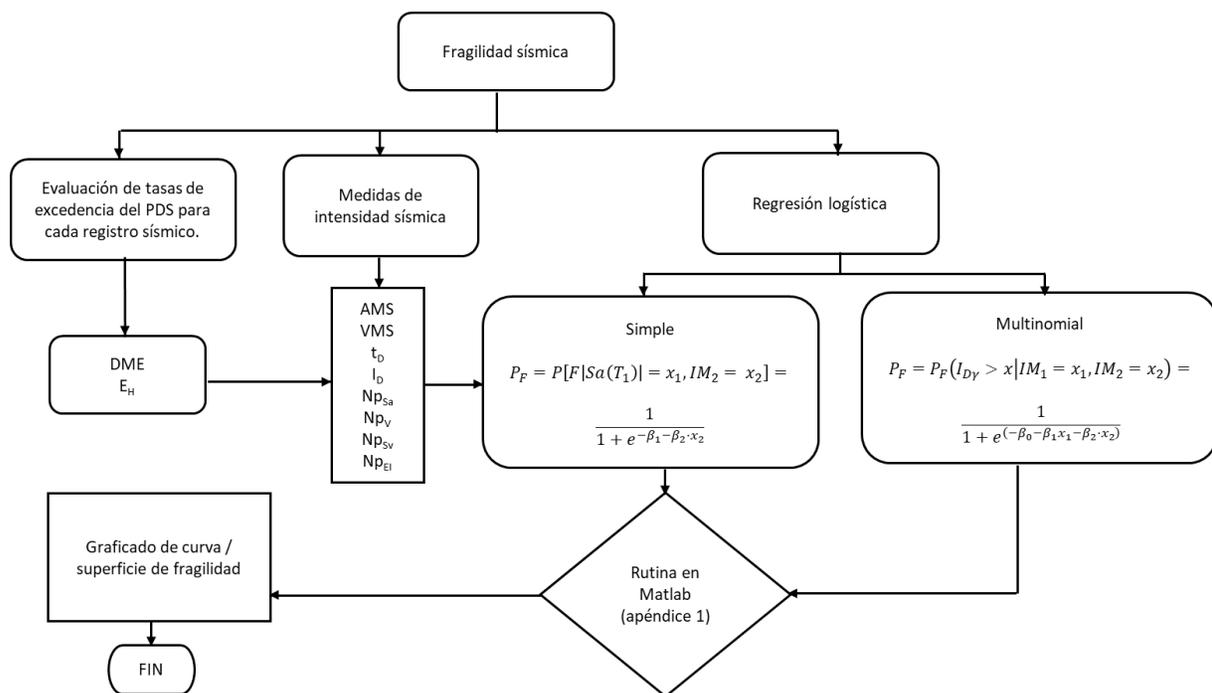


Figura 4.6 Diagrama de flujo para calcular curvas/superficies de fragilidad.

5. RESULTADOS NUMÉRICOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de realizar el ADI, las curvas y las superficies de fragilidad. Es importante señalar que con fines de no extender demasiado esta sección, para la parte de fragilidad sísmica se optó por mostrar únicamente los resultados que consideran a S_a como primera componente del vector y la DME como PDS, aplicadas a los cuatro edificios analizados (4N, 7N, 10N y 15N) en conjunto con las 8 MIS (AMS, VMS, t_D , I_D , N_{pSa} , N_{pV} , N_{pSv} y N_{pEI}). Lo anterior debido a que representan los resultados más fáciles de interpretar así como con los cuales se puede hacer una comparativa respecto a otros estudios. No obstante, en el siguiente capítulo se muestran una serie de escenarios involucrando distintos parámetros y cómo influyen en los resultados. Además, los resultados restantes se pueden consultar en los distintos apéndices anexos al final de este documento, en caso que se desee comparar algún dato específico que no se haya establecido en el cuerpo principal de este trabajo.

5.1 Desempeño sísmico

Para este apartado se utilizó el programa de cómputo RUAUMOKO 3D, ejecutado mediante un archivo de texto compuesto por los siguientes datos principales: Análisis tipo dinámico, marco de tres dimensiones, amortiguamiento del 5% del crítico, intervalos de historia de tiempo de 0.01s. Las cargas en los nodos fueron estimadas según el análisis estructural llevado a cabo acorde a lo estipulado en el reglamento de construcción (RCDMX, 2017).

En las siguientes figuras se muestran los análisis de eficiencia para las medidas de intensidad utilizadas como primer componente del vector, $S_a(T_1)$, $V(T_1)$, $E_I/m(T_1)$, I_{Np} e I_B , en función de la DME. Los resultados para E_H se muestran en el apéndice 1. El enfoque fundamental consiste en detectar si la incertidumbre se incrementa conforme lo hace el valor de la MIS. En primer lugar, se puede apreciar

que para el marco 4N la dispersión se incrementa a partir de 1.2g para Sa (Figura 5.1a), mientras que para V (Figura 5.1b) lo hace desde los primeros niveles de escalamiento. En el caso de E_I (Figura 5.1c) se reduce un poco la dispersión pero sigue siendo considerable en los últimos niveles de escalamientos. Por último, en las figuras Figura 5.1d y Figura 5.1e, I_{Np} e I_B respectivamente, tienen menor dispersión que los gráficos anteriores, siendo entonces este último el que presenta la mejor eficiencia.

En la Figura 5.2 correspondiente al marco 7N se observan resultados muy similares al caso anterior, solo que aquí se tiene una menor DME, pero los niveles de dispersión siguen siendo grandes para la Figura 5.2a y Figura 5.2b. Nuevamente vemos una ligera mejora en la Figura 5.2c que aparenta agrupar mejor los rangos de DME. En la Figura 5.2d podemos apreciar un mejor comportamiento que en la Figura 5.2e, pero ambos casos son bastante aceptables en cuanto a la dispersión de puntos.

Por otro lado, la Figura 5.3 muestra un comportamiento interesante en el marco de 10 niveles. Primeramente se aprecia un comportamiento prácticamente idéntico en la Figura 5.3a y Figura 5.3b probablemente debido a que se usó el mismo factor de escalamiento para esos registros; Posteriormente se tiene la Figura 5.3c que en esta ocasión no presenta una clara mejora en la dispersión de sus resultados con excepción que se trata de una DME menor lo que ayuda a la dispersión relativa sea menor. Respecto a las MIS basadas en la forma espectral, I_{Np} e I_B . (Figura 5.3d y Figura 5.3e respectivamente), existe una serie de puntos que dispersan un poco los resultados, sin embargo es poco comparado con sus homólogas basadas en respuestas máximas.

Se puede apreciar en la Figura 5.4 el mejor de los casos en cuanto a DME se refiere, sin embargo, nótese que hay aspectos negativos a declarar para este marco de 15 niveles. Empezando por la Figura 5.4a vemos que la dispersión se cierra bastante, principalmente gracias a que el edificio en sí tiene bajas DME, sin

embargo hay un punto disperso que pudiera ser eliminado para decir que tiene un buen comportamiento. Este caso idealizado sí es capturado por la Figura 5.4b que tiene una dispersión aceptable considerando el intervalo de valores de la DME pero no suficiente como para decir que tiene una eficiencia superior sobre otras MIS; Además, la Figura 5.4c presenta un pobre comportamiento tanto en el rango de DME como en su dispersión comparado contra las dos figuras anteriores. El principal problema de ello que justifica lo anterior, es que tiene demasiados puntos dispersos como para optar por prescindir de ellos, pero en caso de que así fuese, su comportamiento sería superior al de sus comparables basadas en respuestas máximas por lo que no debería ser descartado de primera mano; Por último y de manera consistente con los apartados anteriores, I_{Np} e I_B (Figura 5.4d y Figura 5.4e), son las que mejor eficiencia poseen al tener una dispersión menor de los resultados a medida que se incrementa la MIS. Si debiera ser elegido uno como el ganador, tendría que decantarse por I_B debido a que si bien es muy parecido a I_{Np} , este último tiene una ligera amplitud en la dispersión al iniciar el escalamiento, lo cual no sucede con I_B lo que le da una mayor confiabilidad en su eficiencia como estimador de la respuesta estructural.

De manera general observamos que para medidas escalares como S_a , V y E_I se pueden obtener resultados confusos a medida que se incrementa el valor de la MIS dado que para un mismo valor de MIS, el PDS puede oscilar en un intervalo de valores extensos, reduciendo así su eficiencia. Es precisamente uno de los inconvenientes de escalar los registros sísmicos de manera indiscriminada, puesto que se pueden obtener factores de escala muy grandes con tal de llegar al nivel de intensidad deseado. Por otro lado, para las MIS basadas en forma espectral, I_{Np} e I_B , la dispersión es mucho menor en todos los marcos aquí analizados y es por esto que se ha optado utilizar este tipo de medidas para trazar curvas y superficies de fragilidad sísmica, posicionándose como los mejores estimadores de la respuesta estructural debido a su mayor eficiencia.

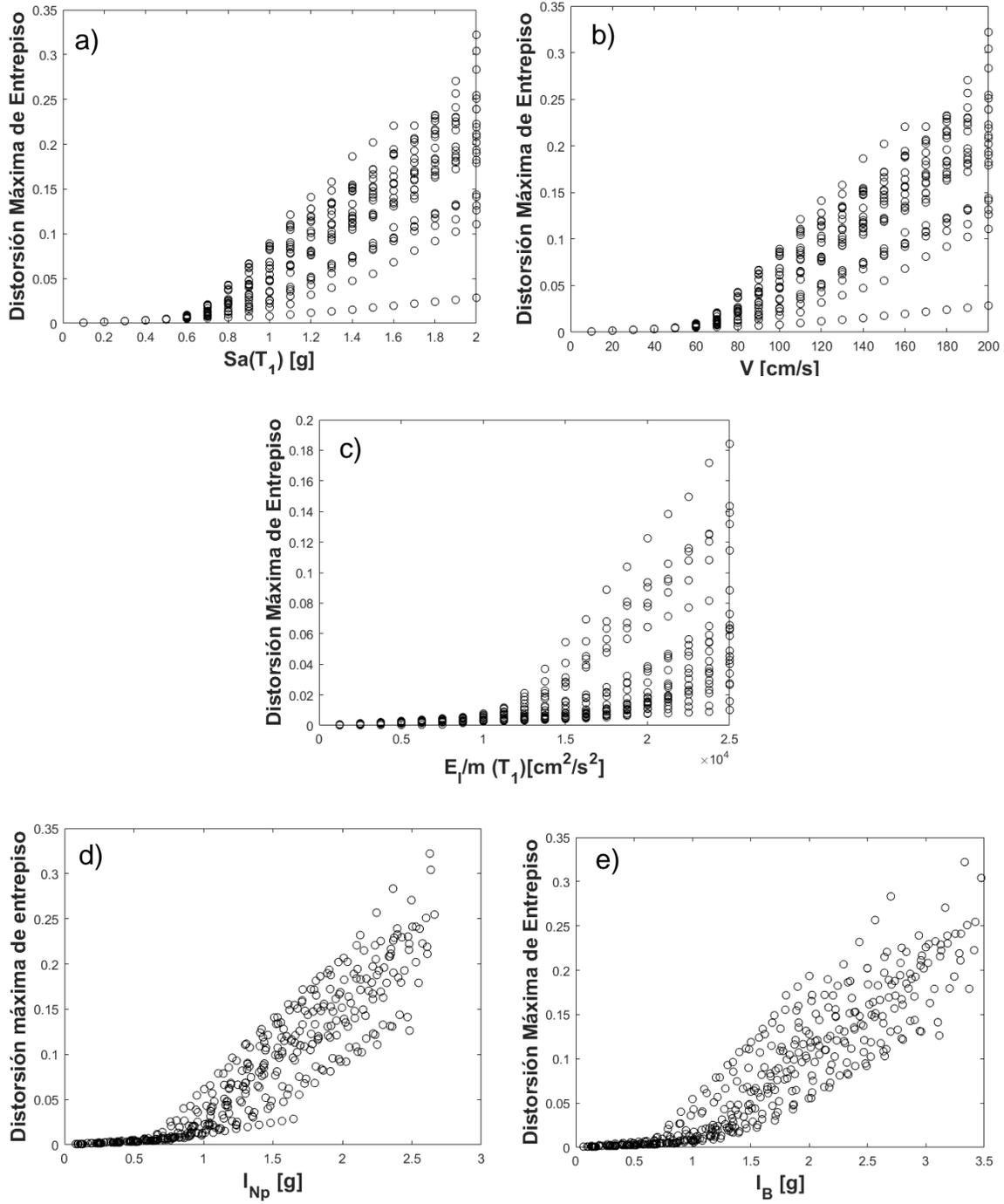


Figura 5.1 Análisis dinámico incremental con la DME como PDS para el marco 4N sometido a los registros sísmicos escalados para a) Sa , b) V , c) E_I/m , d) I_{Np} y e) I_B .

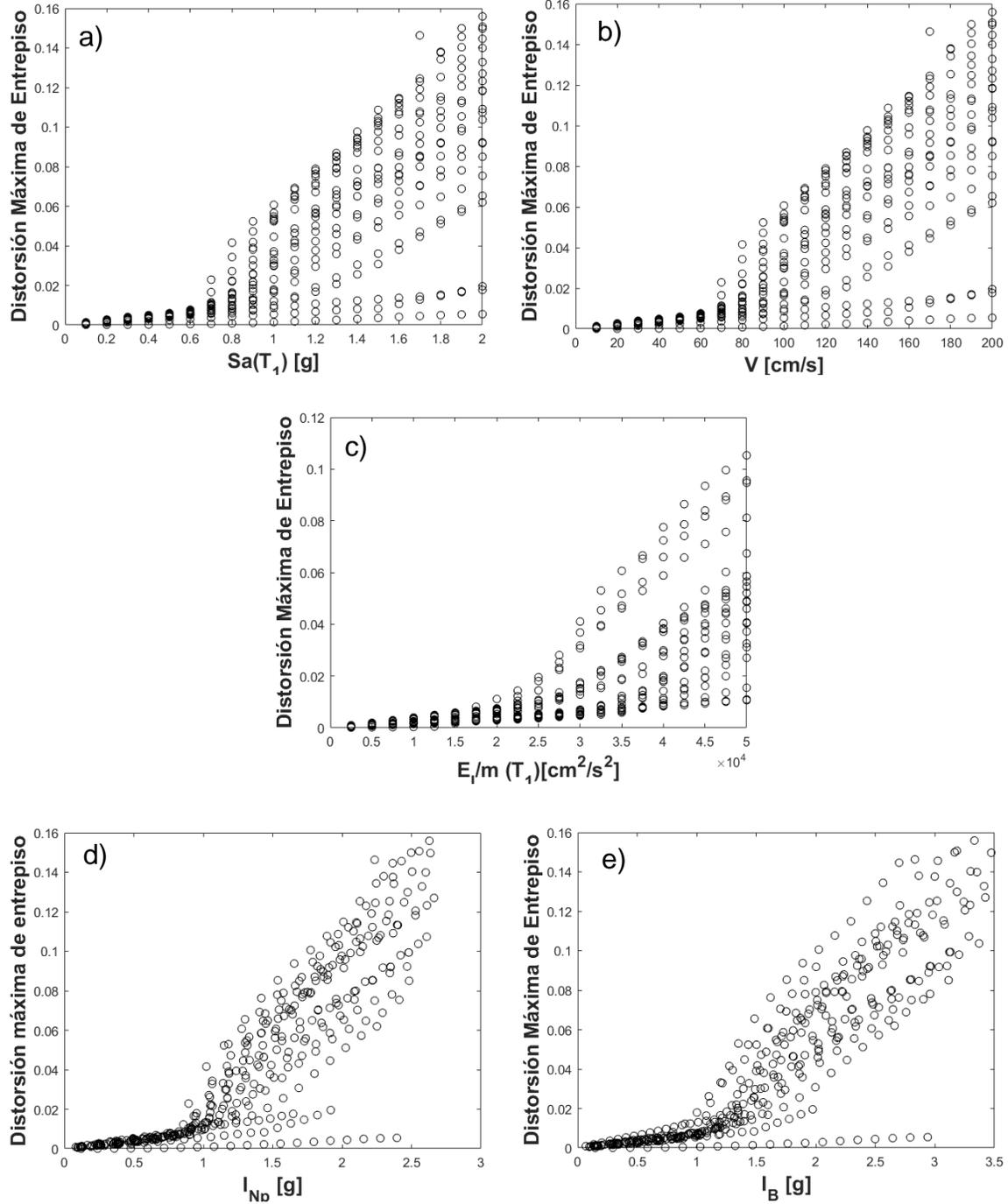


Figura 5.2 Análisis dinámico incremental con la DME como PDS para el marco 7N sometido a los registros sísmicos escalados para a) Sa , b) V , c) E_I/m , d) I_{Nd} y e) I_B .

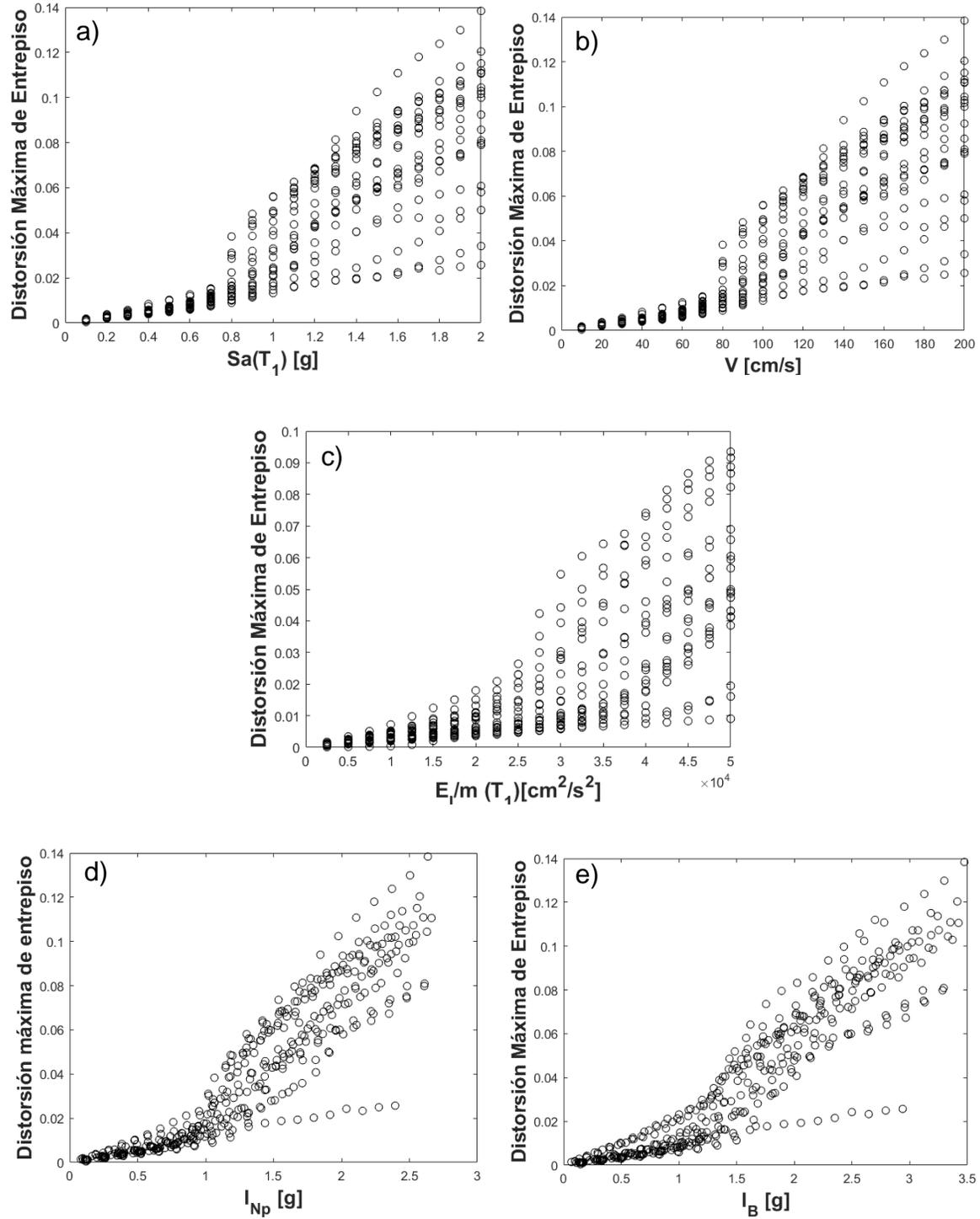


Figura 5.3 Análisis dinámico incremental con la DME como PDS para el marco 10N sometido a los registros sísmicos escalados para a) Sa , b) V , c) E_I/m , d) I_{Np} y e) I_B .

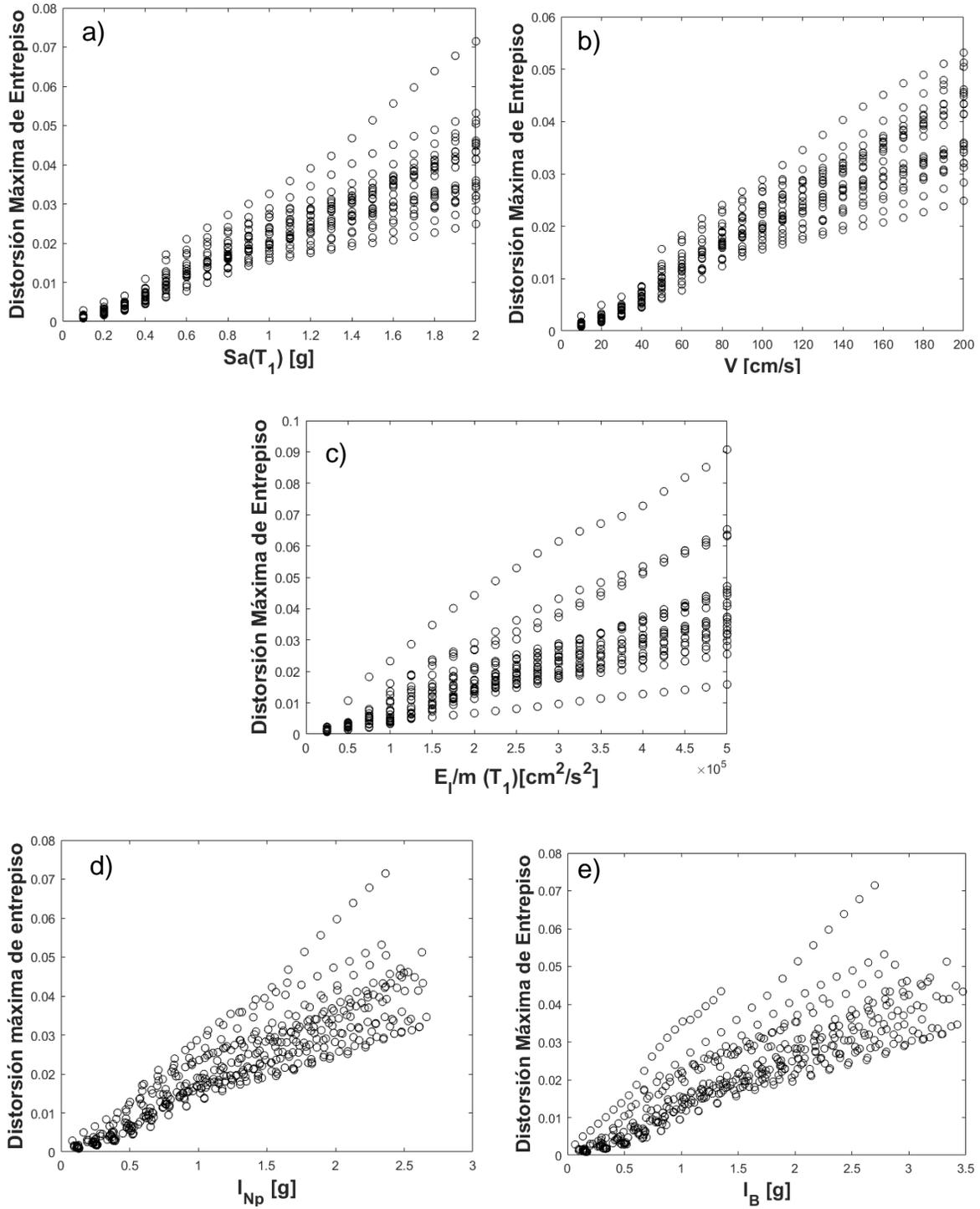


Figura 5.4 Análisis dinámico incremental con la DME como PDS para el marco 15N sometido a los registros sísmicos escalados para a) Sa , b) V , c) E_I/m , d) I_{Np} y e) I_B .

5.2 Curvas de fragilidad

En este apartado se obtuvieron curvas de fragilidad utilizando las MIS y los PDS comentados en las secciones anteriores. Con esto fue posible determinar las diferencias entre utilizar los métodos tradicionales basados en MIS de respuesta máxima en comparación con las de forma espectral y si estas diferencias son significativas, lo que posteriormente puede servir para validar el dimensionamiento de la estructura. Para cada MIS seleccionada se obtuvieron distintas curvas de fragilidad según el PDS que se haya aplicado. Esto quiere decir que se tendrá de manera proporcional tantos números de curvas de fragilidad como MIS y PDS se hayan seleccionado.

De igual manera, podemos observar la influencia de las MIS como segunda componente del vector y la aceleración espectral S_a fija (para el resto de curvas de fragilidad con otras MIS fijas vea el apéndice 2) con respecto a la probabilidad de falla. Aquí es donde es posible determinar si una MI es utilizable o marca una diferencia con respecto a los métodos tradicionales. Se busca que a medida que el valor de la MI se va incrementando, ésta tienda a producir un efecto en la probabilidad de falla. Si de lo contrario, pese a cualquier valor de la MI que se utilice, la probabilidad de falla se mantiene constante o no varía de manera significativa, se puede hablar de la nula influencia que tiene la medida para predecir la respuesta estructural del edificio. Un caso intermedio sería aquellas medidas que producen la falla probabilística de la estructura tanto en valores bajos como altos. Al final, el resultado de la regresión logística que arroje el menor error mostrará la curva de fragilidad correspondiente y se determinará la eficiencia de la MIS para estimar curvas de fragilidad.

En la Figura 5.5a se observa que para la AMS la probabilidad de falla se mantiene constante pese a los incrementos de la primera, lo cual quiere decir que no genera un efecto relevante al utilizar esta medida. Para el caso de VMS (Figura 5.5b) se ve una ligera mejoría pero también genera incertidumbre por la baja pendiente que nos muestra. Además existe un punto disperso que podría estar perturbando los resultados. Un mejor comportamiento se tiene para el caso de t_D (Figura 5.5c) quien ocasiona un incremento en la probabilidad de falla a medida que aumenta la MIS al producir un efecto casi lineal que puede ser tomado como bueno al momento de utilizar esta MIS. Otro caso medianamente aceptable se presenta con I_D (Figura 5.5d) quien parece tener injerencia sobre la PF aunque de manera muy restringida. Además, presenta el inconveniente que para el valor máximo de la MIS no ocasiona la falla del sistema estructural, lo cual resulta ilógico en términos prácticos. En el caso de N_{pSa} (Figura 5.5e) curiosamente no queda establecido de manera contundente el efecto que produce en la probabilidad de falla, debido a que si bien no es un mal comportamiento, si presenta deficiencias si lo comparamos con las otros MI basadas en N_p , debido probablemente a que su valor inicial está lejos del cero lo que podría ayudarnos a obtener una mejor curva. Esto puede deberse a diversos factores que sugieran un caso particular en lugar de un comportamiento generalizado. Otro caso en función del factor N_p es N_{pV} (Figura 5.5f) la cual parece mostrar el mejor resultado hasta ahora con una curva muy sensible a los cambios de valores de la MI, influyendo claramente en la PF del marco. Con respecto a N_{pSv} (Figura 5.5g), tiene el comportamiento más deficiente de todas las MIS basadas en forma espectral al no tener esa clara influencia que buscamos para este tipo de medidas, sin embargo, aun así es mejor que las MIS basadas en respuestas máximas. Finalmente, en el caso de N_{pEI} (Figura 5.5h) se obtiene una curva aceptable muy parecido al caso de t_D debido a que va creciendo de manera lineal. No se trata del mejor caso pero sin duda puede ser considerada como una medida con base comparativa hacia otros tipos de MIS.

En la Figura 5.6, correspondiente al marco de 7 niveles, se observa que las MIS tradicionales (basadas en respuestas máxima) tienen un comportamiento similar al de la figura anterior. Empezando por la Figura 5.6a que se mantiene constante a lo largo del incremento de la MIS. Algo parecido, aunque en menor medida, sucede con la Figura 5.6b que aunque va incrementando conforme lo hace la MIS, no es suficiente para decir que existe una influencia para esta medida. Para las MIS basadas en duración no hay una mejora significativa, sin embargo, la Figura 5.6c es la que tiene un mejor comportamiento hasta el momento, debido a que la Figura 5.6d se asemeja más a las MIS basadas en respuestas máximas. La Figura 5.6e muestra una clara influencia en la probabilidad de falla a medida que se incrementa la MIS. Esto no sucede en la Figura 5.6f, pese a que se trata de una MIS basada en la forma espectral (es uno de los pocos casos en que sucede esto durante este estudio, como se verá más adelante). En la Figura 5.6g se puede apreciar el comportamiento esperado de un incremento claro en la PF a medida que se incrementa la MIS. En la Figura 5.6h, la cual vale la pena mencionar, es la que mejor comportamiento tiene de las ocho gráficas mostradas en esta figura. Lo anterior se sustenta en el hecho de que la probabilidad de falla se incrementa conforme lo hace esta medida y la curva muestra el comportamiento esperado conforme se establece en la regresión logística.

Luego tenemos las curvas para el marco de 10 niveles (Figura 5.7). Primero tenemos a la Figura 5.7a con nula influencia en la probabilidad de falla con una línea de regresión constante a lo largo de la MIS. Luego la Figura 5.7b muestra un comportamiento similar aunque no tan evidente como la gráfica anterior. La Figura 5.7c se diferencia en que aquí sí hay influencia a medida que la duración se incrementa. En la Figura 5.7d no hay lugar a dudas que su comportamiento genera incertidumbre en la probabilidad de falla. Por otro lado, lo interesante viene nuevamente con las MIS basadas en la forma espectral. En la Figura 5.7e vemos que la influencia se nota rápido al incrementar la MIS. Todavía un mejor

comportamiento se aprecia en la Figura 5.7f (el mejor para este marco) donde la gráfica se comporta de manera apropiada con las expectativas que se tienen al momento de realizar la regresión. Un caso curioso ocurre en la Figura 5.7g puesto que su gráfica se asemeja bastante al de la Figura 5.7e (algo que se discutirá en la siguiente sección). Por último tenemos a la Figura 5.7h, que si bien demuestra que tiene influencia en la probabilidad de falla, se queda rezagada con respecto a sus homologas basadas en N_p .

Para finalizar, se analiza la Figura 5.8 que representa al marco de 15 niveles de altura. Para el caso de la AMS (Figura 5.8a) queda claro que su comportamiento constantemente plano a lo largo del gráfico revela una nula influencia en la estimación de la probabilidad de falla. En el caso de VMS (Figura 5.8b) si bien es un mejor estimador que el anterior, no es suficiente para establecer una influencia significativa en la estimación de la probabilidad de falla. Caso contrario a t_D (Figura 5.8c) que sí muestra indicios de una influencia al momento de incrementar esta medida. Esto no sucede con I_D (Figura 5.8d) debido a que el gráfico se vuelve nuevamente plano. Por el lado de las MIS basadas en la forma espectral tenemos a N_{psa} quien muestra una gran diferencia con respecto al resto de gráficas para este marco debido a que en este caso (Figura 5.8e) queda clara la influencia de esta medida desde el inicio y conforme se va incrementando el valor de la misma. Esto sucede, pero en menor medida, en Figura 5.8f y Figura 5.8g (N_{pv} y N_{psv} respectivamente). El caso de N_{pei} también es muy positivo de cara a la influencia que se busca al momento de estimar la probabilidad de falla, puesto que a medida que se incrementa esta MIS también lo hace así su probabilidad de falla.

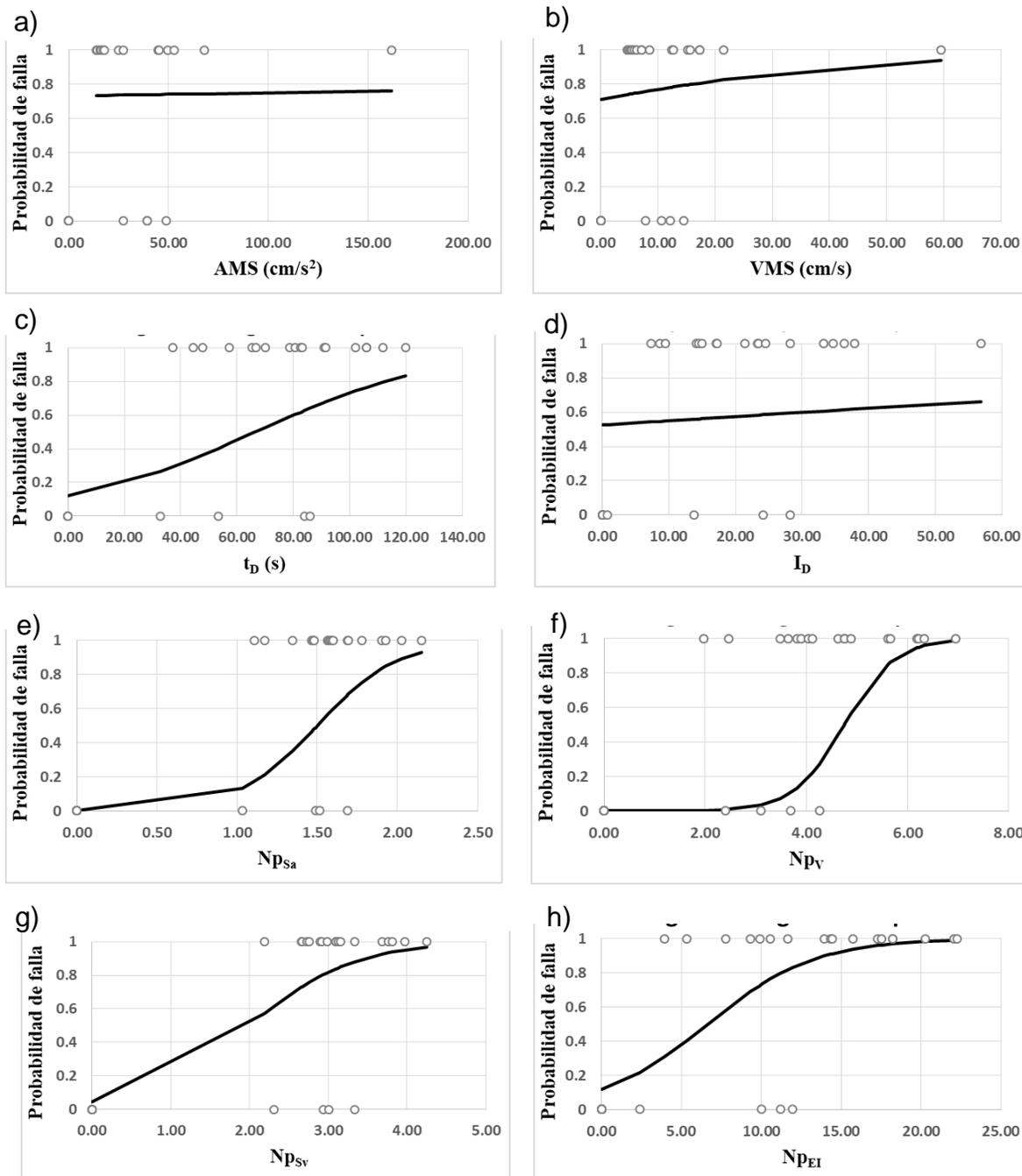


Figura 5.5 Curvas de fragilidad del ECR 4N con la DME y Sa= 1g como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D, d) I_D, e) N_{psa}, f) N_{pv}, g) N_{psv} y h) N_{pei} como segunda.

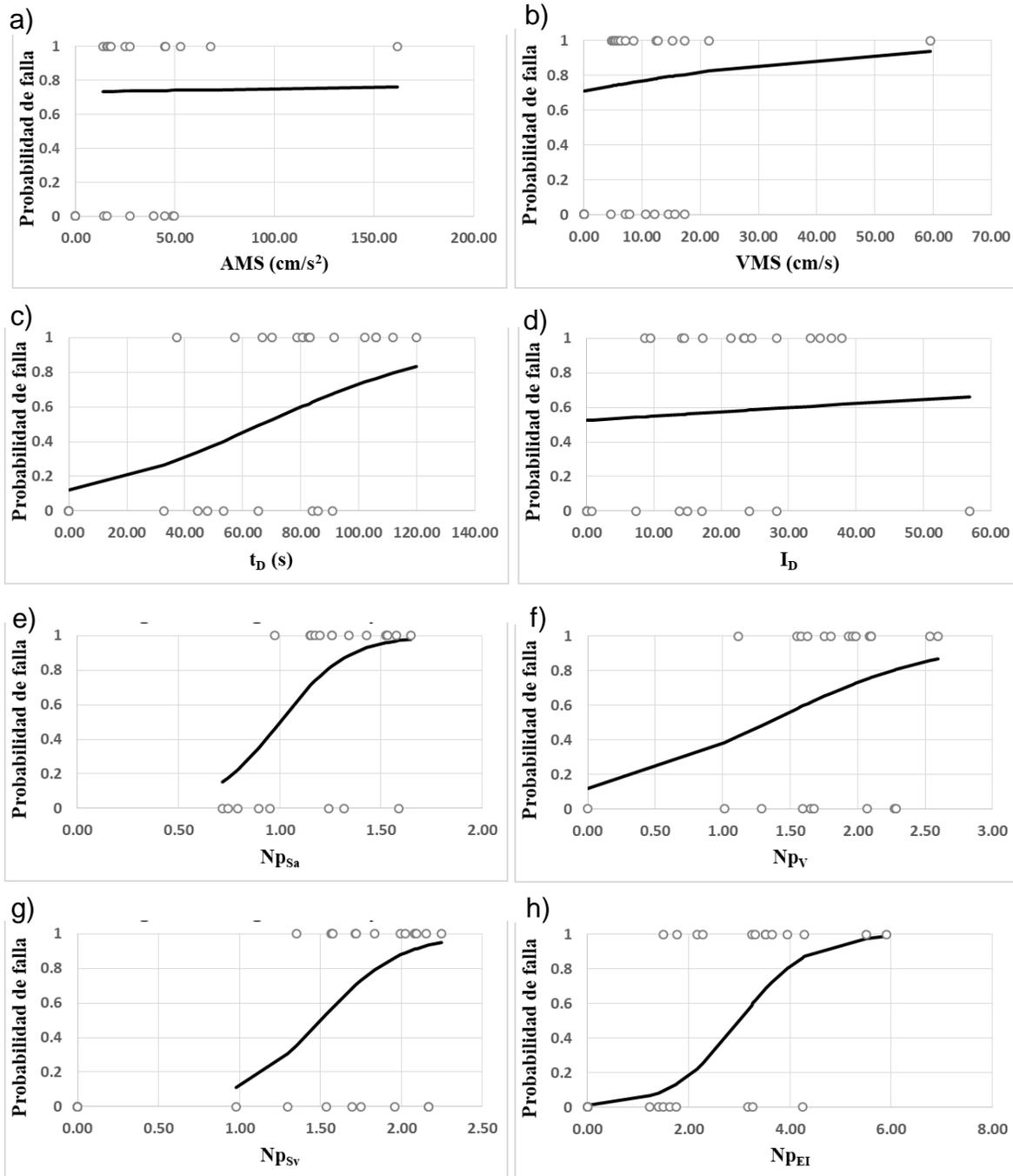


Figura 5.6 Curvas de fragilidad del ECR 7N con la DME y Sa= 1g como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D, d) I_D, e) N_{pSa}, f) N_{pV}, g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

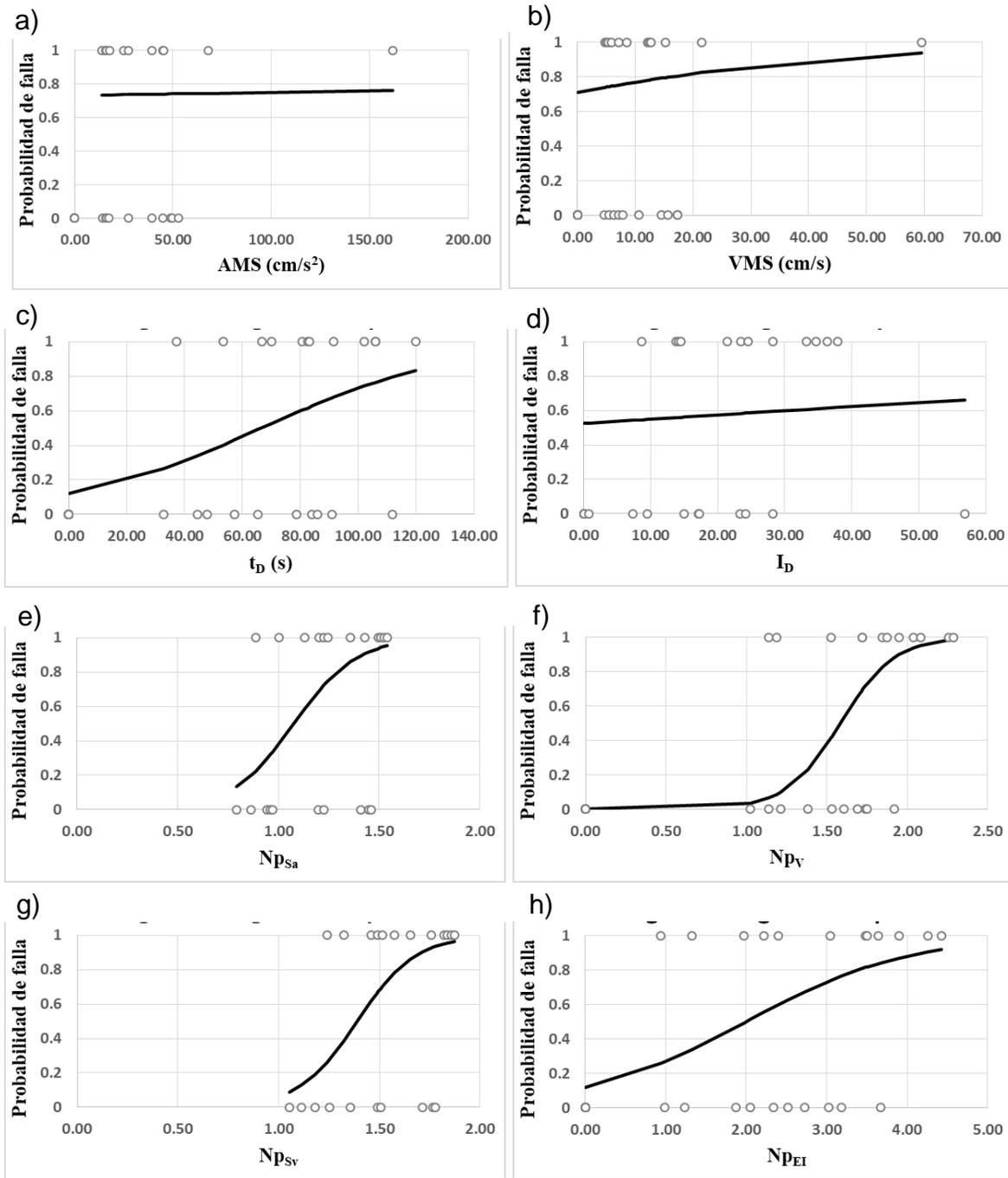


Figura 5.7 Curvas de fragilidad del ECR 10N con la DME y $S_a = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.

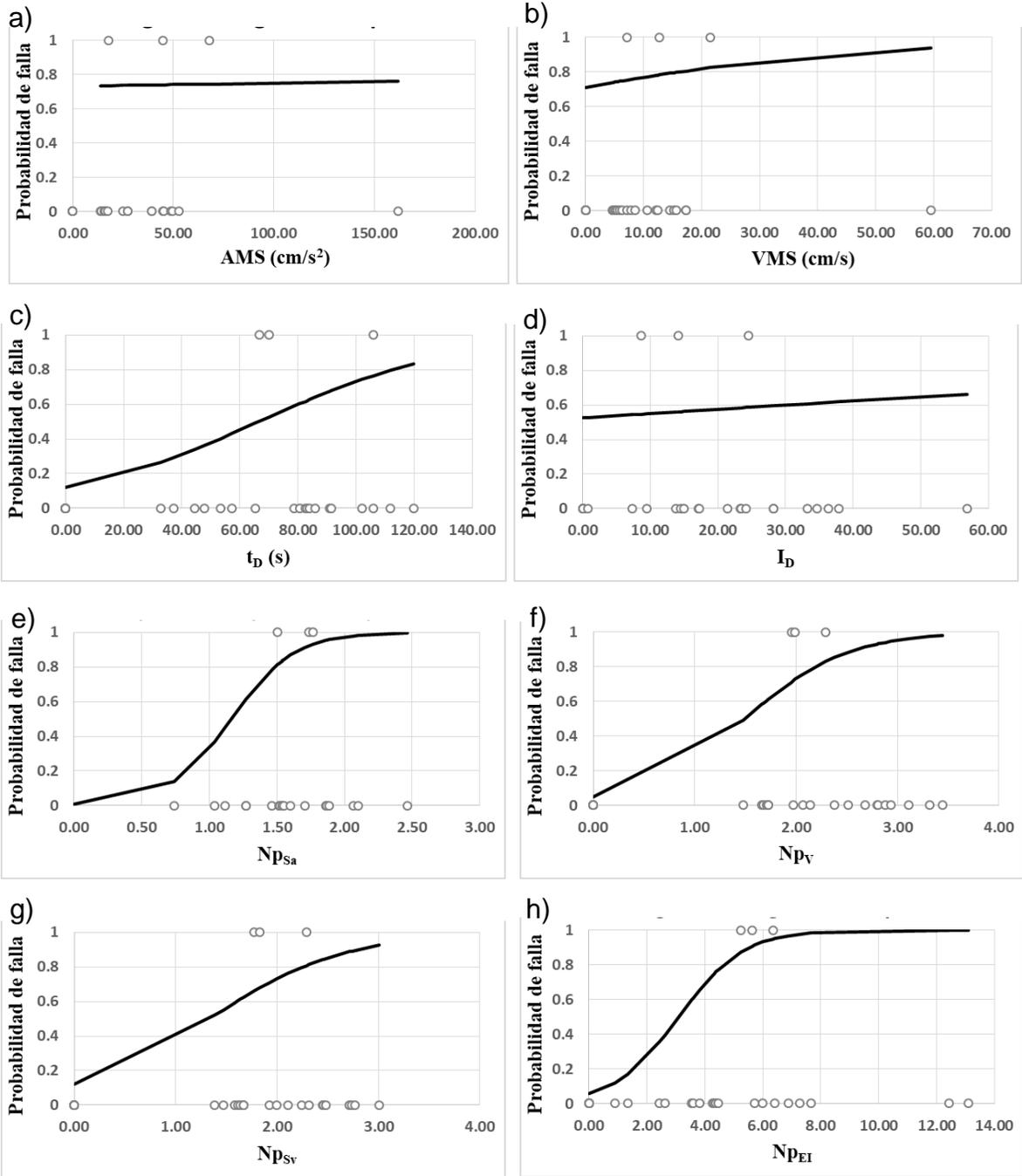


Figura 5.8 Curvas de fragilidad del ECR 15N con la DME y Sa= 1g como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D, d) I_D, e) N_{psa} , f) N_{pV}, g) N_{psv} y h) N_{pEI} como segunda.

5.3 Superficies de fragilidad

Al igual que en la sección anterior, se presentan las superficies de fragilidad, establecidas con base en un conjunto de curvas de fragilidad, para cada uno de los marcos analizados en este estudio (4, 7, 10 y 15 niveles de altura). Es importante recordar que se muestran solo las superficies para las MISV usando la aceleración espectral S_a como primera componente del vector y la probabilidad de falla en función de la distorsión máxima de entrepiso como parámetro de demanda sísmica; nótese que el resto de superficies, con otras MIS como primera componente del vector y otros PDS para estimar la probabilidad de falla, pueden ser consultadas en el apéndice 3.

En primer lugar se muestran los resultados en la Figura 5.9 correspondientes al marco de 4 niveles de altura. En este caso vemos que en la Figura 5.9a y Figura 5.9b se obtiene un comportamiento donde la tendencia parece ser plana a lo largo de la MIS, lo cual representa una baja influencia sobre su capacidad para estimar curvas de fragilidad en ambos casos. La situación mejora para la Figura 5.9c donde se ve un incremento significativo conforme la duración aumenta haciéndolo también así la probabilidad de falla. La Figura 5.9d tiende a comportarse como los dos primeros vectores que se ven poco influenciados en la respuesta estructural. Otro cambio significativo se puede apreciar en la Figura 5.9e que representa a un parámetro de forma espectral, notándose una influencia clara en la probabilidad de falla al utilizar esta MISV. Lo mismo sucede para el caso de la Figura 5.9f y Figura 5.9g aunque en menor medida puesto que la regresión no es tan pronunciada. Por último, para el caso de la Figura 5.9h vuelve a presentar un comportamiento más apropiado e incluso superior a las otras MISV puesto que la probabilidad de falla se ve claramente influenciada conforme la MIS se incrementa, lo cual es precisamente lo que se busca en estas MISV.

Para el caso del marco de 7 niveles de altura, se observa un comportamiento similar en comparación con el de 4 niveles. En la Figura 5.10a vuelve a presentar una nula respuesta a medida que AMS se incrementa. En el caso de VMS (Figura 5.10b) parece haber una mejora, aunque sin representar un cambio significativo puesto que la superficie sigue presentando comportamiento plano. En referencia a t_D (Figura 5.10c) sigue manteniendo un buen comportamiento mostrando influencia a medida que se incrementa la duración, caso contrario a lo que hace I_D en la Figura 5.10d, puesto que su capacidad de influir en la probabilidad de falla se ve disminuida debido a que no hay incremento en la probabilidad de falla pese a que se incrementa la MIS. N_{pSa} mejora su comportamiento con respecto a la figura anterior puesto que su capacidad de estimar la superficie de fragilidad se ve influenciada cuando se incrementa esta medida (Figura 5.10e). En la Figura 5.10f, N_{pV} muestra un buen comportamiento, pero ligeramente inferior al de las otras MISV con parámetros de forma espectral. En el caso de N_{pSv} , su gráfica muestra una buena curva al incrementar el valor de la MISV (Figura 5.10g). Por último, N_{pEI} también tiene un comportamiento aceptable (Figura 5.10h) y muestra que para valores relativamente grandes tiende a fallar rápidamente.

Posteriormente, referente al marco de 10 niveles de altura, su esbeltez parece no afectar en la estimación de las superficies de fragilidad puesto que no varían mucho sus resultados donde se puede apreciar la misma tendencia de las dos figuras anteriores. Prueba de ello se muestra en la Figura 5.11 primeramente en Figura 5.11a y Figura 5.11b que prácticamente son iguales excepto que ésta última tiene una curvatura más pronunciada, pero que para efectos de confiabilidad como estimador de las superficies de fragilidad queda rezagada lo cual se aprecia en su comportamiento plano pese al incremento de la MIS. Lo mismo sucede con t_D e I_D (Figura 5.11c y Figura 5.11d respectivamente) pues presentan mejoras en la probabilidad de falla, pero no suficientes como para determinar su uso como MISV en estudios de fragilidad sísmica. Lo interesante viene nuevamente con las MISV

basadas en la forma espectral debido a que en la Figura 5.11e se puede apreciar nuevamente un comportamiento apropiado acorde con la RLM lo que da certidumbre en la confiabilidad al usar esta MISV dado el comportamiento deseado de influir en la PF al incrementar la MIS. Para el caso de la Figura 5.11g resulta muy similar a todas las MISV basadas en la forma espectral, de hecho, para este marco son muy parecidos los escenarios. En la Figura 5.11f también se obtiene una buena superficie de fragilidad en comparación con otras MISV considerando que se aprecia un incremento en la PF conforme se incrementa esta medida. Por último, en la Figura 5.11h. se obtiene una gráfica que estima con buena aproximación la PF, haciéndolo de manera consistente para los tres marcos anteriores.

En la Figura 5.12 correspondiente al marco de 15 niveles podemos apreciar gráficos similares a los párrafos anteriores. En la Figura 5.12a se repite el comportamiento plano a lo largo de AMS, junto con la Figura 5.12b que no incrementa la probabilidad de falla al aumentar VMS. Posteriormente viene t_D en la Figura 5.12c, que muestra indicios de una influencia a medida que se varían los valores de esta MIS, a diferencia de I_D que no muestra esa ventaja (Figura 5.12d) e incluso en algunos casos es la que presenta un comportamiento más pobre debido a su nula influencia conforme se incrementa esta medida. Respecto a las MIS basadas en la forma espectral logramos ver una mejora significativa en el caso de N_{psa} (Figura 5.12e) que rápidamente muestra que la probabilidad de falla incrementa conforme se va incrementando esta MIS. Algo similar, aunque en menor medida, sucede con N_{pv} en la Figura 5.12f puesto que su influencia no es tan clara como en el caso anterior. En el caso de la Figura 5.12g tenemos una ligera mejora respecto a la gráfica anterior puesto que la superficie se ve más nítida en su movimiento producido por la influencia de la MIS. Lo anterior se hace todavía más notorio para N_{pei} , tal y como se muestra en la Figura 5.12h con una superficie que claramente influye en la estimación de la probabilidad de falla conforme se va incrementando esta medida basada en la forma espectral.

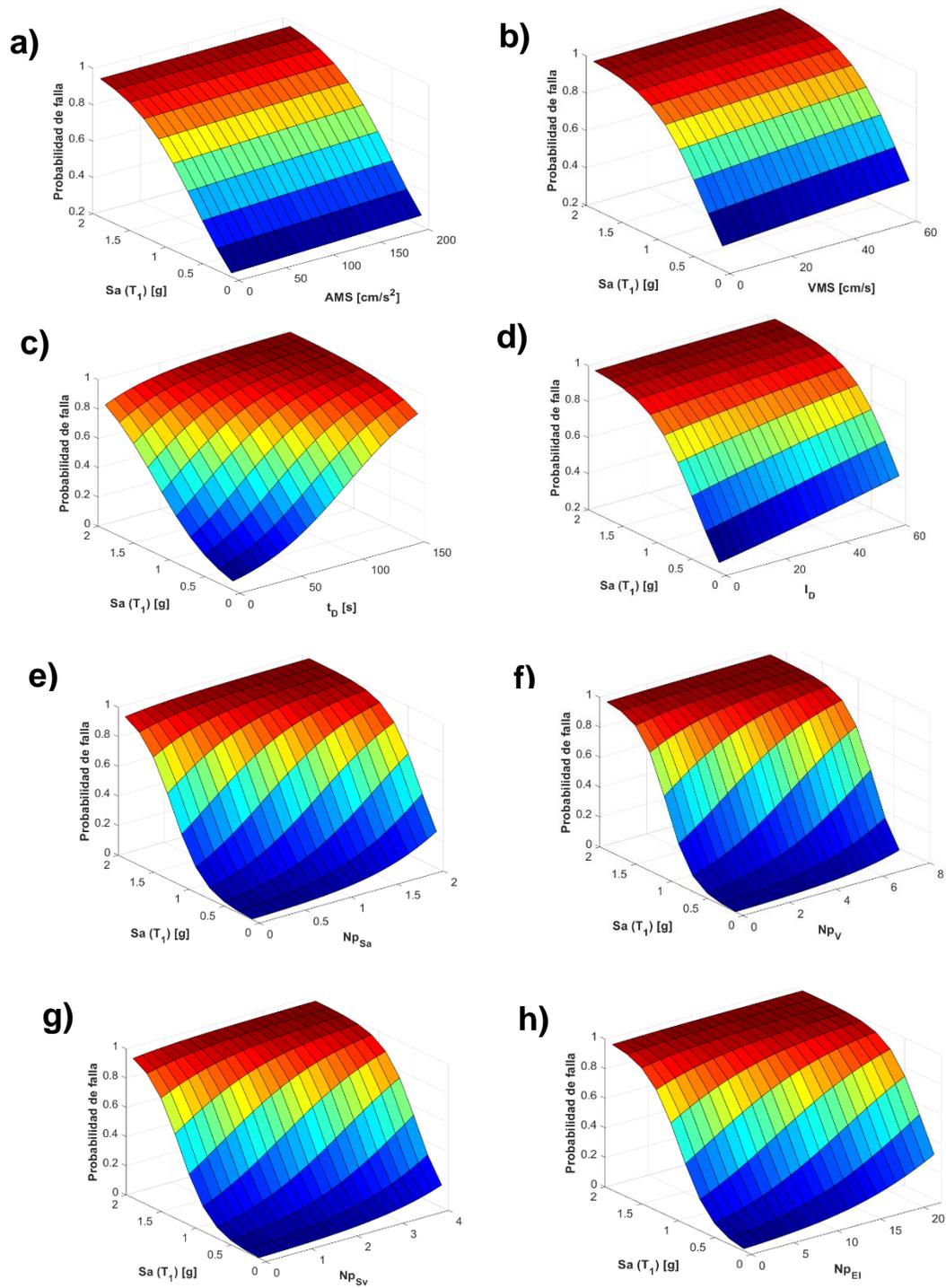


Figura 5.9 Superficies de fragilidad del marco 4N con S_a como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_d , d) I_d , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{sv}}$ y h) $N_{p_{ei}}$ como segunda para la DME como PDS.

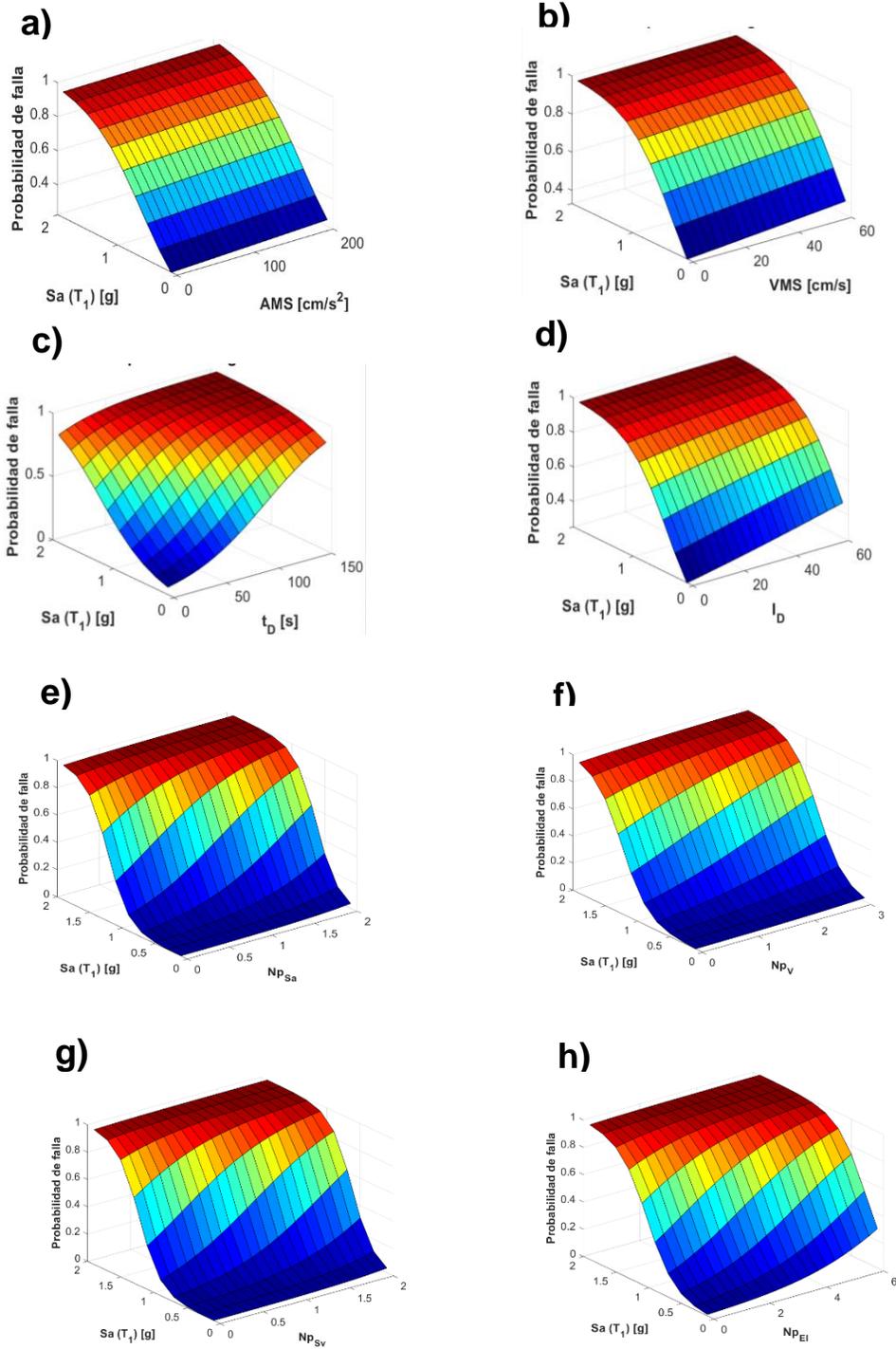


Figura 5.10 Superficies de fragilidad del marco 7N con Sa como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_d , d) I_d , e) N_{pSa} , f) N_{pv} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda para la DME como PDS.

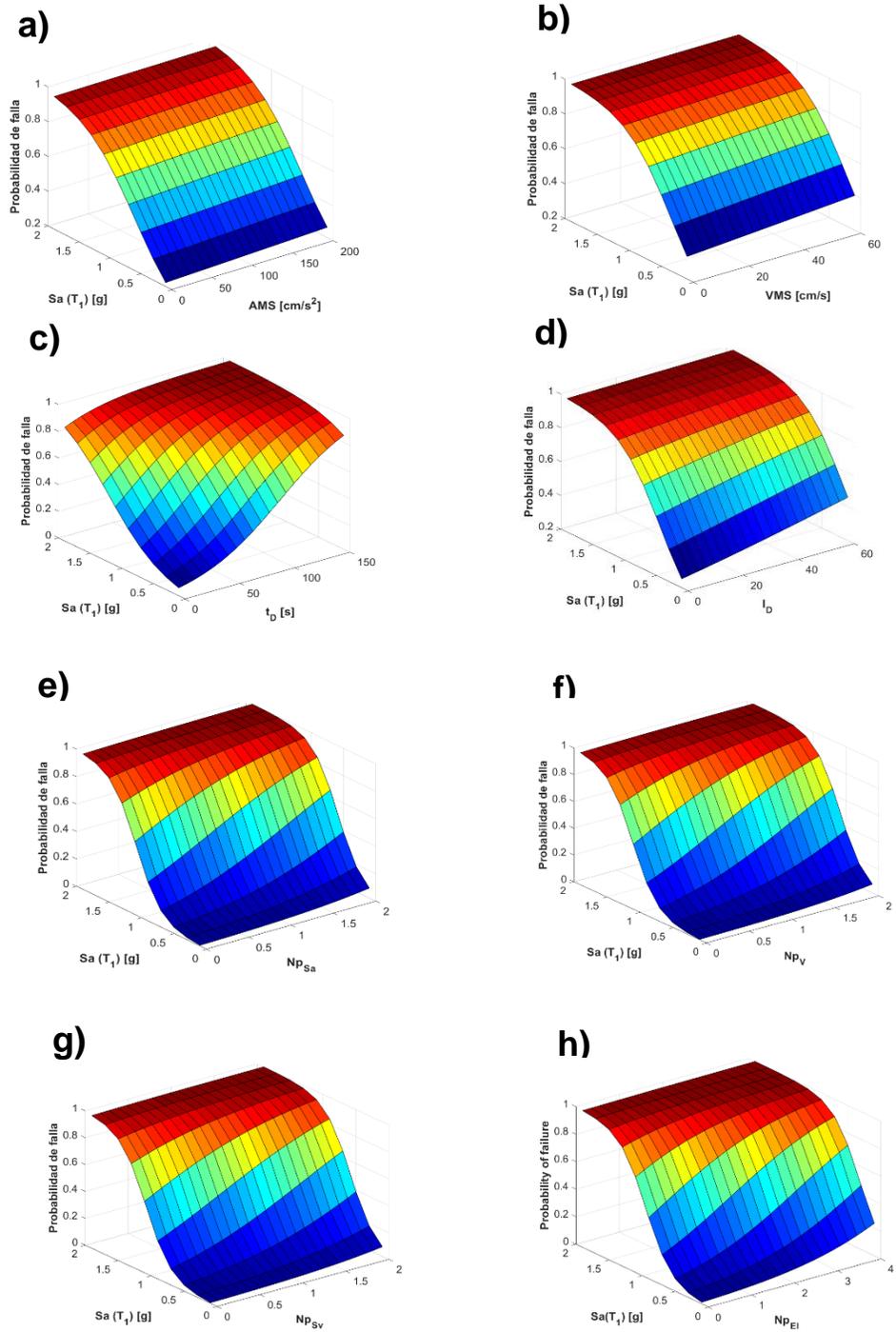


Figura 5.11 Superficies de fragilidad del marco 10N con S_a como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda para la DME como PDS.

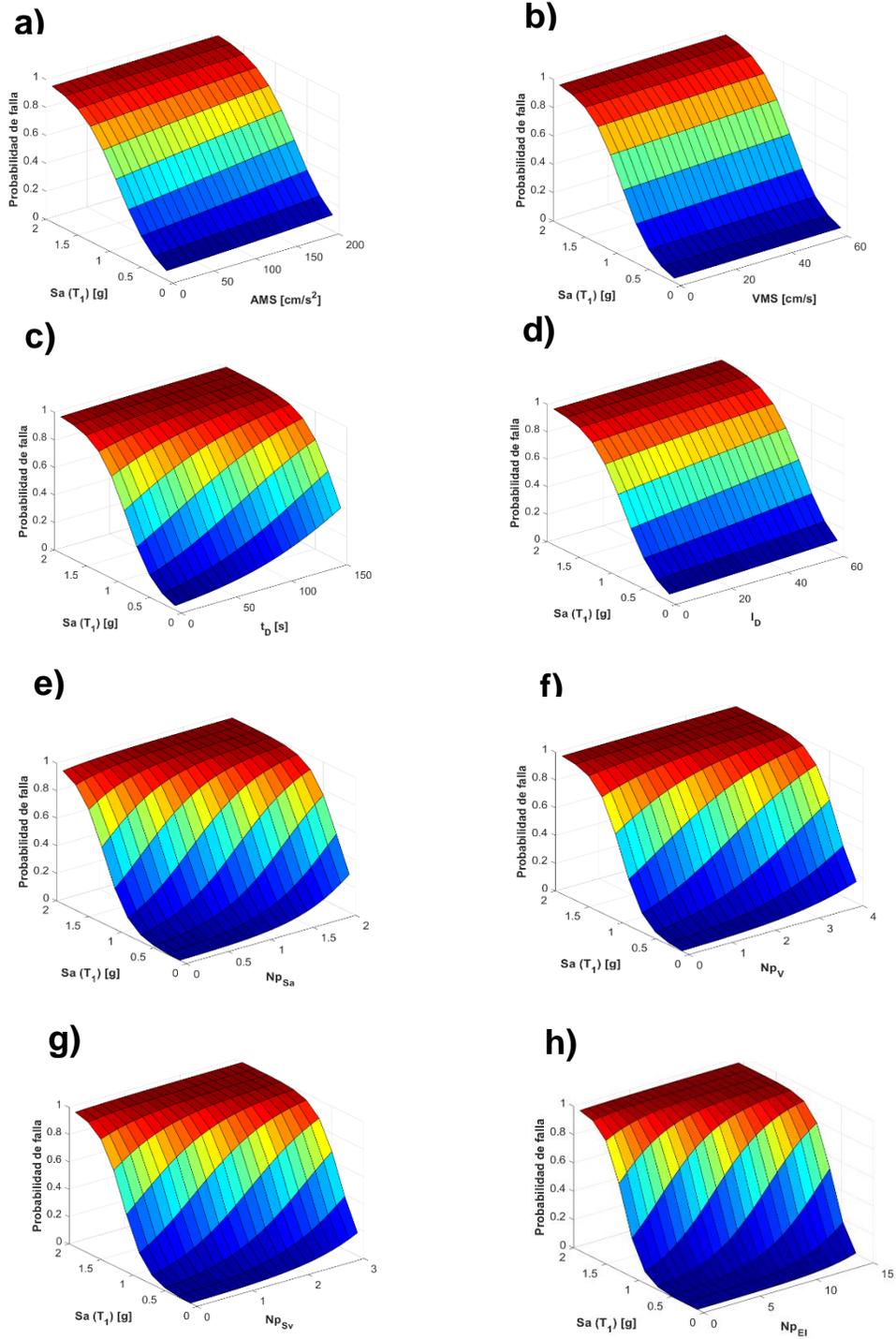


Figura 5.12 Superficies de fragilidad del marco 15N con Sa como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_d , d) I_d , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para la DME como PDS.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se establecen los comentarios más destacados tomando como referencia los resultados mostrados en el capítulo anterior. Además se establecen los inconvenientes, ventajas y diferencias que se tuvieron durante la investigación y el procesamiento de la información. Por último, se evalúa el panorama general de cada fase de trabajo y cómo esta se compara o complementa con trabajos previos de otros autores.

6.1 De las medidas de intensidad sísmica

Del análisis dinámico incremental se aprecia cuál es la dispersión de los resultados al utilizar una MIS como primera componente del vector en relación con el PDS. La Tabla 6-1 considera a S_a , V , E_I , I_{Np} e I_B como primera componente del vector en conjunto con las 8 MIS que componen a la MISV, así como el tipo de respuesta que la caracteriza. Las MISV tienen un efecto importante en la estimación de la fragilidad sísmica. Algunas son mejores que otras en algunos casos puntuales, pero en general las MISV son superiores a las MIS tradicionales cuando se analizan comportamientos de la estructura no lineales, sobre todo las MISV basadas en la forma espectral debido a su influencia en la probabilidad de falla, como quedó contrastado en el capítulo anterior. La primera componente del vector es crucial porque a partir de ella se hace el escalamiento, lo que se traduce en la obtención del parámetro de demanda sísmica elegido y a su vez en la probabilidad de falla. La segunda componente del vector tiene un efecto directo en la estimación de las superficies de fragilidad debido a que dictan el comportamiento del sistema estructural en función del valor que se asigne. En este caso se obtuvieron 40 MISV (10 basadas en respuesta máxima, 10 en duración y finalmente 20 en la forma espectral). Es importante resaltar que algunas MIS son más fáciles de aplicar que

otras, por ejemplo el caso de Sa donde resulta conveniente escalar para este valor en comparación con Ei, donde el espectro es un poco más difícil de determinar. Por ello resulta congruente lo establecido por otros autores respecto a la conveniencia de utilizar Sa cuando se analizan estructuras en el rango de comportamiento lineal. Respecto a las MIS como segunda componente, el uso de aquellas basadas en respuesta máxima es muy sencillo de obtener. En el caso de MISV basadas en duración y forma espectral conlleva algo más de complejidad en su formulación, pero está justificado su uso por la importancia de los resultados.

Tabla 6-1 Conjunto de MISV utilizadas durante este estudio

MISV	Respuesta Máxima	Duración	Forma Espectral
<Sa, AMS >	*		
<Sa, VMS >	*		
<Sa, tD>	*	*	
<Sa, ID>	*	*	
<Sa, Np _{Sa} >	*		*
<Sa, Np _V >	*		*
<Sa, Np _{Sv} >	*		*
<Sa, Np _{EI} >	*		*
<V, AMS >	*		
<V, VMS >	*		
<V, tD>	*	*	
<V, ID>	*	*	
<V, Np _{Sa} >	*		*
<V, Np _V >	*		*
<V, Np _{Sv} >	*		*
<V, Np _{EI} >	*		*
<Ei, AMS >	*		
<Ei, VMS >	*		
<Ei, tD>	*	*	
<Ei, ID>	*	*	
<Ei, Np _{Sa} >	*		*
<Ei, Np _V >	*		*
<Ei, Np _{Sv} >	*		*
<Ei, Np _{EI} >	*		*
<I _{Np} , AMS >	*		*
<I _{Np} , VMS >	*		*

MISV	Respuesta Máxima	Duración	Forma Espectral
< I _{Np} , t _D >		*	*
< I _{Np} , I _D >		*	*
< I _{Np} , N _{psa} >			*
< I _{Np} , N _{pv} >			*
< I _{Np} , N _{psv} >			*
< I _{Np} , N _{pEI} >			*
< I _B , AMS >	*		*
< I _B , VMS >	*		*
< I _B , t _D >		*	*
< I _B , I _D >		*	*
< I _B , N _{psa} >			*
< I _B , N _{pv} >			*
< I _B , N _{psv} >			*
< I _B , N _{pEI} >			*

* Corresponde al tipo de respuesta que caracteriza a la MIS.

6.2 De los edificios y registros sísmicos

Los modelos analizados constaron de cuatro ECR de 4, 7, 10 y 15 niveles de 3.5 metros de altura cada uno. En referencia al modelado de los edificios, existen múltiples softwares de elemento finito que deberían llevar al usuario a la obtención de elementos mecánicos similares a los del presente estudio. No se hace hincapié en el software utilizado debido a que se tiene la libertad de utilizar cualquier otro software y obtener los elementos necesarios para ingresarlo al programa RUAUMOKO. Lo anterior para evitar comprometer al investigador a aprender el uso de un nuevo software que conlleva más horas dedicadas a lo que se destina al modelado en sí. El autor le da más importancia a un correcto diseño basado en los reglamentos de construcción vigente donde ahí puede haber más variación en función de las condiciones que se consideren. El diseño sísmico de edificaciones queda fuera de los alcances de esta investigación y se motiva al lector, o cualquiera que quiera llevar a cabo la comprobación de esta investigación, que procure diseñar con el reglamento aquí referenciado para evitar diferencias significativas en el modelado. Respecto al software RUAUMOKO su aplicación debe ser cuidadosa a la hora de introducir los datos debido al amplio número de variables que requiere

como datos de entrada. Se debe estudiar a fondo el manual para el dominio apropiado de las herramientas con las que cuenta, sobre todo en la definición de las propiedades de la sección transversal. La ventaja de utilizar este software sobre uno comercial está en la capacidad de procesamiento del archivo ejecutable, debido a que la carga computacional sería mayor al tratarse de un software con interfaz gráfica que deba ir mostrando paso a paso el procedimiento. La desventaja para el software RUAMOKO se establece en su interfaz poco amigable con el usuario que debe ajustar cada parámetro en el formato de texto requerido.

Respecto a la selección de registros se llevó a cabo tomando en consideración aquellos que fuesen característicos de la CDMX, presentando magnitudes mayores o iguales a 6.8 en la escala de magnitud de momento (M_w), dado que estos someten a las estructuras a mayores demandas en comparación con otro tipo de sismos. La búsqueda arrojó un total de 6 sismos (30 historias de tiempo) de banda angosta ocurridos en la Costa Mexicana del Pacífico con los que se contaba registros en las distintas estaciones sísmicas de la ciudad. Se utilizó una base de datos previamente seleccionada en la literatura, con la finalidad de hacer una comparativa con estudios previos. Por último, el escalamiento de los registros es un proceso sencillo pero de cuidado al momento de analizar las historias de tiempo porque puede llevar a factores de escala que no correspondan al sismo en cuestión. La obtención de espectros y factores de escala es simple de obtener mediante softwares comerciales o una rutina propia en Matlab. La clave fundamental en este proceso es el orden, debido a que la cantidad de datos que se manejan es muy grande y puede llevar a errores por parte del investigador. Una de las dificultades con las que se cuenta es la adquisición de datos de registros sísmicos. Actualmente es más sencillo, sin embargo, se tiene que hacer una búsqueda exhaustiva en la base de datos del Servicio Sismológico Nacional (SSN) y extraer la información requerida sin distorsionar la señal del sismo. Un inconveniente importante es la disponibilidad de los datos debido a que no siempre

se cuenta con el registro o la señal queda inmersa en el ruido del aparato debido a la lejanía con la fuente. Afortunadamente el soporte que se otorga por parte del SSN es muy eficiente y siempre hay alternativas para solucionar los problemas que se vayan presentando.

6.3 Del desempeño sísmico

Para el ADI se aplica el enfoque utilizado por Vamvatsikos y Cornell (2002). Los parámetros de demanda sísmica considerados en este estudio fueron la distorsión máxima de entrepiso y la energía histerética. El desempeño estructural bajo cargas sísmicas se obtuvo con el apoyo del software RUAUMOKO 3D y los resultados del análisis sometiendo los ECR a los registros sísmicos se muestran en Figura 6.1 y Figura 6.2 donde se muestra la MIS asociada al parámetro de demanda sísmica y la variación que presenta para cada nivel de escalamiento. Debemos dividir este apartado en distintos enfoques debido a que cada uno tiene su particular grado de importancia. En primer lugar, en referencia a los datos de entrada, se establece que el uso de software es mandatorio debido a la alta carga computacional que lleva hacer este proceso. Aun así es complicado establecer un orden claro sobre el proceso y muchas veces el error humano está latente debido a la gran cantidad de datos que se involucran durante el análisis. Por otro lado, en referencia a los datos de salida, es aún más complicado obtener resultados debido a la gran cantidad de gráficas que se deben procesar y diferenciar entre sí mismas. Es aquí donde se consume la mayor parte del tiempo del estudio. Finalmente en las gráficas mencionadas podemos apreciar que para niveles altos de escalamiento la eficiencia se va perdiendo debido a la gran dispersión de los resultados. También es notorio que conforme el marco de concreto tiene mayor altura la distorsión se va reduciendo. Todo esto ha sido abordado en diferentes estudios que confirman la poca eficiencia que tiene S_a al escalar a niveles que presentan no linealidad en las

estructuras (Baker y Cornell, 2008; Bojórquez y Iervolino, 2011; Cordova *et al.*, 2001; Riddell, 2007; Tothong y Luco, 2007).

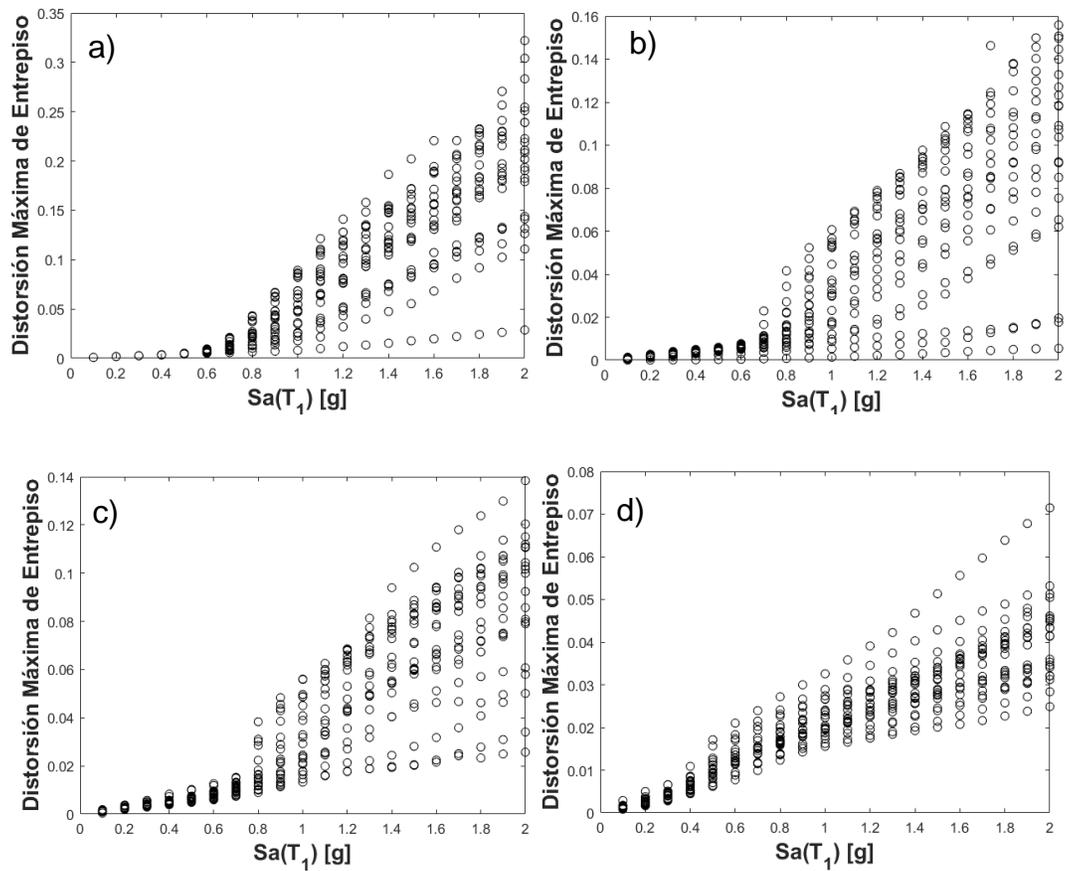


Figura 6.1 ADI para marcos a) 4N, b) 7N, c) 10N y d) 15N con $Sa(T_1)$ como MIS y la DME como PDS.

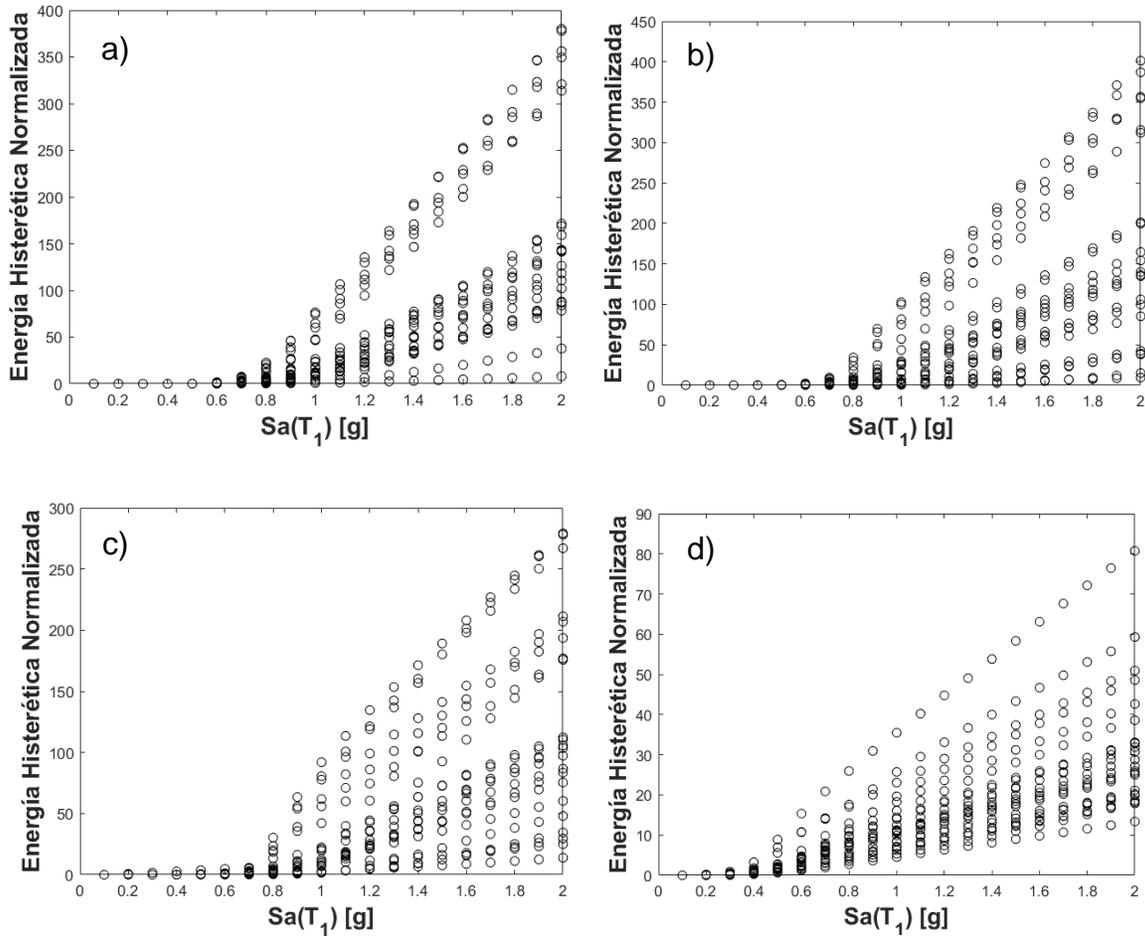


Figura 6.2 ADI para marcos a) 4N, b) 7N, c) 10N y d) 15N con $S_a(T_1)$ como MIS y la E_H como PDS.

Respecto a los parámetros de demanda sísmica, se aprecia una importante influencia en los resultados obtenido, sin embargo, la implementación de la distorsión máxima de entrepiso resulta bastante conveniente porque es un parámetro ampliamente utilizado y que su aplicación a este estudio resulta más sencillo comparado con la energía histerética. No obstante ambos PDS son viables y logrables una vez que se tiene la programación de la obtención de estos parámetros y sobre todo la determinación del valor límite para considerar la falla o no falla del sistema estructural. El análisis dinámico incremental es de los más

completos que hay gracias al programa RUAMOKO que tiene las funciones necesarias para llevar a cabo el análisis básicamente para cada caso que se presente en la práctica. No obstante requiere de una carga computacional elevada y se debe tener mucho cuidado en la correcta selección de los parámetros ingresados al software, de lo contrario puede llevar a resultados variantes con la realidad. El ADI es bastante confiable pero se debe tener en cuenta que ya hay otros tipos de estudios que precisamente buscan demostrar algunos inconvenientes que se pueden presentar, sobre todo al momento de escalar los registros a valores de intensidad deseados con factores exagerados. Haciendo un ADI correcto se puede tener certeza en las curvas de fragilidad debido a que las estimaciones de las MIS son relativamente sencillas por lo que solo debemos enfocarnos en encontrar el PDS que se adecue mejor a nuestras necesidades y con una correcta regresión logística no deberíamos tener problemas en generar las curvas con un nivel de precisión pertinente.

6.4 De la fragilidad sísmica

Previo a destacar los aspectos más relevantes de la estimación de la fragilidad sísmica, es importante recalcar el uso de la regresión logística tanto simple como multinomial. En ambos casos resulta relativamente sencillo aplicar esta técnica, y existen múltiples estudios donde se usa este enfoque (Bojórquez *et al.*, 2012; Kleinbaum y Klein, 2010; Liu *et al.*, 2019) , no solo en ingeniería estructural sino en muchos campos disciplinarios. El uso de la RLS y RLM conlleva a su vez una gran responsabilidad al momento de validar los datos y es que se pueden obtener estimadores del error muy similares para valores beta muy diferentes. Por esto es importante el criterio del investigador el saber interpretar estos resultados y ajustar, sin alterar la información de los datos, la muestra a la gráfica esperada según lo establecido en la literatura. Con eso se puede garantizar el uso correcto

de la información, evitando así la manipulación de la información y el sesgo por parte del analista.

En referencia a la estimación de la fragilidad sísmica, resulta congruente con estudios previos que las MISV sean interesantes en la creación de escenarios que nos muestren su eficiencia. Las curvas de fragilidad son un caso bastante revelador de comportamiento de estas MIS. El trazo de estas curvas es sencillo y muy intuitivo para dar una idea del comportamiento en la estimación de la probabilidad de falla usando estas medidas. En el caso de la estimación de las superficies de fragilidad, resulta entendible que tenga un comportamiento similar a las curvas de fragilidad de la sección anterior. No obstante, se debe tener cuidado en representar de manera apropiada las gráficas tridimensionales debido a la sensibilidad que se puede llegar a tener en la RLM. También se puede mejorar la obtención de estas curvas mediante una programación más limpia en Matlab de manera que no estén tan sujetas a errores por parte del investigador y que haga los cálculos con el menor número de datos de entrada posible. En las siguientes tablas y figuras se muestran las superficies de fragilidad con los mejores estimadores obtenidos en este estudio.

Los resultados anteriores son congruentes con estudios previos en cuanto a eficiencia de MISV se refiere, debido a que ha quedado documentado que las MISV basadas en respuesta máximas y duración no obtienen resultados confiables en la estimación de la respuesta estructural cuando se analizan comportamientos no (Baker, 2007; Baker y Cornell, 2005, 2008; Gehl *et al.*, 2013). También se resalta la reciente literatura que establece la utilidad de las MISV basadas en la forma espectral como medidas más apropiadas en estructuras dominadas por los modos superiores de vibrar y no solo aquellos en el periodo fundamental de vibración (Bojórquez *et al.*, 2015; Bojórquez *et al.*, 2017b; Bojórquez y Iervolino, 2011; Bojórquez *et al.*, 2012; Ge y Zhou, 2018; Torres *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2017).

6.5 Diferencias entre usar diferentes MIS, PDS y/o ECR.

En esta sección, se establecerá una comparativa de algunas superficies obtenidas durante el procesamiento de los resultados de este estudio. Para ello, primeramente se realizó un análisis de distintas gráficas para comparar su comportamiento cuando se varía alguno de los parámetros más importantes (MIS, PDS y ECR). Se decidió enfocarse en las MISV basadas en la forma espectral debido a que por un lado son el tema central de este trabajo, y por el otro, son las que han presentado mejores resultados a lo largo del mismo.

En primera instancia, se optó por cambiar la MIS que se utiliza como primera componente del vector, haciendo una comparativa entre S_a e I_{Np} (Figura 6.3). En este caso podemos apreciar que ambos son buenos estimadores de la respuesta y esto se observa porque que generan superficies de fragilidad bastante similares. En caso que haya que elegir uno de ellos, sería razonable escoger a I_{Np} quien genera superficies ligeramente mejores en comparación con S_a .

Se decidió realizar una comparativa variando el PDS y dejar fijo tanto la MISV como el ECR. Este caso se establece en la Figura 6.4. Se observa que la DME es bastante confiable en todos los casos debido a que se aprecia que la superficie compuesta por las curvas de fragilidad es bastante estable. Además, la energía histerética también cumple muy bien su función como PDS, inclusive en algunos casos superando a los que arroja la DME, sin embargo, si consideramos que el valor límite E_H requiere de un nivel de complejidad en su obtención superior al de la DME que se limita a 0.03, sería entendible que se eligiera este último por su simplicidad. Esta dicotomía puede ser materia de una investigación a mayor profundidad en el futuro pero excede el alcance de esta investigación. En resumen, es viable utilizar ambos PDS, y elegir uno u otro recae en la necesidad del investigador de priorizar

simplicidad con DME, minimizando las diferencias que pudieran o no existir si utilizara E_H.

El edificio 15N, como se observó en el párrafo anterior, presenta distorsiones máximas de entrepiso menores a 0.03 en muchos de los casos, lo que dificulta hacer la regresión, a diferencia de otros marcos como el de 10 niveles. Esto puede solventarse escalando para un nivel de intensidad mayor a 1g, pero generaría un nuevo conjunto de gráficas que podrían ser innecesarias dado que si por ejemplo escalamos para 3g, 4g, 5g...ng, estaríamos rebasando los límites reales a los que puede ser sometida este tipo de estructura en la práctica.

Por último, la Figura 6.5 sí expresa una diferencia significativa al utilizar un ECR u otro. En esta comparativa vemos como para el marco 10N se trazan buenas superficies de fragilidad en contraste contra el marco 4N que si bien no son malas gráficas, sí se observa la diferencia. Esto se debe a que la RLM no captura de manera apropiada el comportamiento de esta MISV para este marco. No siempre sucede esto, pero es interesante cuando menos conocer si la capacidad de las MISV se incrementa a medida que lo hace la altura del edificio o si se mantiene estable independientemente de este parámetro. De primera mano, y con base en el total de resultados de este estudio, se presume que la segunda opción es la más probable de cumplirse.

Por otro lado, usando este mismo criterio para analizar el resto de superficies, y con la intención de optimizar el espacio de esta sección para enfocarse en el resumen de los resultados, se elaboró la Tabla 6-2, en la cual se puede verificar de manera rápida aquellas superficies que tuvieron los mejores resultados y realizar una comparativa contra cualquiera de las superficies obtenidas en el presente estudio. Esto resultará en una ventaja para el lector porque podrá elegir la MISV, el ECR y el PDS que desee para validar la información y enfocarse en aquellas que requieran más de su atención.

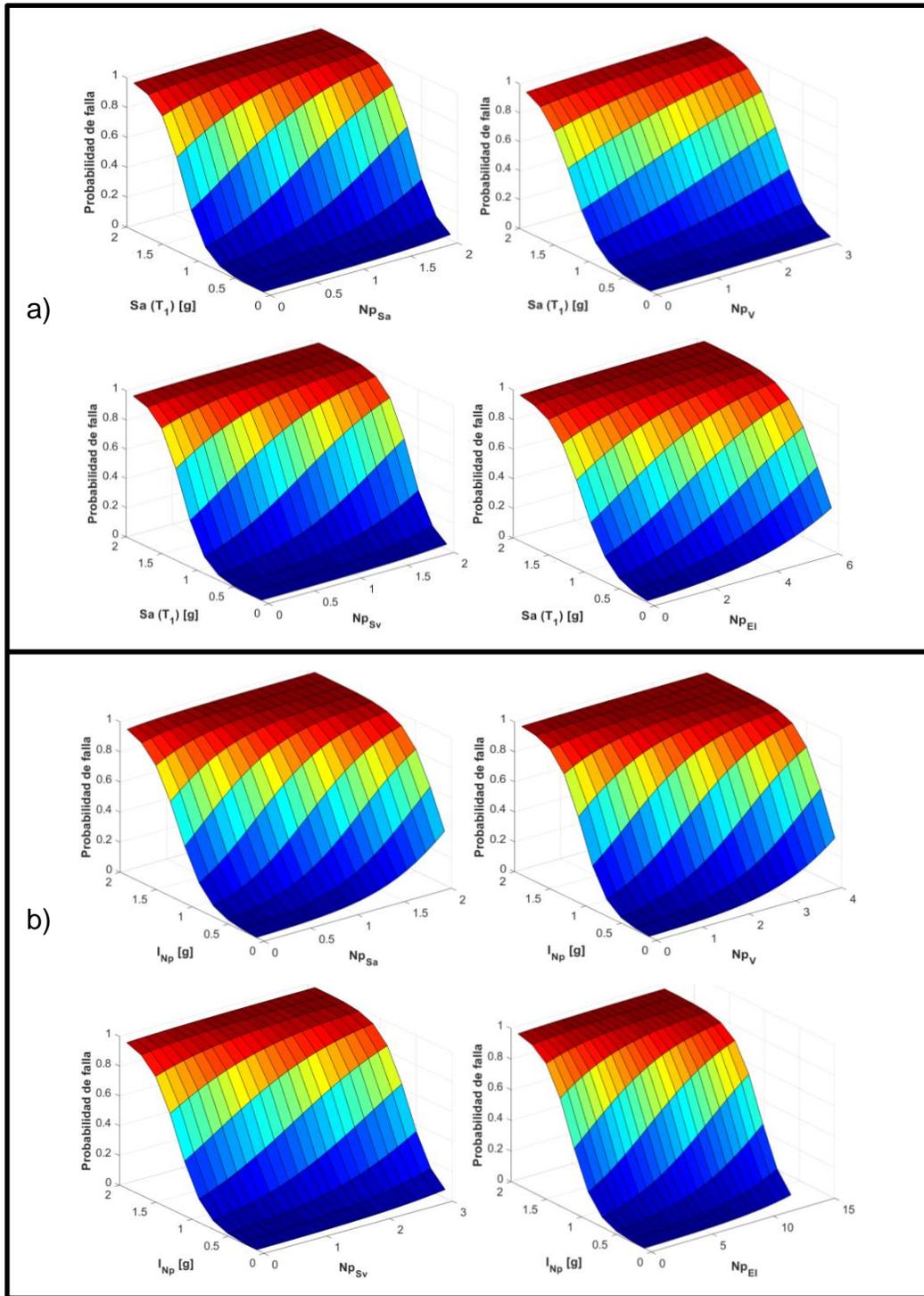


Figura 6.3 Comparativa de la probabilidad de falla usando la DME como PDS en el marco de 7 niveles para las 4 MISV basadas en la forma espectral con a) Sa y b) I_{Np} como primera componente del vector.

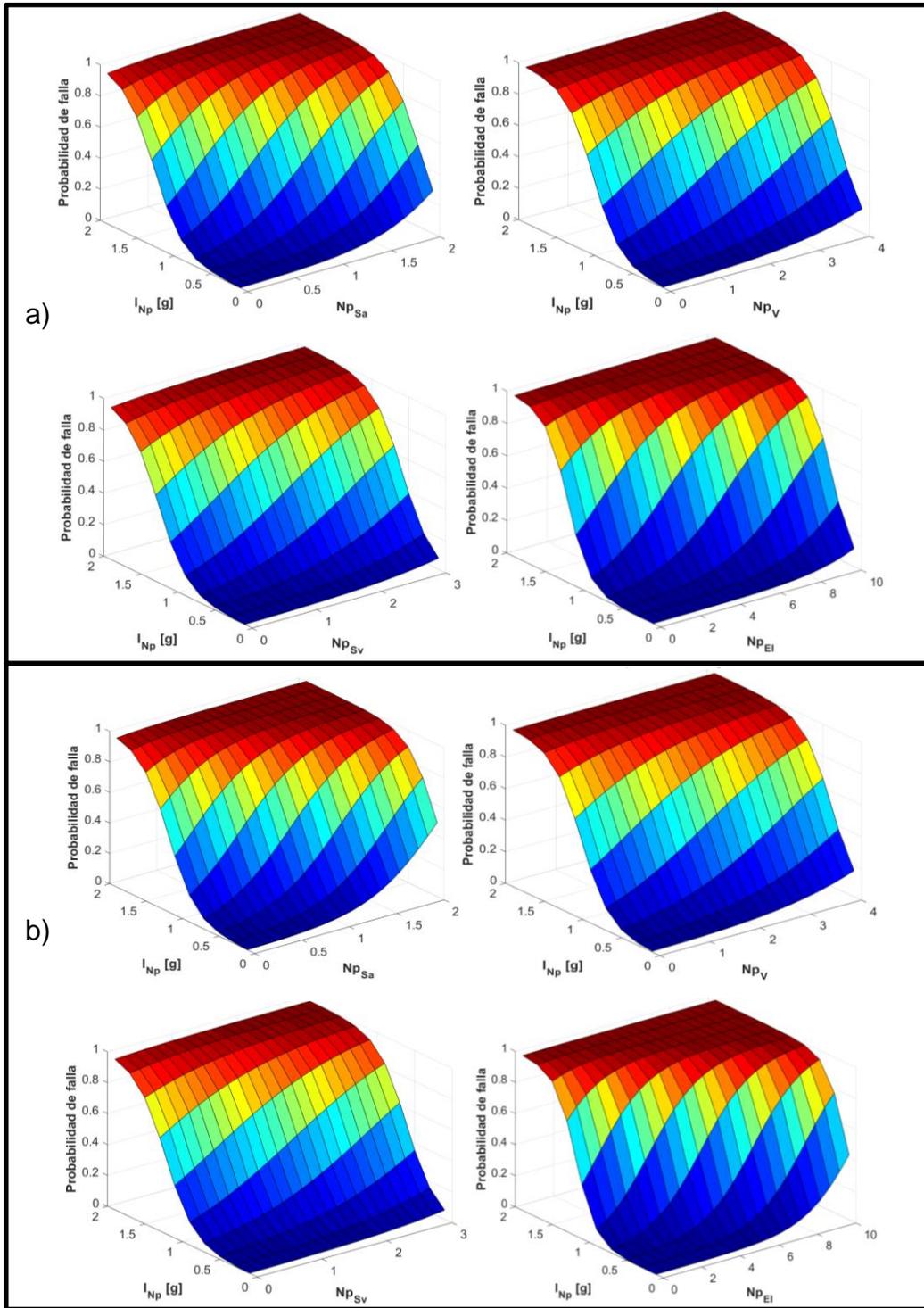


Figura 6.4. Comparativa de la probabilidad de falla usando a) DME y b) E_H como PDS en el marco de 15 niveles para las 4 MISV basadas en la forma espectral con I_{Np} como primera componente del vector.

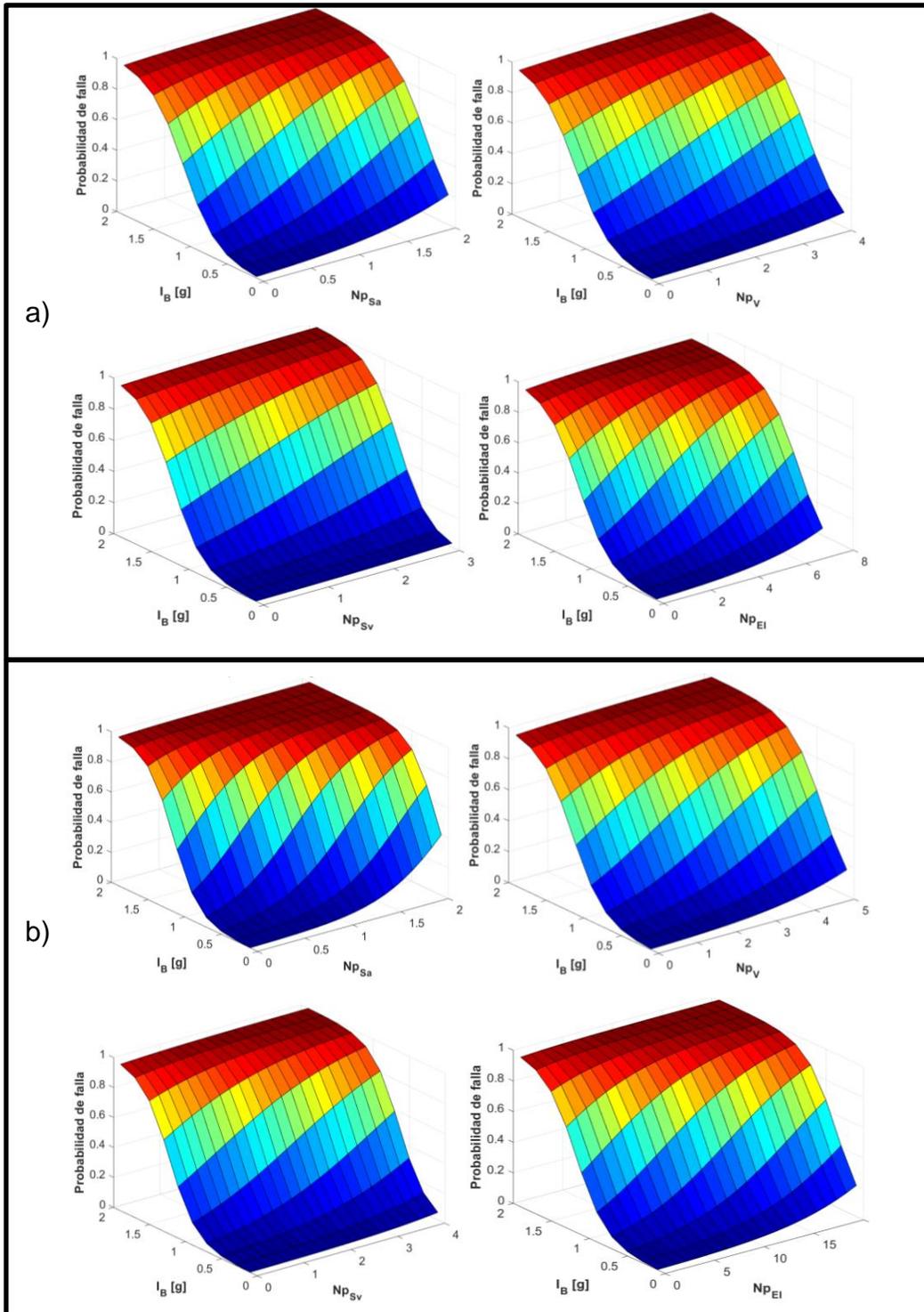


Figura 6.5 Comparativa de la probabilidad de falla usando la E_H como PDS en el marco de a) 4 y b) 10 niveles para las 4 MISV basadas en la forma espectral con I_B como primera componente del vector.

Tabla 6-2 Diferencia entre usar las distintas MISV en comparación con el PDS.

MISV	4N*	7N*	10N*	15N*
<Sa, AMS>	0 0	0 0	0 0	0 0
<Sa, VMS >	0 0	0 0	0 0	0 0
<Sa, tD>	1 0	1 1	1 1	1 1
<Sa, ID>	0 0	0 0	0 0	0 1
<Sa, Np _{Sa} >	1 1	1 1	1 1	1 1
<Sa, Np _V >	1 1	1 0	1 0	1 1
<Sa, Np _{Sv} >	1 1	1 1	1 1	1 1
<Sa, Np _{EI} >	1 1	1 1	1 1	1 1
<V, AMS >	0 0	0 0	0 0	0 0
<V, VMS >	0 0	0 0	0 0	0 1
<V, tD>	0 0	1 1	0 1	0 1
<V, ID>	0 0	1 0	1 1	0 1
<V, Np _{Sa} >	1 1	1 1	1 1	1 1
<V, Np _V >	1 0	0 1	1 1	1 1
<V, Np _{Sv} >	1 1	1 1	1 1	1 1
<V, Np _{EI} >	1 1	1 1	1 1	0 1
<Ei, AMS >	0 0	0 0	0 0	0 0
<Ei, VMS >	0 0	0 0	0 0	0 0
<Ei, tD>	1 0	1 1	1 0	1 0
<Ei, ID>	0 0	0 0	0 0	0 0
<Ei, Np _{Sa} >	1 1	1 1	1 1	1 1
<Ei, Np _V >	1 1	1 1	1 0	1 1
<Ei, Np _{Sv} >	1 1	1 1	1 1	1 1
< E _i , Np _{EI} >	1 1	1 1	1 1	0 1
< I _{Np} , AMS >	0 0	0 0	0 0	0 0
< I _{Np} , VMS >	0 0	0 0	0 0	0 0
< I _{Np} , tD>	0 0	1 1	1 0	0 1
< I _{Np} , ID>	0 0	0 0	0 0	0 0
< I _{Np} , Np _{Sa} >	1 1	1 1	1 1	1 1
< I _{Np} , Np _V >	1 0	1 1	1 1	1 1
< I _{Np} , Np _{Sv} >	0 0	1 1	1 1	1 1
< I _{Np} , Np _{EI} >	1 1	1 1	1 1	1 1
< I _B , AMS >	0 0	0 0	0 0	0 0
< I _B , VMS >	0 0	0 0	0 0	0 0
< I _B , tD>	0 0	1 1	1 0	0 0
< I _B , ID>	0 1	1 1	1 1	0 0
< I _B , Np _{Sa} >	1 1	1 1	1 1	1 1
< I _B , Np _V >	1 1	1 1	1 1	0 1
< I _B , Np _{Sv} >	1 0	1 1	1 1	0 1
< I _B , Np _{EI} >	1 1	1 1	1 1	0 1

*DME|EH;

0= Poca influencia

1= Influencia importante

Los resultados son consistentes con trabajos previos (Amiri y Yakhchalian, 2020; Ge y Zhou, 2018; Yakhchalian *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2017) en referencia a la eficiencia de las MISV, sobre todo en relación a la poca confiabilidad que se tiene en MIS basadas en respuesta máxima y de duración al momento de estimar la respuesta estructural de edificios cuando se analiza comportamiento no lineal. La utilidad de las MISV basadas en la forma espectral, particularmente aquellas basadas en el parámetro N_p , han sido señaladas como una MIS más apropiada (Bojórquez *et al.*, 2017b; Chávez y Bojórquez, 2017; Minas y Galasso, 2019; Torres *et al.*, 2021). La importancia de este estudio atiende las MIS basadas en la forma espectral con diferentes características que representan una mayor eficiencia para estimar la respuesta estructural y aplicar su uso en obtener superficies de fragilidad sísmica considerando la probabilidad de falla de la estructura. Nótese que esta es la primera vez que las superficies de fragilidad son obtenidas usando la velocidad, pseudovelocidad, y energía de entrada normalizada con respecto a la masa (V , S_v , E_I/m respectivamente) como la primera componente del vector. Además, estas superficies de fragilidad consideran N_p basado en diferentes parámetros de forma espectral y no solo basados en S_a .

7. CONCLUSIONES

En este trabajo, se muestra el desarrollo de análisis de fragilidad sísmica en edificios de concreto reforzado aplicando el uso de MISV y distintos parámetros de demanda sísmica. Se estimaron curvas y superficies de fragilidad sísmica considerando 40 MISV compuestas por los parámetros de aceleración espectral en el periodo fundamental de la estructura (S_a), Velocidad (V), Energía de Entrada normalizada con respecto a la masa (E_I/m), I_{N_p} y la intensidad de Bojórquez (I_B) como primer componente del vector, mientras que AMS , VMS , t_D , I_D , $N_{p_{S_a}}$, N_{p_V} , $N_{p_{S_v}}$ y $N_{p_{E_I}}$ como segunda componente de la MISV. Los casos de estudio

correspondieron a 4 edificios de concreto reforzado sometidos a 30 registros sísmicos de banda angosta, desempeñando para ello 20 análisis dinámicos incrementales considerando a la distorsión máxima de entrepiso y la energía histerética como parámetros de demanda sísmica y se obtuvieron un total de 320 superficies de fragilidad sísmica. Para ello fue necesario desarrollar un total de 7,200 registros sísmicos escalados, 4,800 PDS extraídos y 320 curvas de fragilidad.

Previo a enumerar los aspectos más importantes producto de la investigación, es oportuno mencionar los objetivos cumplidos que se plantearon al inicio de este trabajo:

- a) Se determinó que las medidas de intensidad basadas en la forma espectral, especialmente aquellas basadas en el parámetro espectral N_p , son más eficientes para estimar la respuesta estructural que las basadas en respuesta máxima y duración.
- b) La distorsión máxima de entrepiso y la energía histerética funcionan apropiadamente como parámetros de demanda sísmica.
- c) La comparativa entre los métodos tradicionales y el enfoque aquí expuesto arroja diferencias significativas al momento de evaluar la fragilidad sísmica por lo que el uso de uno u otro afectará los resultados de manera importante.

Finalmente, los resultados obtenidos en este estudio permiten hacer las siguientes conclusiones:

1. AMS y VMS tienen poca o nula influencia al ser utilizadas como segunda componente del vector en cada uno de los casos de las MISV.
2. t_D tiende a comportarse apropiadamente en algunos casos, pero fue inconsistente en otros, por lo que su confiabilidad aún requiere mayor

estudio; I_B presenta mejores resultados que AMS y VMS pero su uso no implica una clara ventaja sobre otras MISV con mejores resultados.

3. Las MISV basadas en el parámetro espectral N_p , tienen el mejor comportamiento y se establecen como las mejores estimadoras en la respuesta estructural, al ser más apropiadas en la estimación de la probabilidad de falla para trazar curvas y superficies de fragilidad sísmica.
4. Las MIS con los mejores resultados como primera componente del vector fueron I_{N_p} e I_B debido a que generaron las superficies de fragilidad que fueron más influenciadas al variar el valor de la MISV, presentando la mayor eficiencia al tener una dispersión menor de los resultados al realizar el escalamiento de los registros sísmicos.
5. Se realizó una comparativa de distintos escenarios haciendo variaciones en MIS, PDS y ECR. S_a e I_{N_p} mostraron ser buenos estimadores al ser utilizados como primera componente del vector. DME y E_H cumplen su función como PDS y su utilización dependerá del caso de estudio. El ECR tuvo una influencia importante la comparativa de 4N vs 10N; sin embargo, esto no significa que sea así para el resto de edificios. Se requiere una mayor investigación para edificios con diferentes alturas y topologías.

El presente estudio ha demostrado las ventajas de utilizar MISV basadas en la forma espectral por encima de las demás MIS basadas en respuesta máximas y duración. La eficiencia para predecir la probabilidad de falla se incrementa cuando se seleccionan MISV basadas en el parámetro de forma espectral N_p . Resulta interesante trabajar esta línea de investigación en el futuro con intenciones de mejorar las MIS utilizadas en el diseño de estructuras para fines de optimizar costos y/o funcionamiento sin comprometer la seguridad estructural. Los resultados aquí obtenidos sirven como base para trabajos futuros y pueden ser implementados para aplicarse en otro tipo de edificaciones o mejorar los reglamentos de construcción actuales.

REFERENCIAS

- Ambher. (2014). Resonancia en estructuras. Retrieved from <https://www.ambher.com/infraestructura/resonancia-en-estructuras>
- Amiri, M., & Yakhchalian, M. (2020). Performance of intensity measures for seismic collapse assessment of structures with vertical mass irregularity. *Structures*, 24, 728-741. doi:10.1016/j.istruc.2020.01.038
- Anand, V., & Satish Kumar, S. R. (2018). Seismic Soil-structure Interaction: A State-of-the-Art Review. *Structures*, 16, 317-326. doi:10.1016/j.istruc.2018.10.009
- Arias, A. (1970). A measure of earthquake intensity. In Seismic Design for Nuclear Power Plants. *Institute of Technology Press*.
- Baker, J. W. (2007). Probabilistic structural response assessment using vector-valued intensity measures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(13), 1861-1883. doi:10.1002/eqe.700
- Baker, J. W. (2015). Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis. *Earthquake Spectra*, 31(1), 579-599. doi:10.1193/021113EQS025M
- Baker, J. W., & Allin Cornell, C. (2006). Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(9), 1077-1095. doi:10.1002/eqe.571
- Baker, J. W., & Cornell, A. C. (2005). A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(10), 1193-1217. doi:10.1002/eqe.474
- Baker, J. W., & Cornell, A. C. (2008). Vector-valued intensity measures for pulse-like near-fault ground motions. *Engineering Structures*, 30(4), 1048-1057. doi:10.1016/j.engstruct.2007.07.009

- Baker, J. W., & Lee, C. (2017). An Improved Algorithm for Selecting Ground Motions to Match a Conditional Spectrum. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(4), 708-723. doi:10.1080/13632469.2016.1264334
- Bojorquez, E., Astorga, L., Reyes-Salazar, A., Teran-Gilmore, A., Velazquez, J., Bojorquez, J., & Rivera, L. (2015). Prediction of hysteretic energy demands in steel frames using vector-valued IMs. *Steel and Composite Structures*, 19(3), 697-711. doi:10.12989/scs.2015.19.3.697
- Bojórquez, E., Baca, V., Bojórquez, J., Reyes-Salazar, A., Chávez, R., & Barraza, M. (2017a). A simplified procedure to estimate peak drift demands for mid-rise steel and R/C frames under narrow-band motions in terms of the spectral-shape-based intensity measure INp. *Engineering Structures*, 150, 334-345. doi:10.1016/j.engstruct.2017.07.046
- Bojórquez, E., Chávez, R., Reyes-Salazar, A., Ruiz, S. E., & Bojórquez, J. (2017b). A new ground motion intensity measure IB. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 99, 97-107. doi:10.1016/j.soildyn.2017.05.011
- Bojórquez, E., & Iervolino, I. (2011). Spectral shape proxies and nonlinear structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7), 996-1008. doi:10.1016/j.soildyn.2011.03.006
- Bojórquez, E., Iervolino, I., Reyes-Salazar, A., & Ruiz, S. E. (2012). Comparing vector-valued intensity measures for fragility analysis of steel frames in the case of narrow-band ground motions. *Engineering Structures*, 45, 472-480. doi:10.1016/j.engstruct.2012.07.002
- Bojórquez, E., Reyes-Salazar, A., & Ruiz, S. E. (2014). On the Use of Vector-Valued Intensity Measure to Predict Peak and Cumulative Demands of Steel Frames under Narrow-Band Motions. *Applied Mechanics and Materials*, 595, 137-142. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.595.137
- Buratti, N. (2012). A comparison of the performances of various ground-motion intensity measures. *The 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal*.

- Carr, A. (2015). *Ruamoko 3D manual*. University of Canterbury.
- Chávez, R., & Bojórquez, E. (2016). Probabilistic seismic hazard analysis using a new ground motion intensity measure. *Dyna*, 83(195), 206-215. doi:10.15446/dyna.v83n195.50231
- Chávez, R., & Bojórquez, E. (2017). Seismic hazard maps based on the intensity measure INp. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(1), 247-256. doi:10.1007/s12205-017-1371-6
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de Estructuras* (4 ed.). Prentice Hall: Pearson Education. ISBN 978-607-32-2239-6.
- Cordova, P., Deierlein, G. G., Mehanny, S., & Cornell, A. C. (2001). *Development of a two-parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure*. Retrieved from
- Cosenza, E., Manfredi, G., & Ramasco, R. (1993). The use of damage functionals in earthquake engineering: a comparison between different methods. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 22, 855-868. doi: <https://doi.org/10.1002/eqe.4290221003>
- Crisafulli, F., & Villafañe, E. (2002). *Espectros de respuesta y de diseño*. Retrieved from Ingeniería sismorresistente. Facultad de Ingeniería. Universidad Cuyo:
- Dall'Asta, A., Leoni, G., Meschini, A., Petrucci, E., & Zona, A. (2019). Integrated approach for seismic vulnerability analysis of historic massive defensive structures. *Journal of Cultural Heritage*, 35, 86-98.
- Donaire-Ávila, J., Mollaioli, F., Lucchini, A., & Benavent-Climent, A. (2015). Intensity measures for the seismic response prediction of mid-rise buildings with hysteretic dampers. *Engineering Structures*, 102, 278-295. doi:10.1016/j.engstruct.2015.08.023
- Fajfar, P., Vidic, T., & Fischinger, M. (1990). A measure of earthquake motion capacity to damage medium-period structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 9(5).

- Ge, P., & Zhou, Y. (2018). Investigation of efficiency of vector-valued intensity measures for displacement-sensitive tall buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107, 417-424. doi:10.1016/j.soildyn.2017.12.018
- Gehl, P., Seyed, D. M., & Douglas, J. (2013). Vector-valued fragility functions for seismic risk evaluation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(2), 365-384. doi:10.1007/s10518-012-9402-7
- Geofisicasisospgf. (2012). Periodo fundamental del suelo (Ts). Retrieved from <https://geofisicasisospgf.blogspot.com/p/periodo-fundamental-del-suelo-ts.html>
- Gokkaya, B. U., Baker, J. W., & Deierlein, G. G. (2016). Quantifying the impacts of modeling uncertainties on the seismic drift demands and collapse risk of buildings with implications on seismic design checks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(10), 1661-1683. doi:10.1002/eqe.2740
- Grigoriu, M. (2016). Do seismic intensity measures (IMs) measure up? *Probabilistic Engineering Mechanics*, 46, 80-93. doi:10.1016/j.probengmech.2016.09.002
- Hosseinpour, F., & Abdelnaby, A. E. (2017). Fragility curves for RC frames under multiple earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 98, 222-234. doi:10.1016/j.soildyn.2017.04.013
- Housner, G. W. (1975). Measures of severity of ground shaking. *U.S. Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute*.
- Jalayer, F., Ebrahimian, H., Miano, A., Manfredi, G., & Sezen, H. (2017). Analytical fragility assessment using unscaled ground motion records. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(15), 2639-2663. doi:10.1002/eqe.2922
- Javadi, E., & Yakhchalian, M. (2019). Selection of optimal intensity measure for seismic assessment of steel buckling. Restrained braced frames under Near-Fault ground motions. *Journal of rehabilitation in civil engineering*, 7(4), 114-133. doi:10.22075/JRCE.2018.14908.1278

- Kalateh-Ahani, M., & Amiri, S. (2021). A Park-Ang damage index-based framework for post-mainshock structural safety assessment. *Structures*, 33, 820-829. doi:10.1016/j.istruc.2021.04.039
- Karapetrou, S. T., Fotopoulou, S. D., & Pitilakis, K. D. (2017). Seismic Vulnerability of RC Buildings under the Effect of Aging. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 461-468. doi:10.1016/j.proenv.2017.03.137
- Kassem, M. M., Mohamed Nazri, F., & Noroozinejad Farsangi, E. (2019). Development of seismic vulnerability index methodology for reinforced concrete buildings based on nonlinear parametric analyses. *MethodsX*, 6, 199-211. doi:10.1016/j.mex.2019.01.006
- Kiani, J., Camp, C., & Pezeshk, S. (2018). Role of conditioning intensity measure in the influence of ground motion duration on the structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 408-417. doi:10.1016/j.soildyn.2017.11.021
- Kiani, J., Camp, C., & Pezeshk, S. (2019). The importance of non-spectral intensity measures on the risk-based structural responses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 97-112. doi:10.1016/j.soildyn.2019.01.036
- Kiani, J., & Pezeshk, S. (2017). Sensitivity analysis of the seismic demands of RC moment resisting frames to different aspects of ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(15), 2739-2755. doi:10.1002/eqe.2928
- Kleinbaum, D. G., & Klein, M. (2010). Introduction to Logistic Regression. In *Logistic Regression* (pp. 1-39).
- Kohrangi, M., Vamvatsikos, D., & Bazzurro, P. (2019). Pulse-like versus non-pulse-like ground motion records: Spectral shape comparisons and record selection strategies. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(1), 46-64. doi:10.1002/eqe.3122
- Liu, T.-T., Lu, D.-G., & Yu, X.-H. (2019). Development of a compound intensity measure using partial least-squares regression and its statistical evaluation

based on probabilistic seismic demand analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125. doi:10.1016/j.soildyn.2019.105725

Lucchini, A., Mollaioli, F., & Monti, G. (2011). Intensity measures for response prediction of a torsional building subjected to bi-directional earthquake ground motion. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(5), 1499-1518. doi:10.1007/s10518-011-9258-2

Luco, N. (2002). *Probabilistic seismic demand analysis, SMRF connection fractures, and near-source effects*. Stanford University: PhD. Thesis.

Mai, C., Konakli, K., & Sudret, B. (2017). Seismic fragility curves for structures using non-parametric representations. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(2), 169-186. doi:10.1007/s11709-017-0385-y

Minas, S., & Galasso, C. (2019). Accounting for spectral shape in simplified fragility analysis of case-study reinforced concrete frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 91-103. doi:10.1016/j.soildyn.2018.12.025

Modica, A., & Stafford, P. J. (2014). Vector fragility surfaces for reinforced concrete frames in Europe. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(4), 1725-1753. doi:10.1007/s10518-013-9571-z

Mollaioli, F., Lucchini, A., Cheng, Y., & Monti, G. (2013). Intensity measures for the seismic response prediction of base-isolated buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(5), 1841-1866. doi:10.1007/s10518-013-9431-x

Olteanu, P., Coliba, V., Vacareanu, R., Pavel, F., & Ciuiu, D. (2016). Analytical Seismic Fragility Functions for Dual RC Structures in Bucharest. In *The 1940 Vrancea Earthquake. Issues, Insights and Lessons Learnt* (pp. 463-479).

Omar, A., & Mahmoud, B. (2017). Calculation of seismic vulnerability index for steel structures. *Energy Procedia*, 139, 558-564.

Palanci, M., & Senel, S. M. (2019). Correlation of earthquake intensity measures and spectral displacement demands in building type structures. *Soil Dynamics*

- Pejovic, J., & Jankovic, S. (2015). Seismic fragility assessment for reinforced concrete high-rise buildings in Southern Euro-Mediterranean zone. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(1), 185-212. doi:10.1007/s10518-015-9812-4
- Pérez, M., L.F. (2018). *Análisis Bayesiano de Leyes de Atenuación Sísmica para la Región de la Faja Volcánica Transmexicana*. Tesis de maestría. Facultad de ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Radu, A., & Grigoriu, M. (2018). An earthquake-source-based metric for seismic fragility analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(9), 3771-3789. doi:10.1007/s10518-018-0341-9
- Rajabnejad, H., Hamidi, H., Naseri, S., & Abbaszadedh, M. A. (2021). Effect of intensity measures on the response of a 3D-structure under different ground motion duration. *International Journal of Engineering*, 34(10). doi:10.5829/ije.2021.34.10a.04
- RCDMX. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*. Retrieved from Gaceta Oficial del Distrito Federal, Décima cuarta época, Tomo II, No. 103-BIS:
- Riddell, R. (2007). On ground motion intensity indices. *Earthquake Spectra*, 23(1), 147-173. doi:10.1193/1.2424748
- Teran-Gilmore, A., & Jirsa, J. O. (2004). The use of cumulative ductility strength spectra for seismic design against low cycle fatigue *13th World Conference on Earthquake Engineering*, 889(1).
- Tomeo, R., Bilotta, A., Pitilakis, D., & Nigro, E. (2017). Soil-structure interaction effects on the seismic performances of reinforced concrete moment resisting frames. *Procedia Engineering*, 199, 230-235.

- Torres, J. I. (2018). *Eficiencia de medidas de intensidad sísmica vectorial en la predicción de la respuesta de edificios de C/R.*, Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México.
- Torres, J. I., Bojorquez, E., Reyes-Salazar, A., & Bojorquez, J. (2021). Vector-valued intensity measures to predict peak and hysteretic energy demands of 3D R/C buildings. *Energy-Based seismic engineering*, 155, 274-289. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-73932-4_18
- Tothong, P., & Luco, N. (2007). Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(13), 1837-1860. doi:10.1002/eqe.696
- Trifunac, M. D., & Brady, A. G. (1975). A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3), 581-626. doi:<https://doi.org/10.1785/BSSA0650030581>
- Tsantaki, S., Adam, C., & Ibarra, L. F. (2016). Intensity measures that reduce collapse capacity dispersion of P-delta vulnerable simple systems. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(3), 1085-1109. doi:10.1007/s10518-016-9994-4
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491-514. doi:10.1002/eqe.141
- Wen, W., Zhai, C., Ji, D., Li, S., & Xie, L. (2017). Framework for the vulnerability assessment of structure under mainshock-aftershock sequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 101, 41-52. doi:10.1016/j.soildyn.2017.07.002
- Yakhchalian, M., Nicknam, A., & Amiri, G. G. (2015). Optimal vector-valued intensity measure for seismic collapse assessment of structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 14(1), 37-54. doi:10.1007/s11803-015-0005-6
- Yang, C., Xie, L., Li, A., Jia, J., & Zeng, D. (2019). Ground motion intensity measures for seismically isolated RC tall buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125. doi:10.1016/j.soildyn.2019.105727

- Zain, M., Anwar, N., Najam, F. A., & Mehmood, T. (2019). Seismic Fragility Assessment of Reinforced Concrete High-Rise Buildings Using the Uncoupled Modal Response History Analysis (UMRHA). In *Proceedings of the International Conference on Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (pp. 201-218).
- Zameeruddin, M., & Sangle, K. K. (2016). Review on Recent developments in the performance-based seismic design of reinforced concrete structures. *Structures*, 6, 119-133. doi:10.1016/j.istruc.2016.03.001
- Zentner, I., Gündel, M., & Bonfils, N. (2017). Fragility analysis methods: Review of existing approaches and application. *Nuclear Engineering and Design*, 323, 245-258. doi:10.1016/j.nucengdes.2016.12.021
- Zhou, Y., Ge, P., Han, J., & Lu, Z. (2017). Vector-valued intensity measures for incremental dynamic analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 380-388. doi:10.1016/j.soildyn.2017.06.014

Apéndice 1. Análisis dinámico incremental considerando la energía histerética como parámetro de demanda sísmica en los cuatros marcos de concreto reforzado.

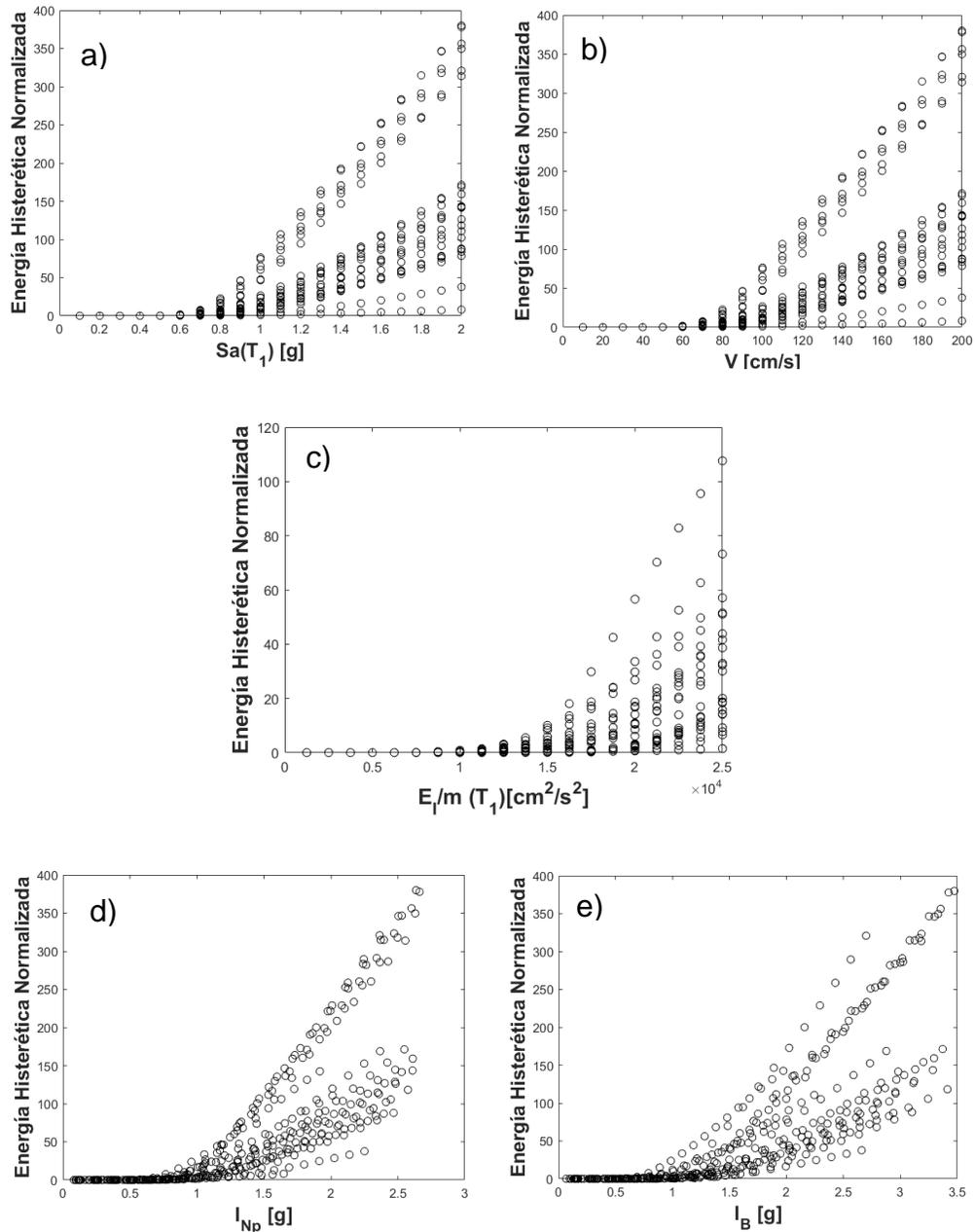


Figura A. 1 Análisis dinámico incremental con E_H como PDS para el marco 4N sometido a los registros sísmicos escalados para a) Sa , b) V , c) E_I/m , d) I_{Np} y e) I_B .

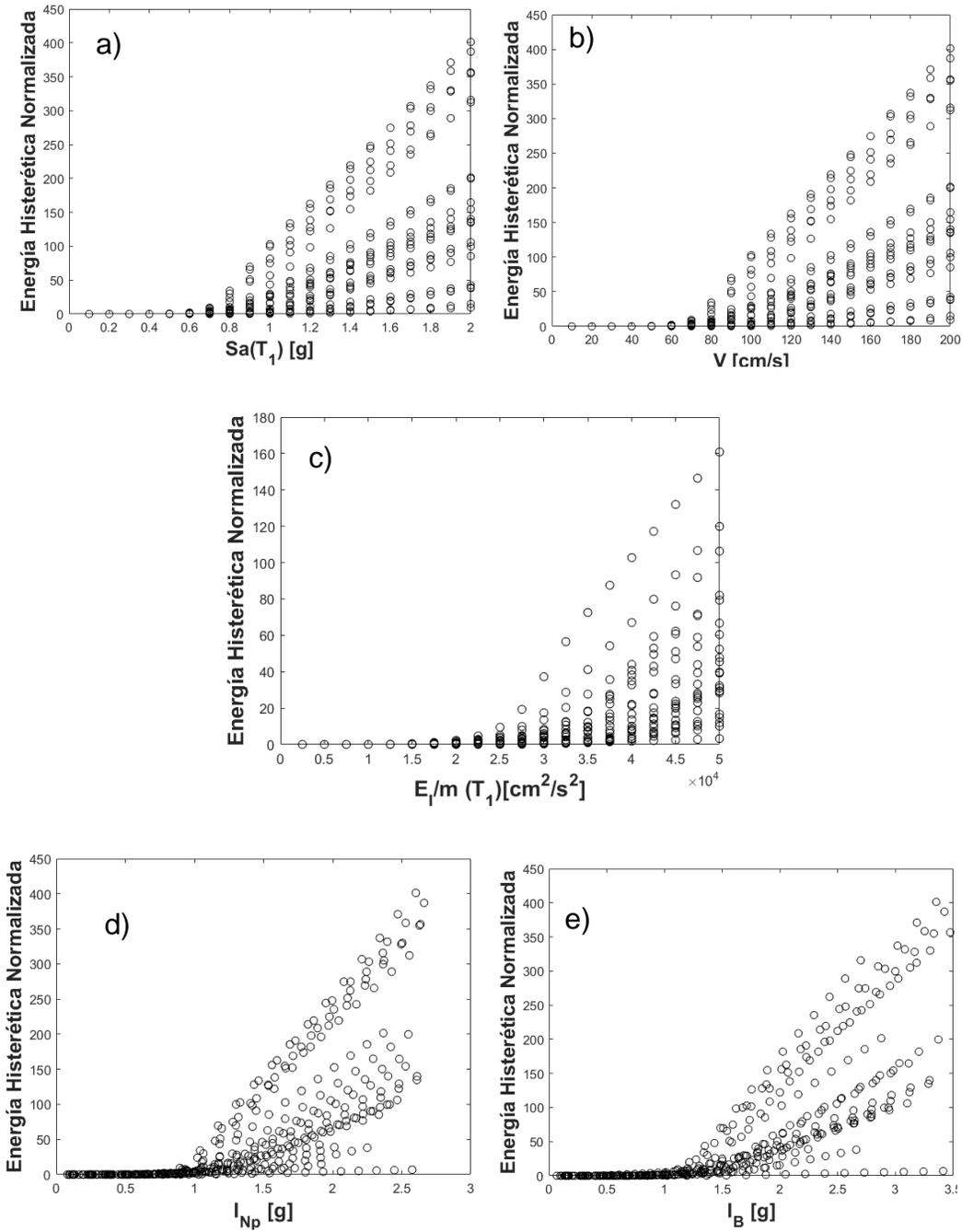


Figura A. 2 Análisis dinámico incremental con E_H como PDS para el marco 7N sometido a los registros sísmicos escalados para a) Sa , b) V , c) E_I/m , d) I_{Np} y e) I_B .

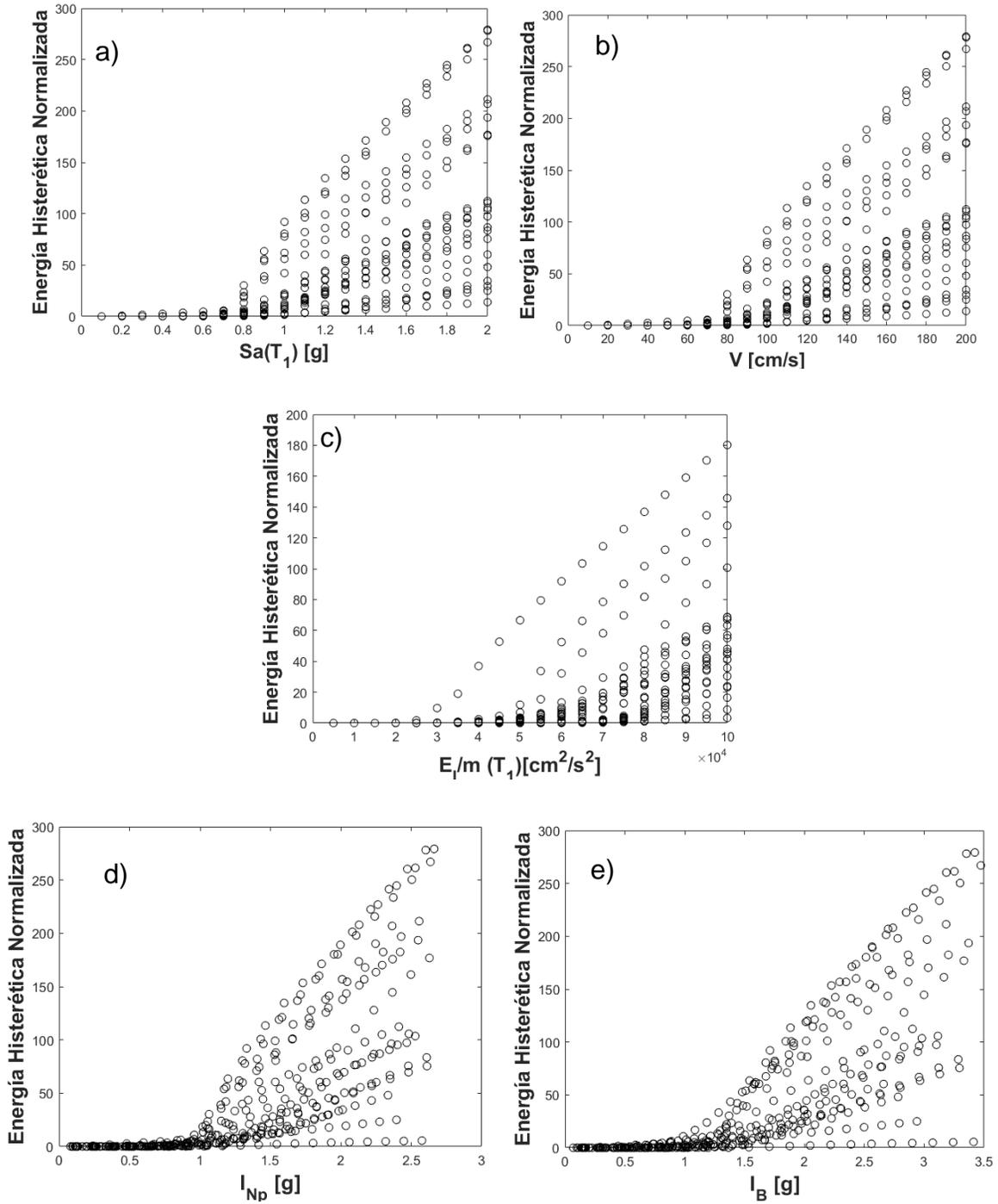


Figura A. 3 Análisis dinámico incremental con E_H como PDS para el marco 10N sometido a los registros sísmicos escalados para a) Sa, b) V, c) E₁/m, d) I_{Np} y e) I_B.

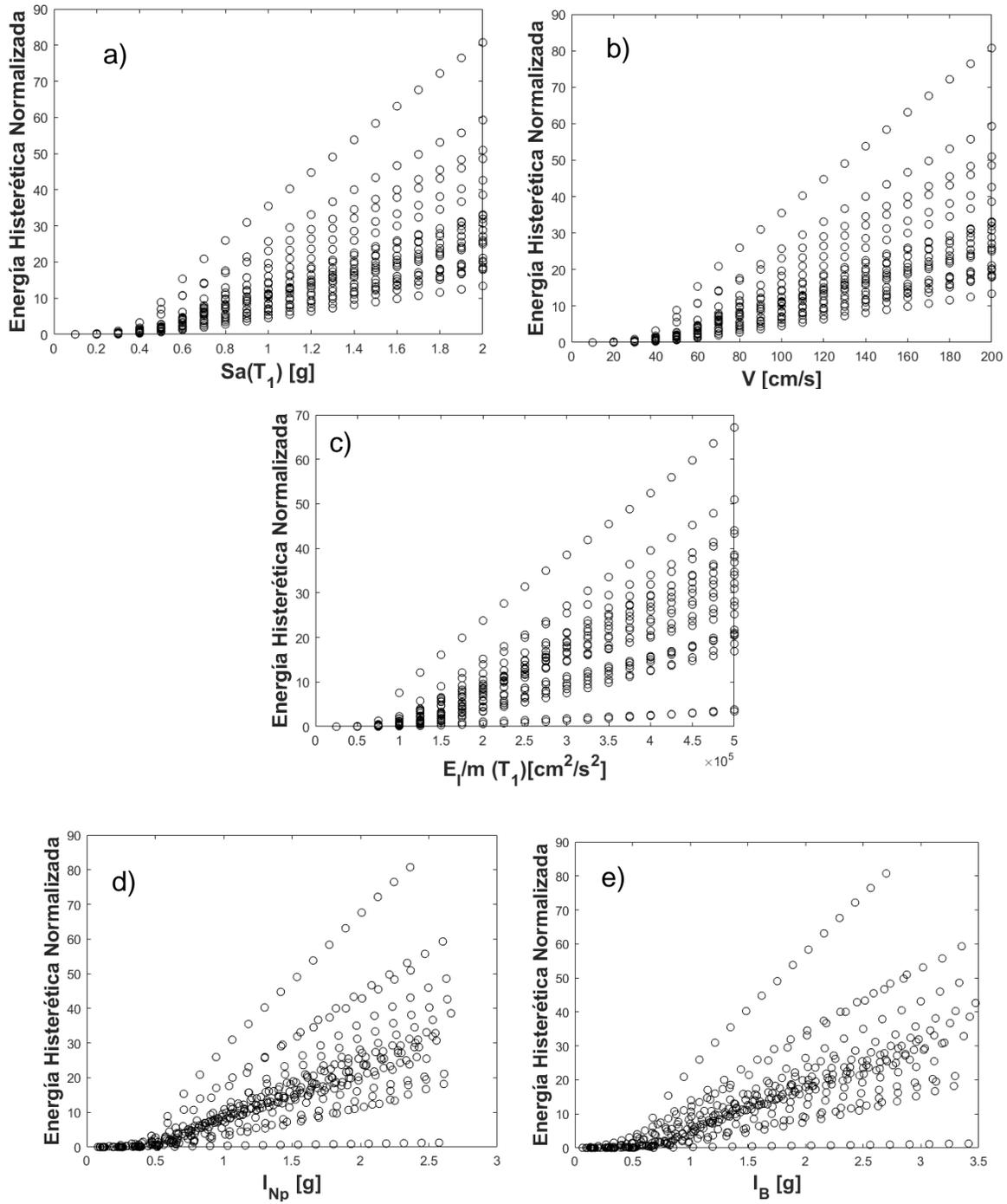


Figura A. 4 Análisis dinámico incremental con E_H como PDS para el marco 15N sometido a los registros sísmicos escalados para a) Sa , b) V , c) E_I/m , d) I_{Np} y e) I_B .

Apéndice 2. Curvas de fragilidad sísmica.

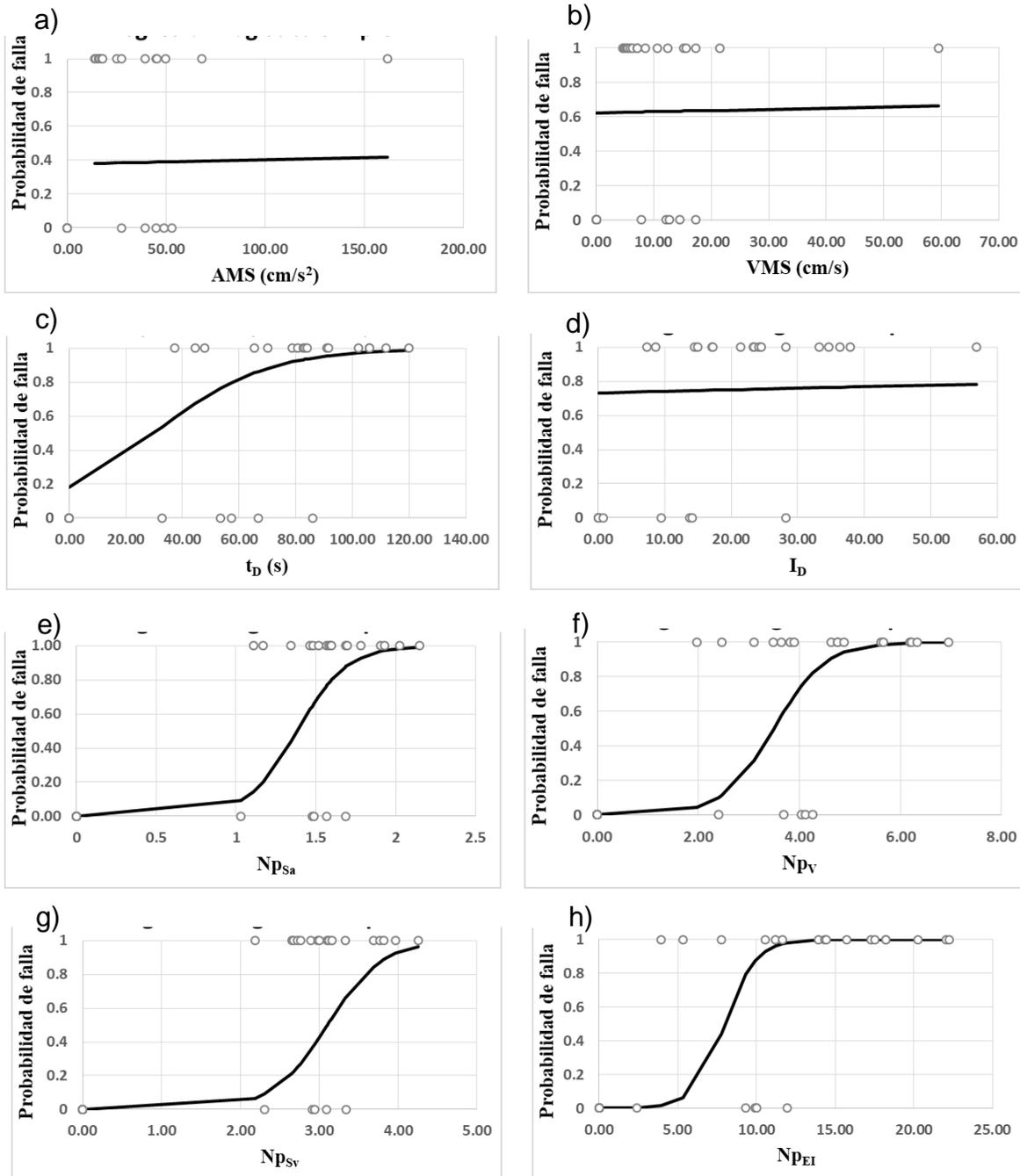


Figura A. 5 Curvas de fragilidad del ECR 4N con E_H y $S_a = 1g$ como primera componente de la MISV y
 a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

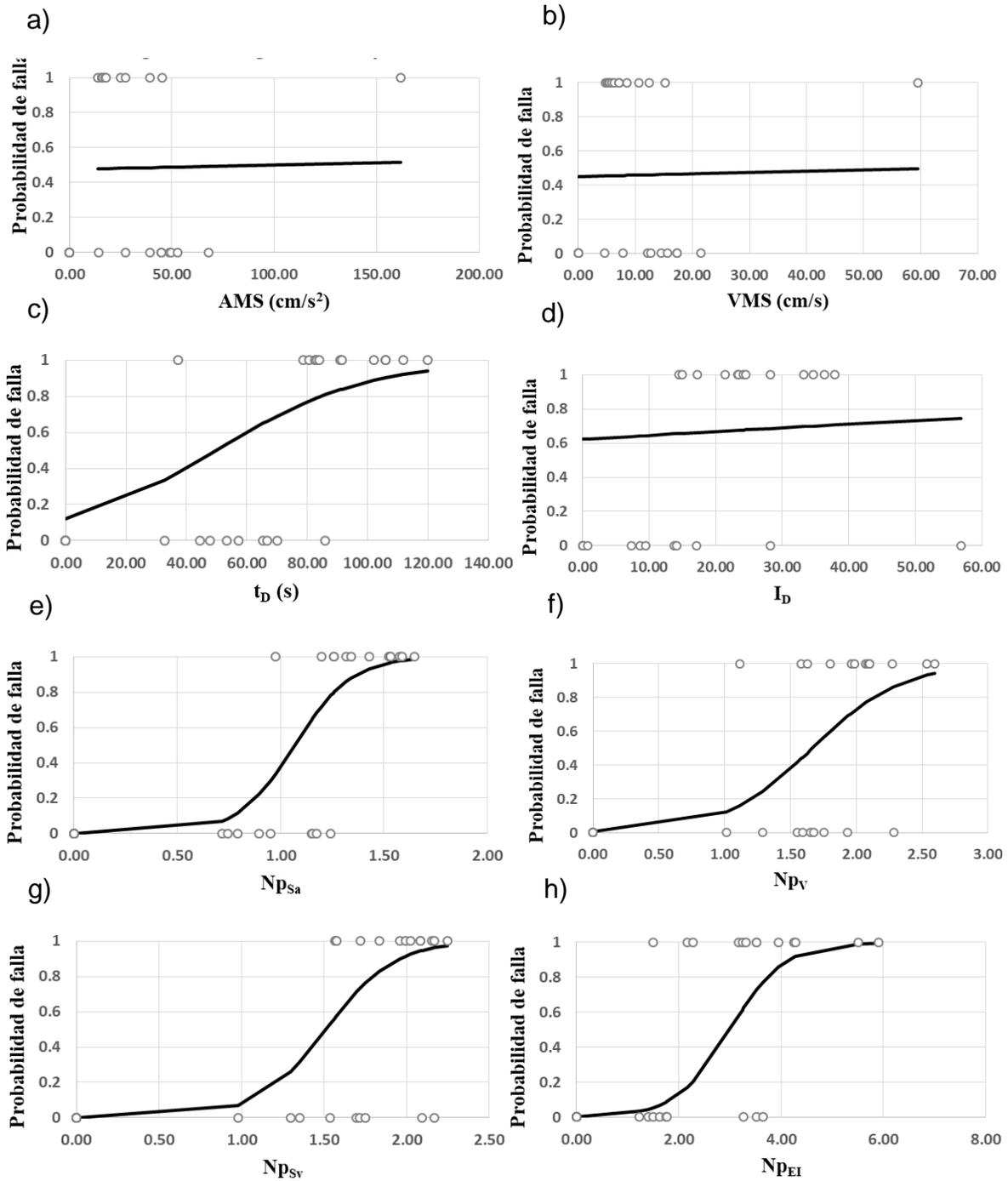


Figura A. 6 Curvas de fragilidad del ECR 7N con E_H y $S_a = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

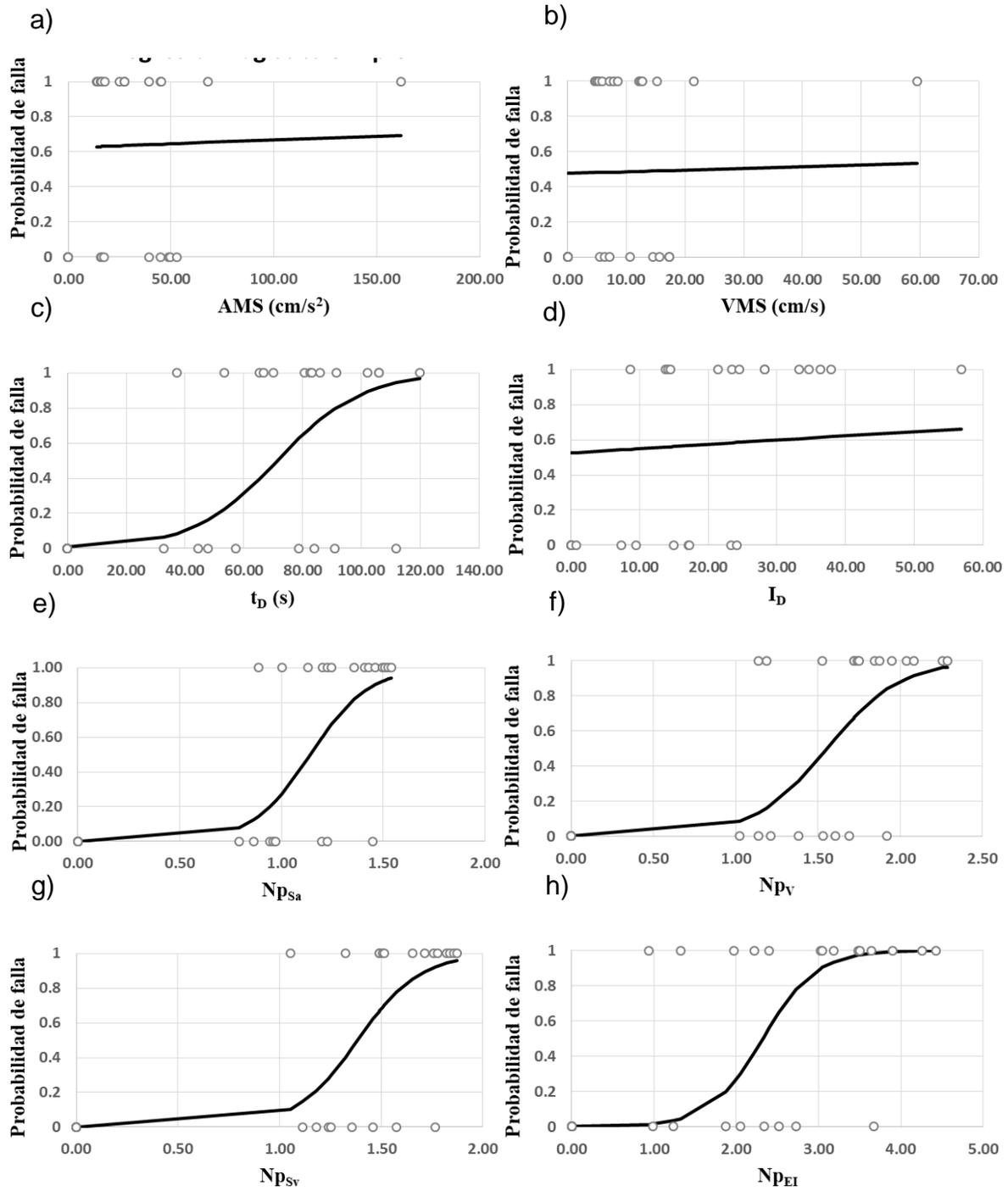


Figura A. 7 Curvas de fragilidad del ECR 10N con E_H y $S_a=1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{psa} , f) N_{pV} , g) N_{psv} y h) N_{pEI} como segunda.

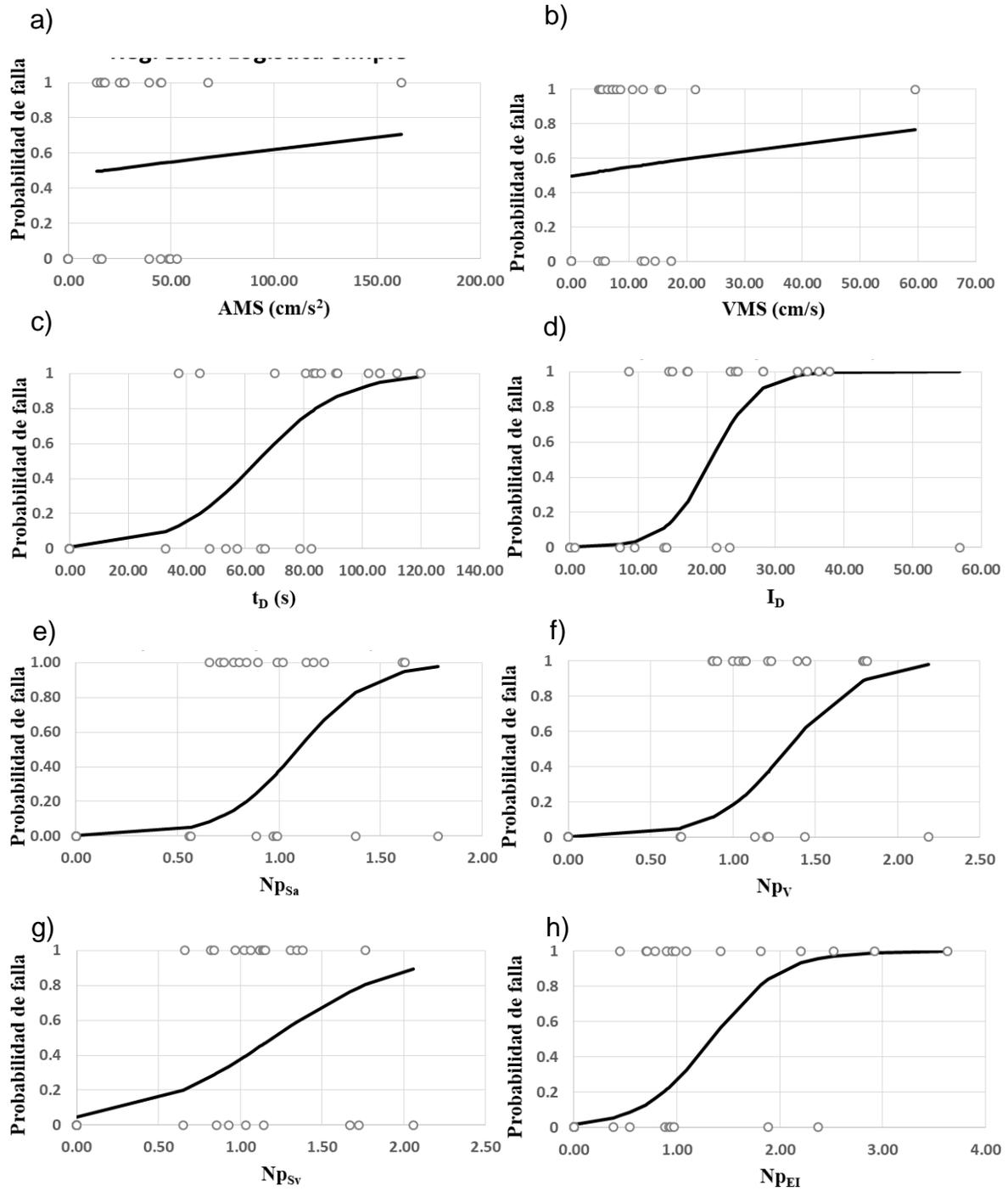


Figura A. 8 Curvas de fragilidad del ECR 15N con E_H y $S_a=1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{psa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

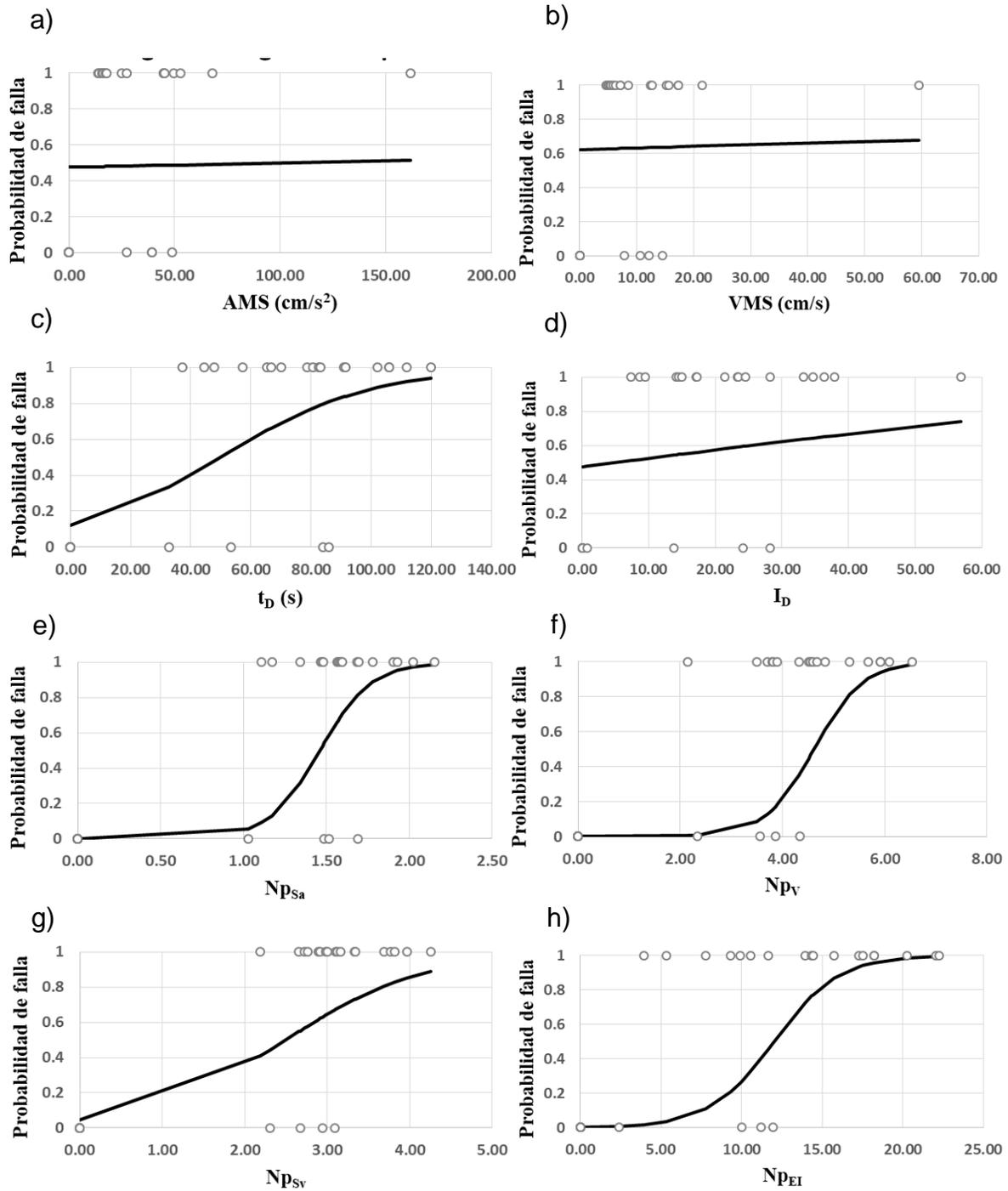


Figura A. 9 Curvas de fragilidad del ECR 4N con DME y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

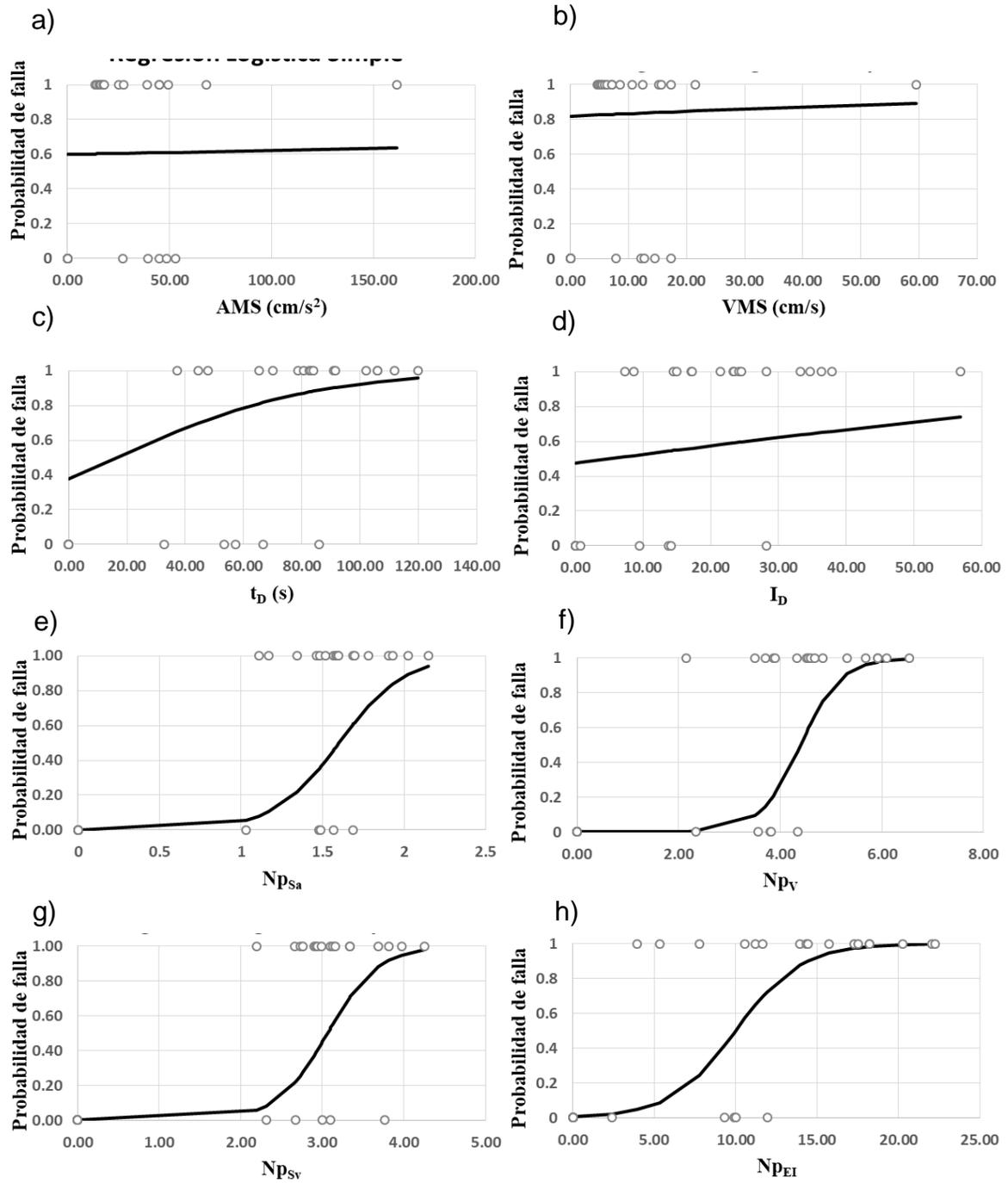


Figura A. 10 Curvas de fragilidad del ECR 4N con E_H y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{psa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

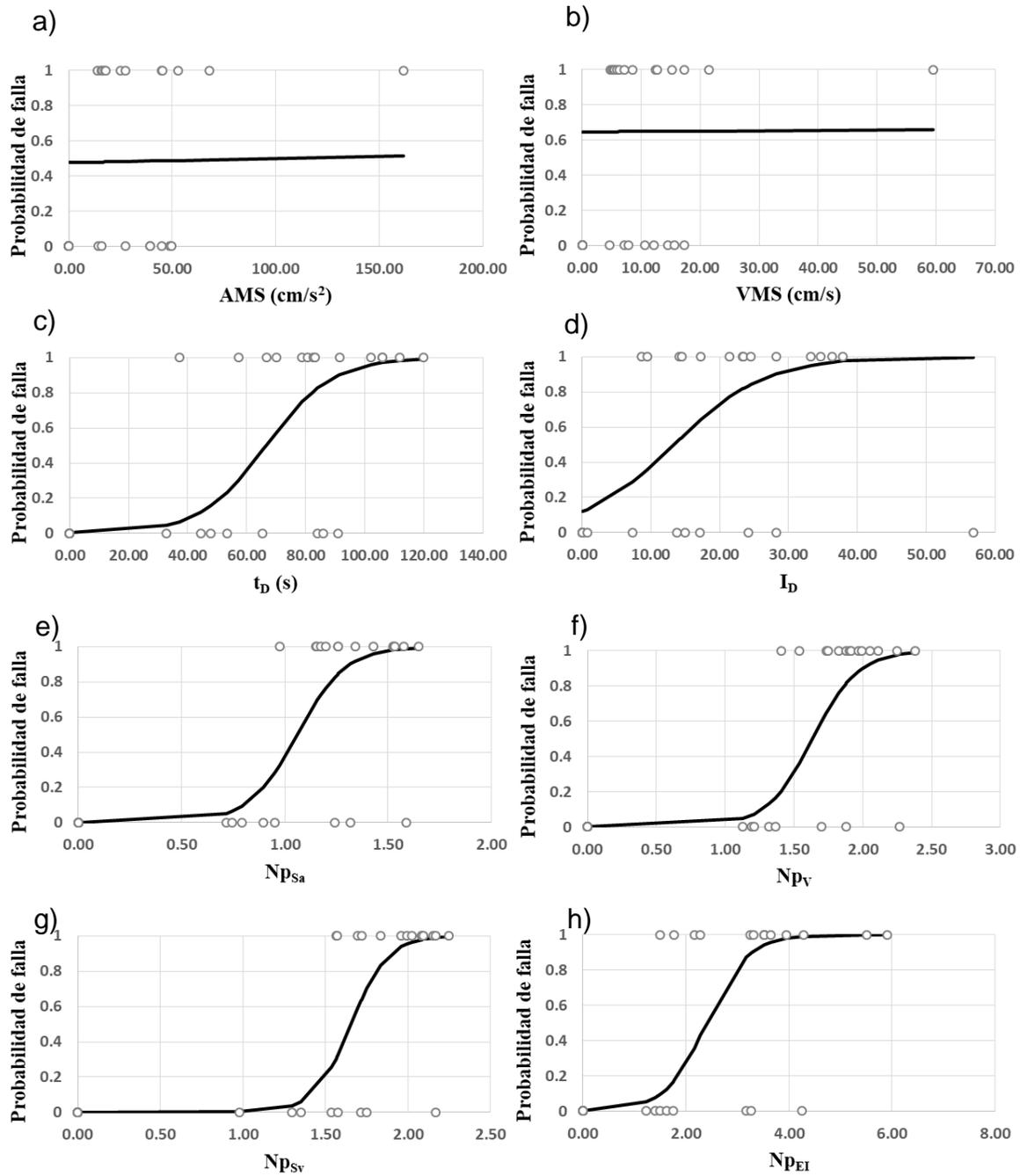


Figura A. 11 Curvas de fragilidad del ECR 7N con DME y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.

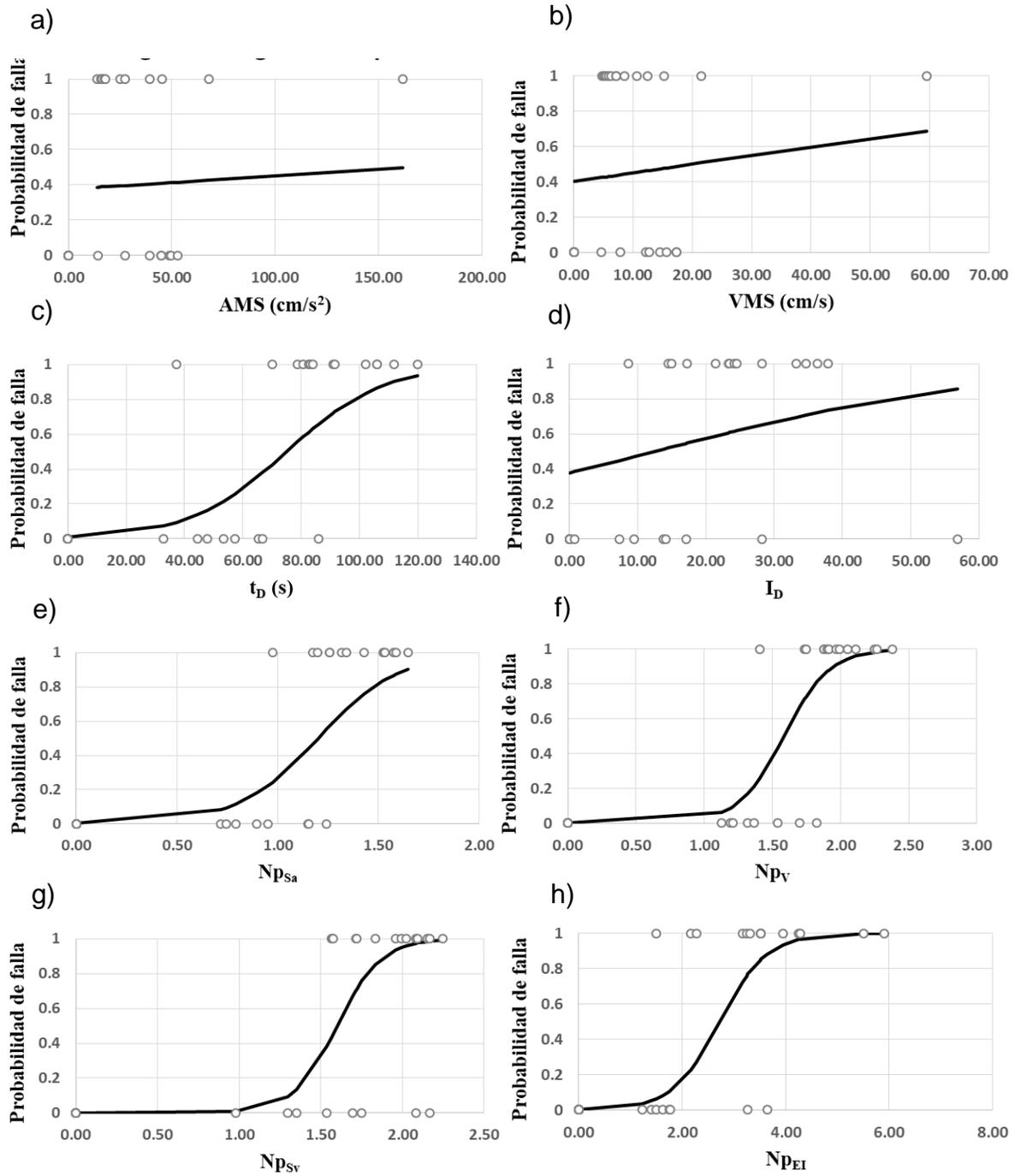


Figura A. 12 Curvas de fragilidad del ECR 7N con E_H y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.

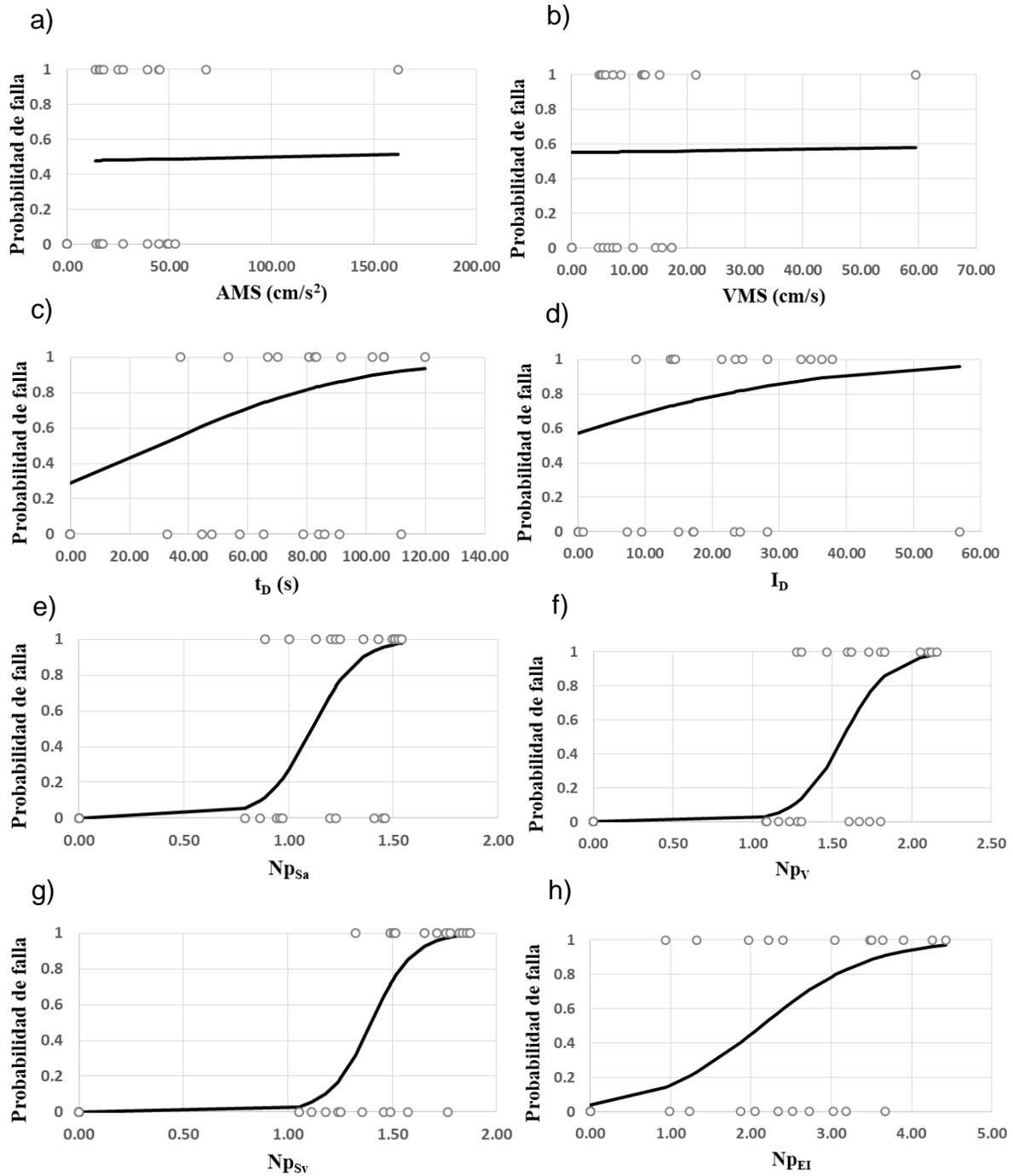


Figura A. 13 Curvas de fragilidad del ECR 10N con DME y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_s_a}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_s_v}$ y h) $N_{p_e_i}$ como segunda.

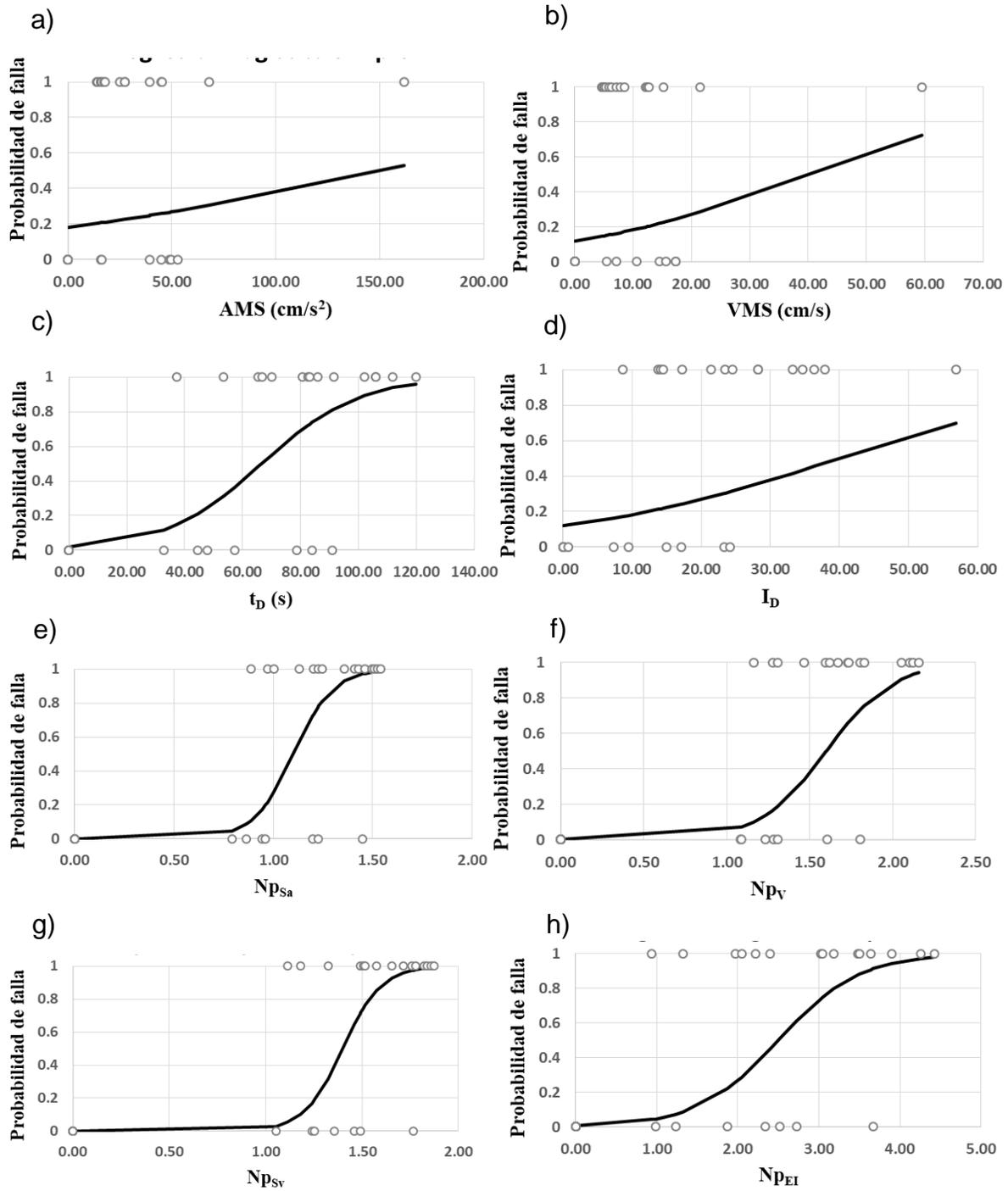


Figura A. 14 Curvas de fragilidad del ECR 10N con E_H y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

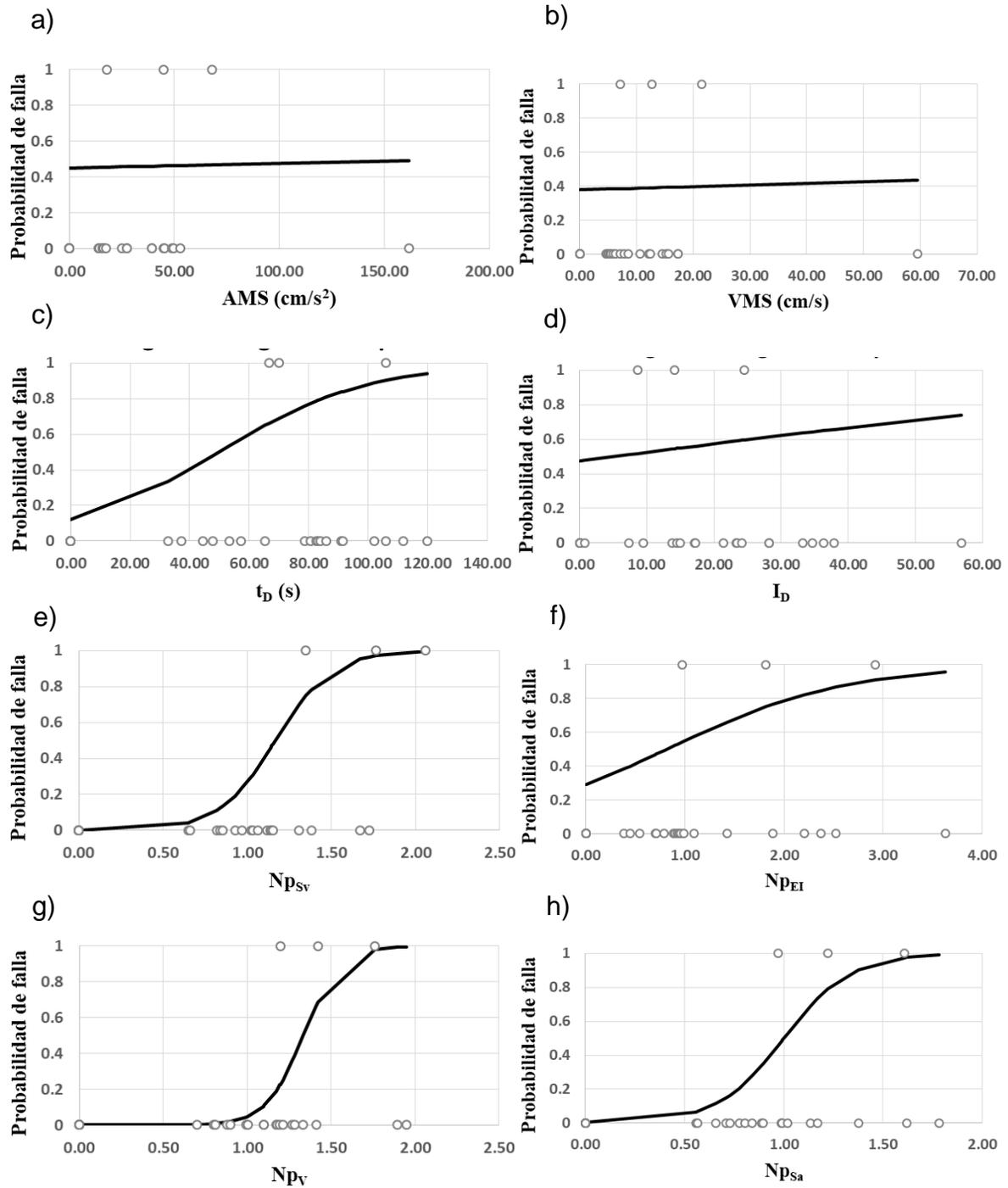


Figura A. 15 Curvas de fragilidad del ECR 15N con DME y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sv}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.

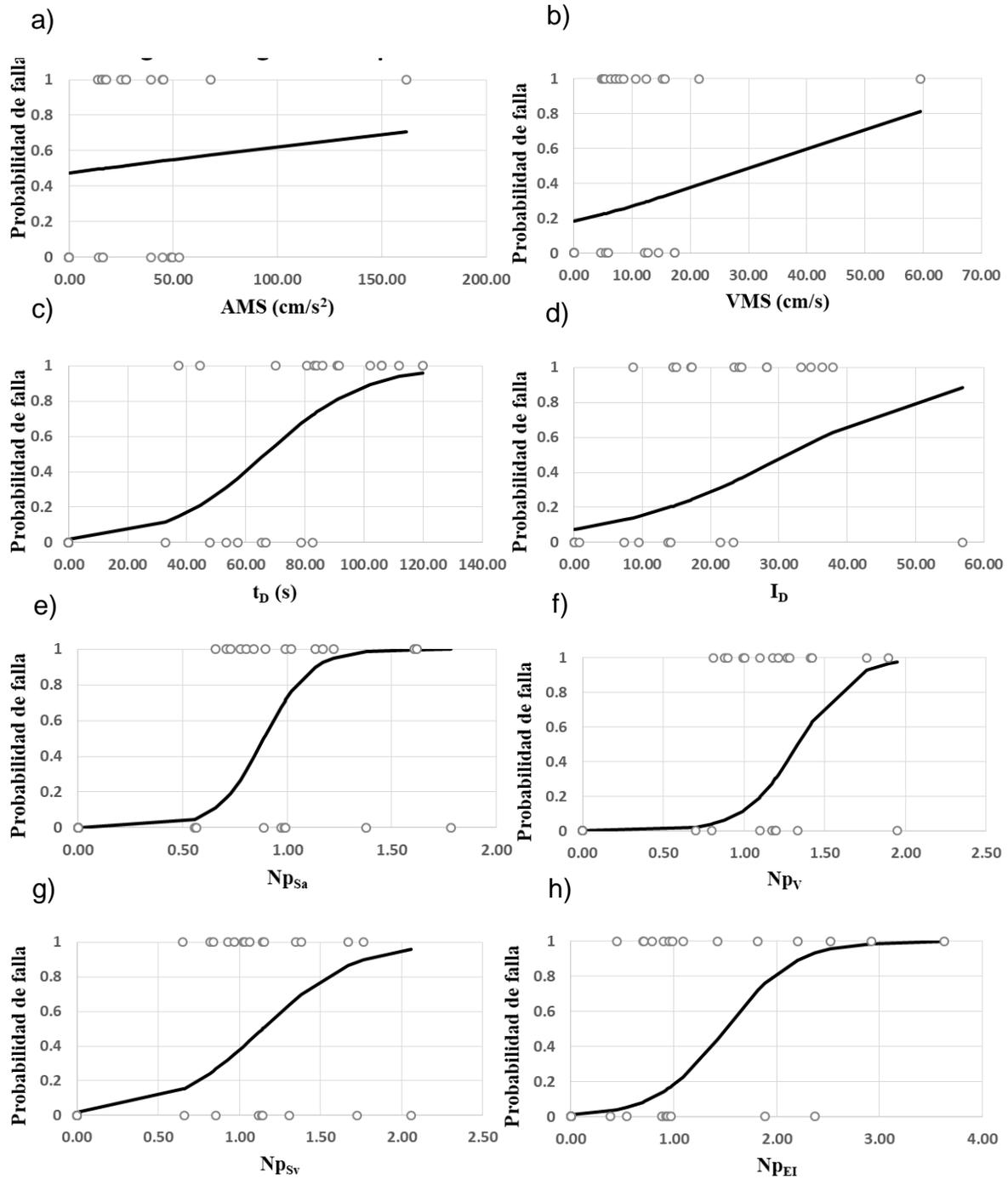


Figura A. 16 Curvas de fragilidad del ECR 15N con E_H y $V = 100$ cm/s como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{s_a}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{s_v}}$ y h) $N_{p_{e_i}}$ como segunda.

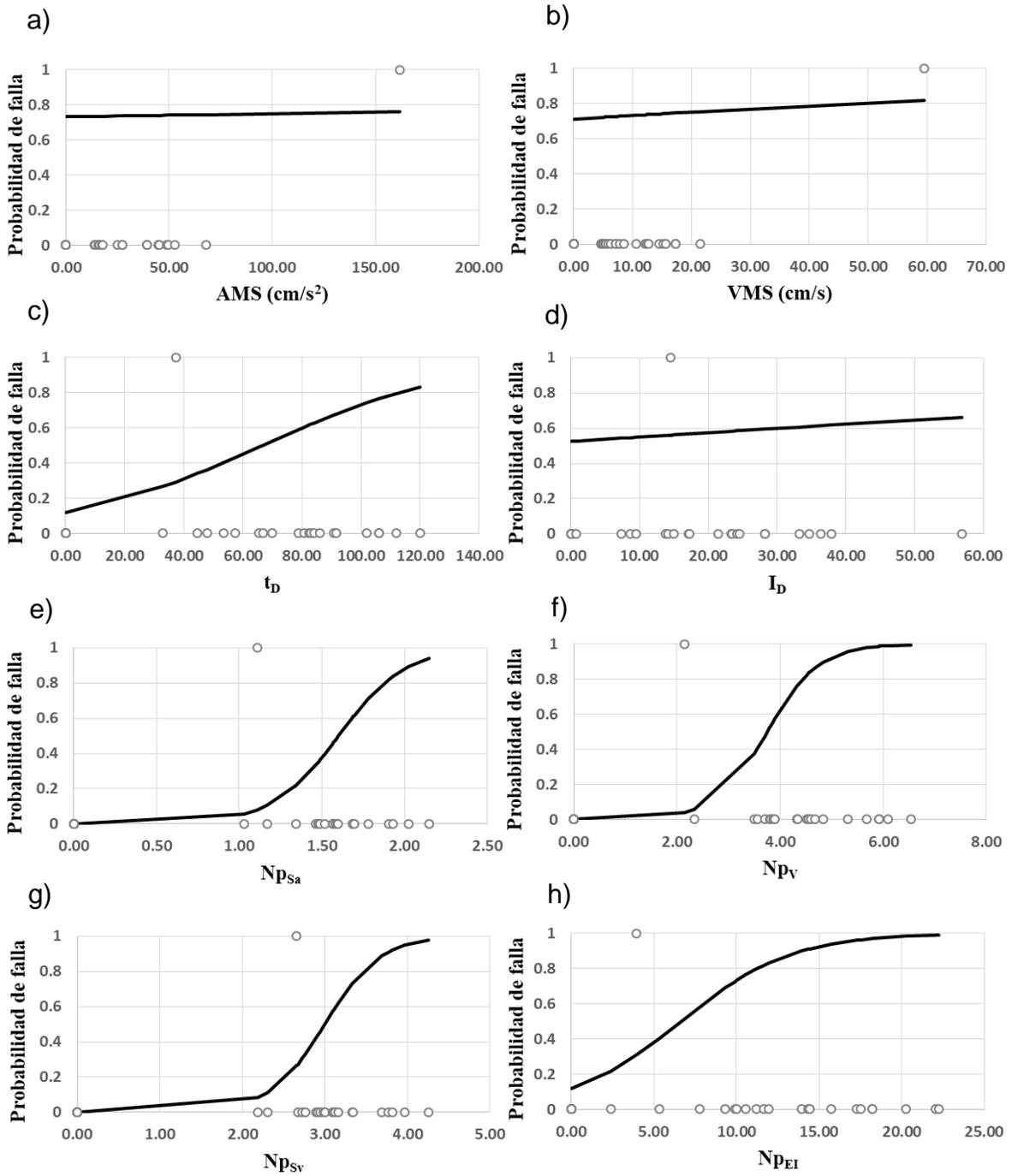


Figura A. 17 Curvas de fragilidad del ECR 4N con DME y EI = 1g como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D, d) I_D, e) N_{pSa}, f) N_{pV}, g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

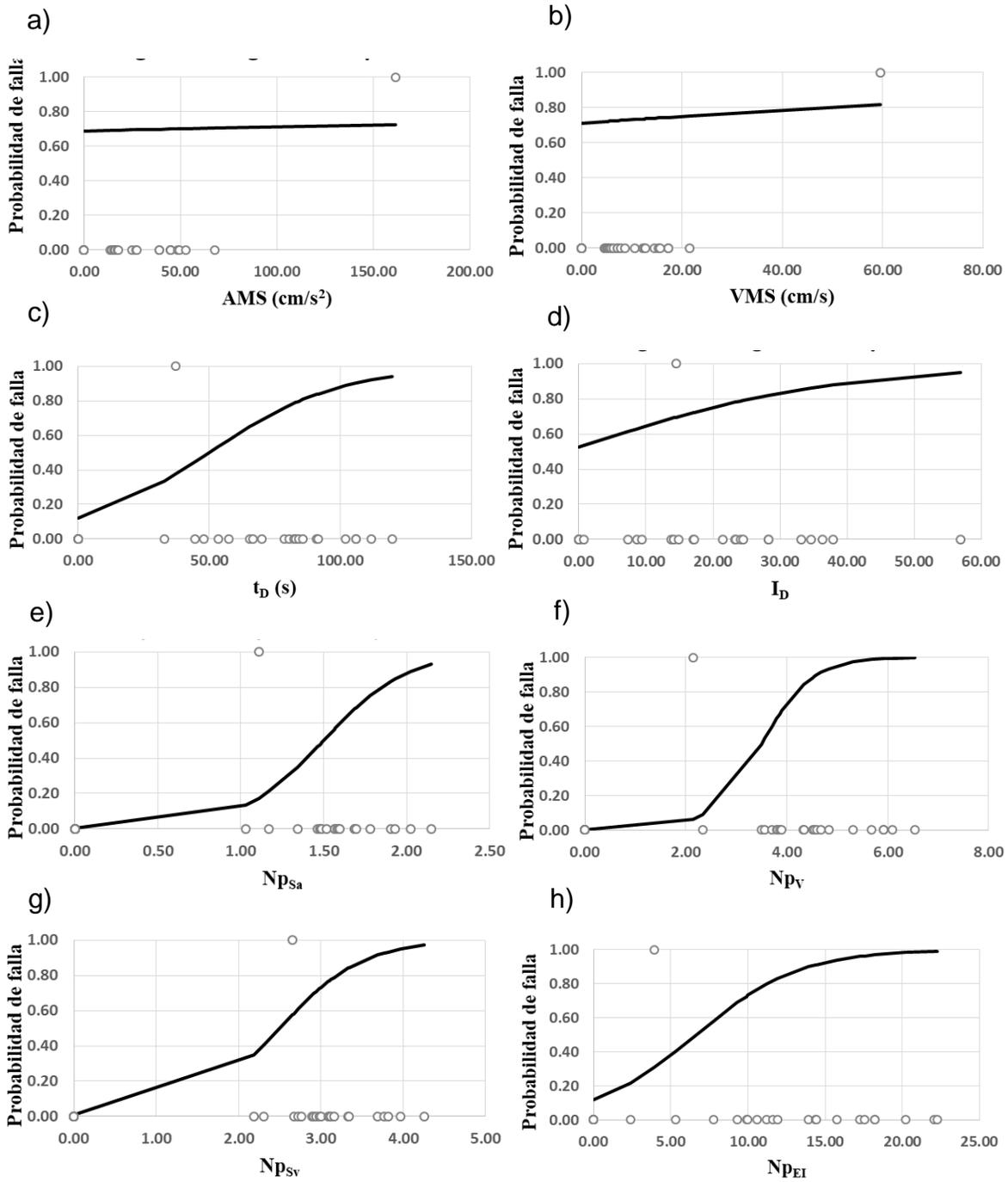


Figura A. 18 Curvas de fragilidad del ECR 4N con E_H y $E_I = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

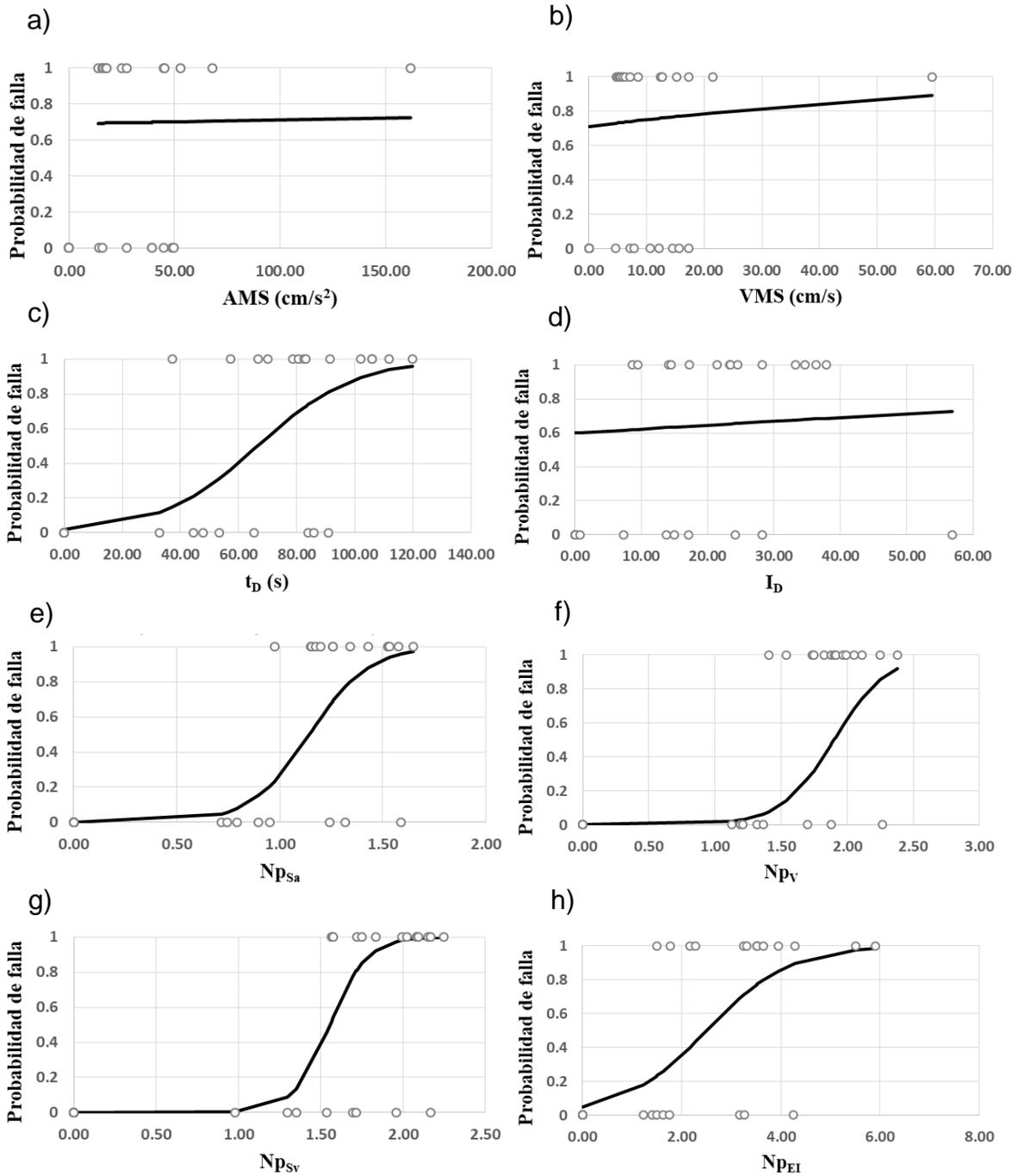


Figura A. 19 Curvas de fragilidad del ECR 7N con DME y EI = 1g como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D, d) I_D, e) N_{psa}, f) N_{pv}, g) N_{psv} y h) N_{pEI} como segunda.

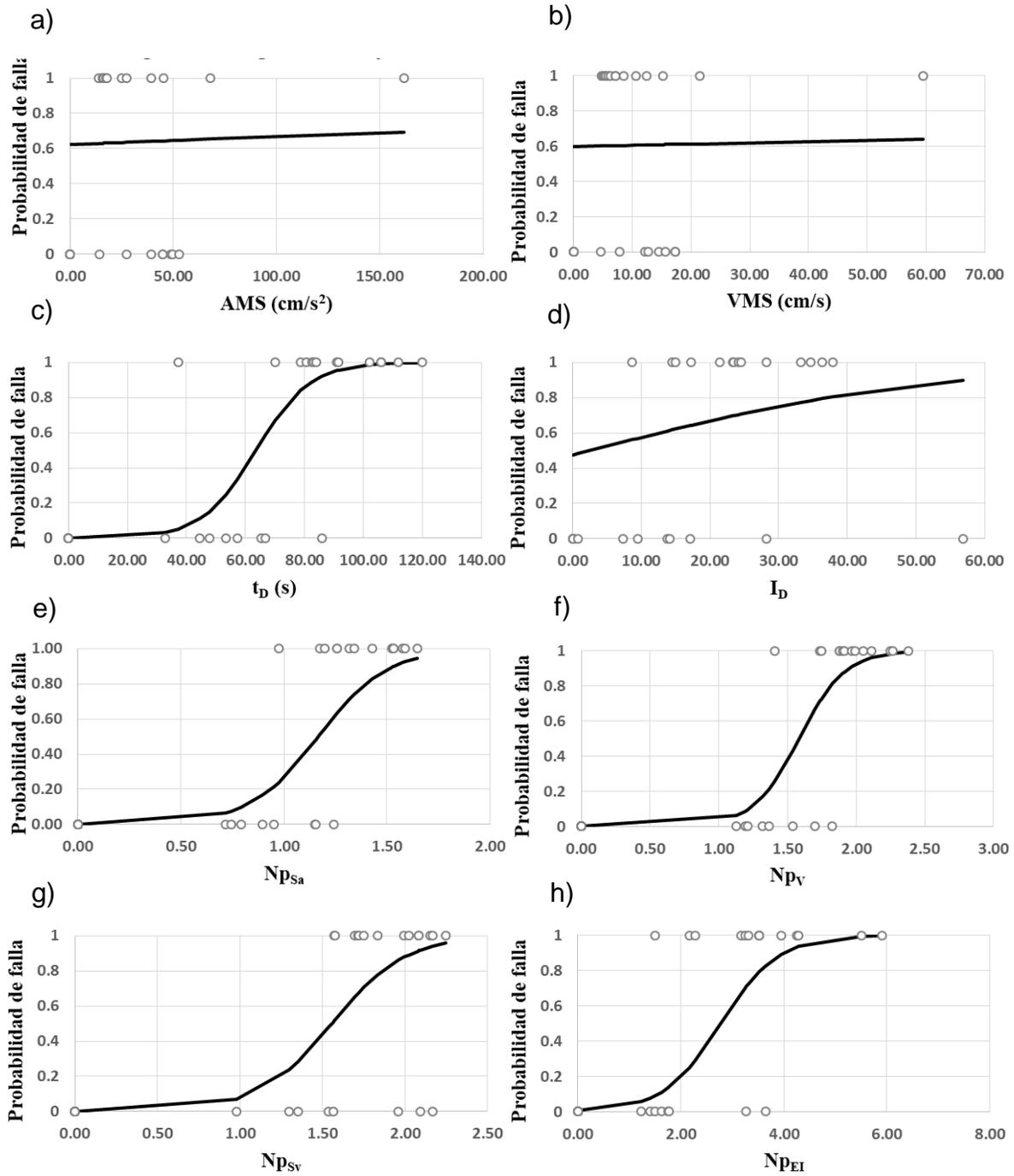


Figura A. 20 Curvas de fragilidad del ECR 7N con E_H y $E_I = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.

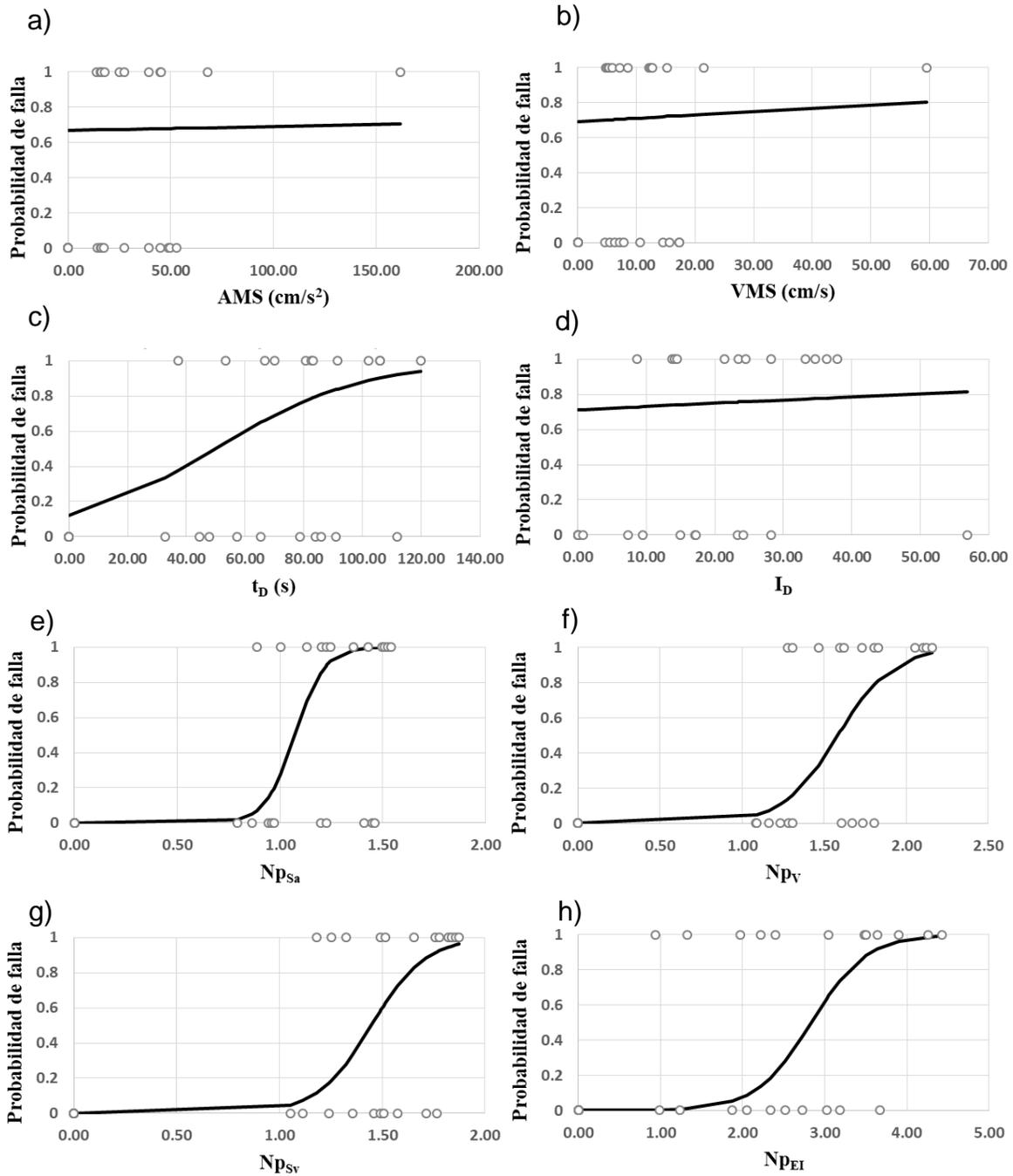


Figura A. 21 Curvas de fragilidad del ECR 10N con DME y EI = 1g como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D, d) I_D, e) Np_{Sa}, f) Np_V, g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda.

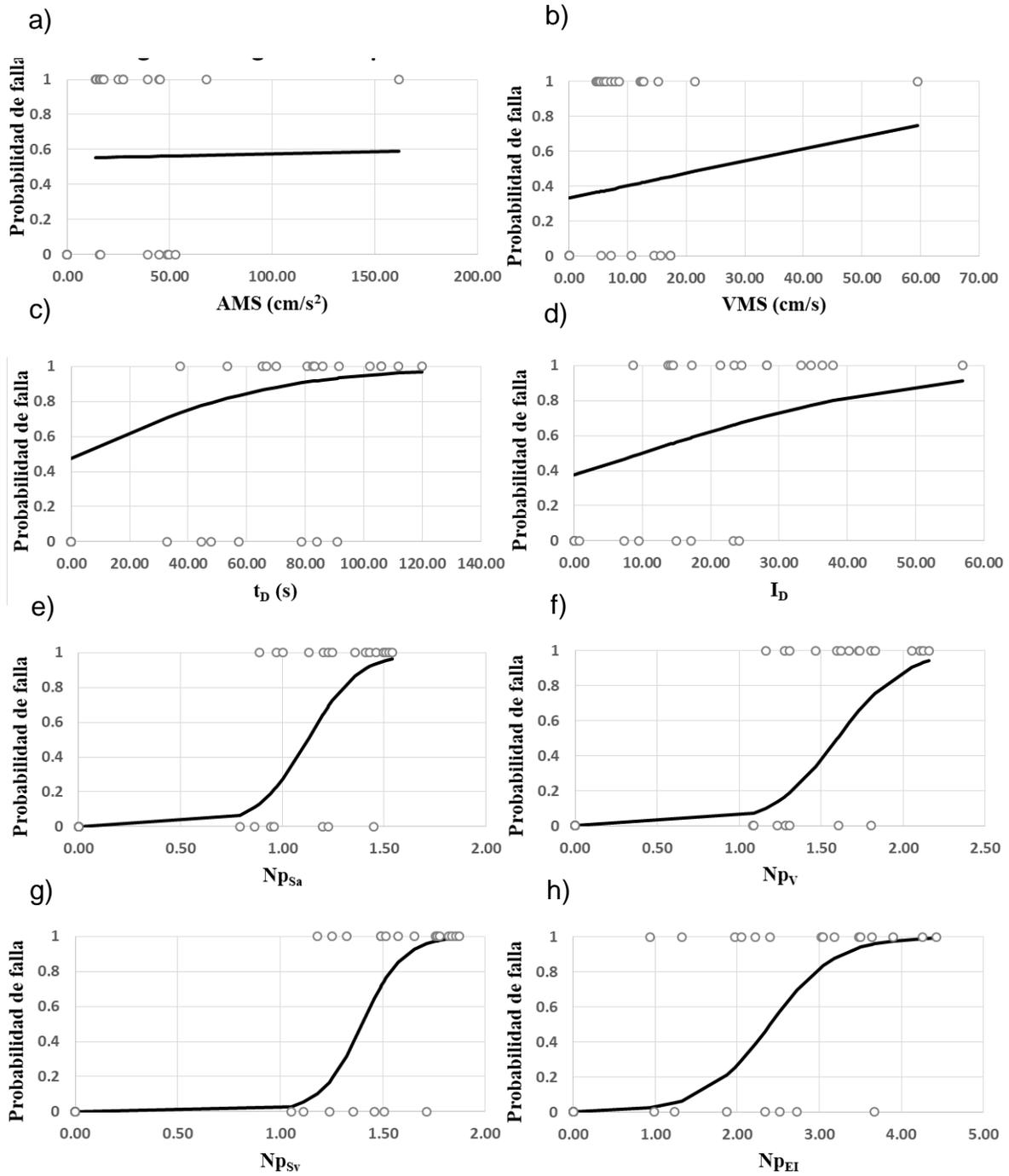


Figura A. 22 Curvas de fragilidad del ECR 10N con E_H y $E_I = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{psa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

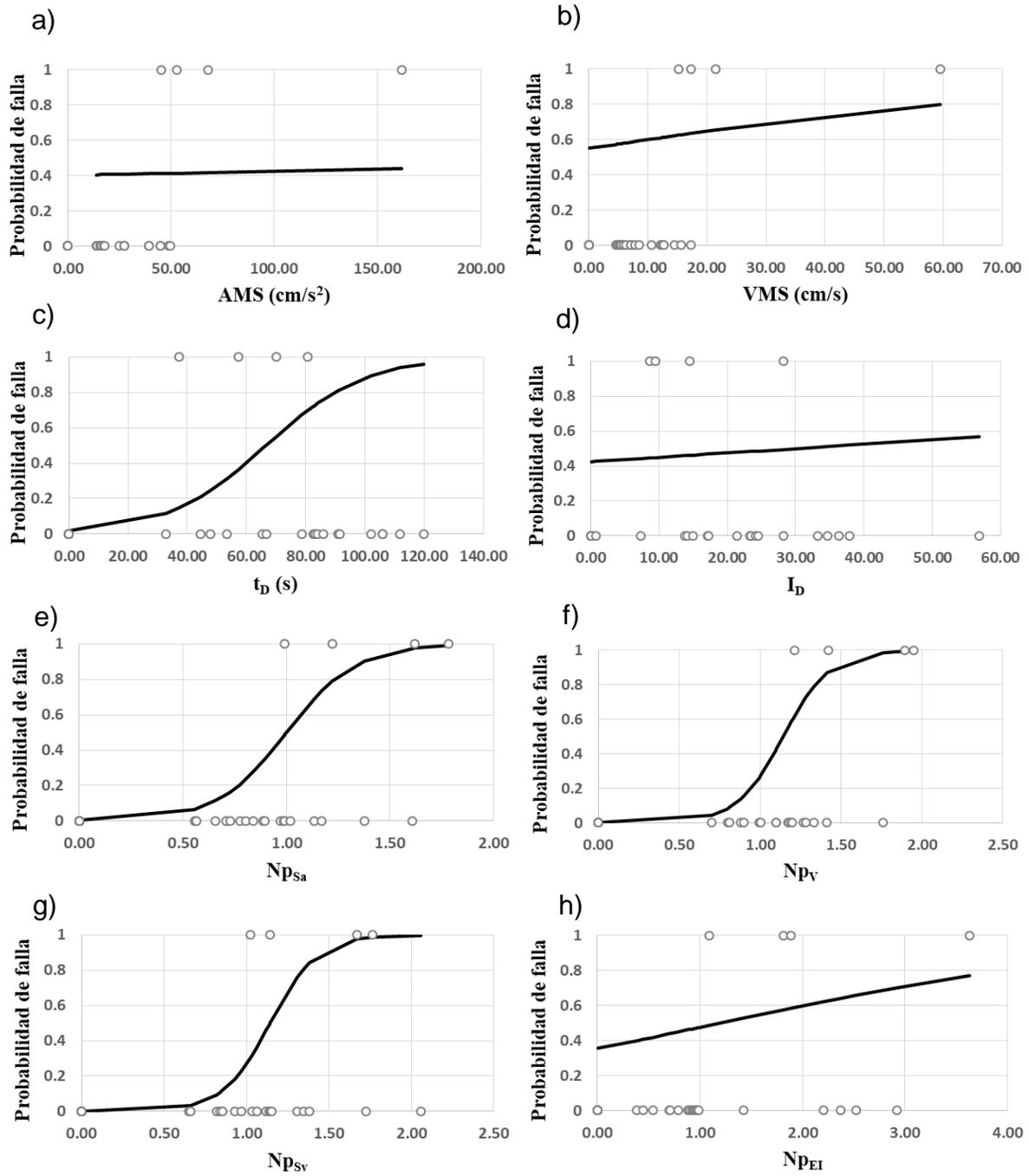


Figura A. 23 Curvas de fragilidad del ECR 15N con DME y EI = 1g como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D, d) I_D, e) N_{psa}, f) N_{pV}, g) N_{psV} y h) N_{pEI} como segunda.

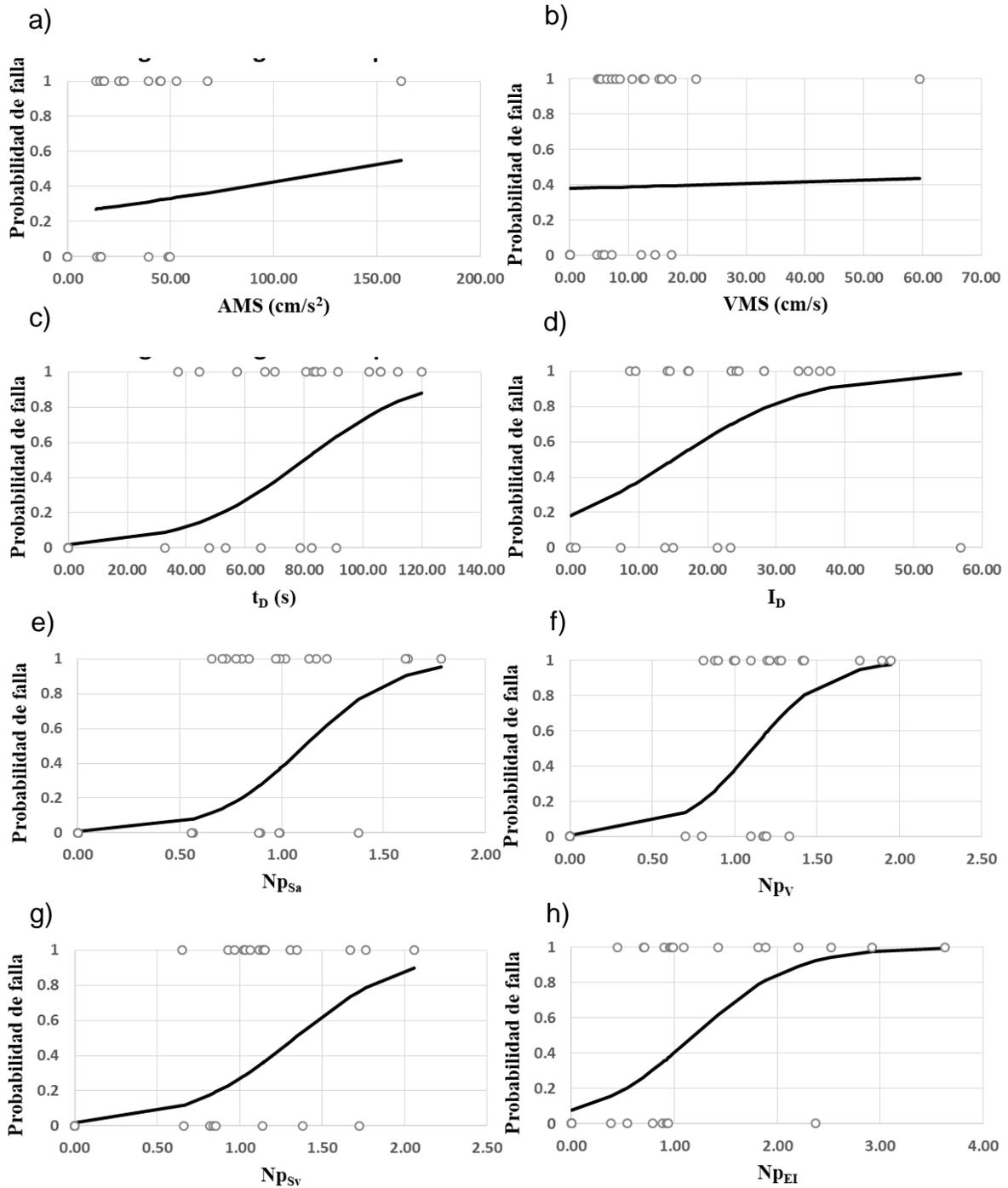


Figura A. 24 Curvas de fragilidad del ECR 15N con E_H y $E_I = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{psa} , f) N_{pv} , g) N_{psv} y h) N_{pei} como segunda.

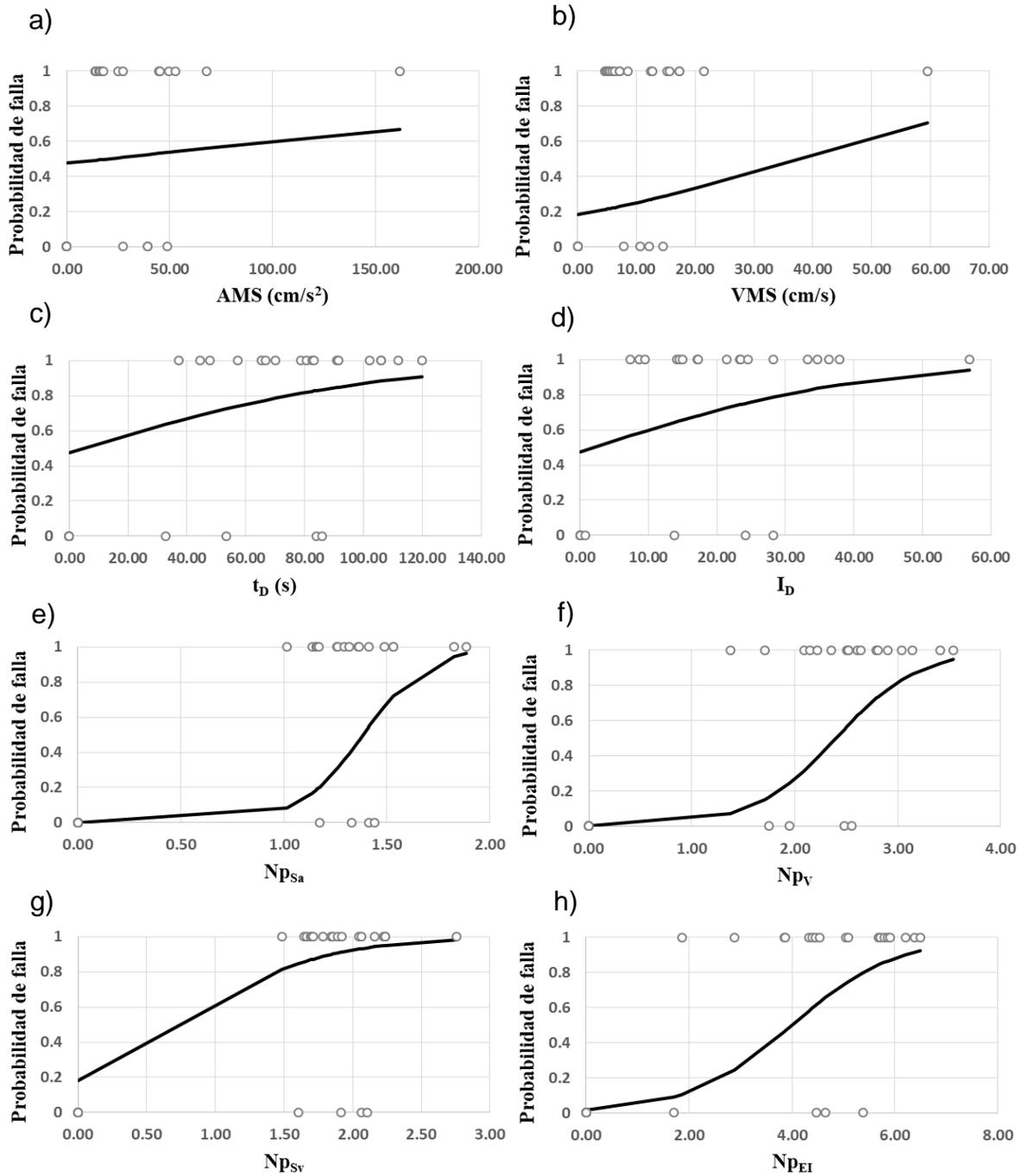


Figura A. 25 Curvas de fragilidad del ECR 4N con DME e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

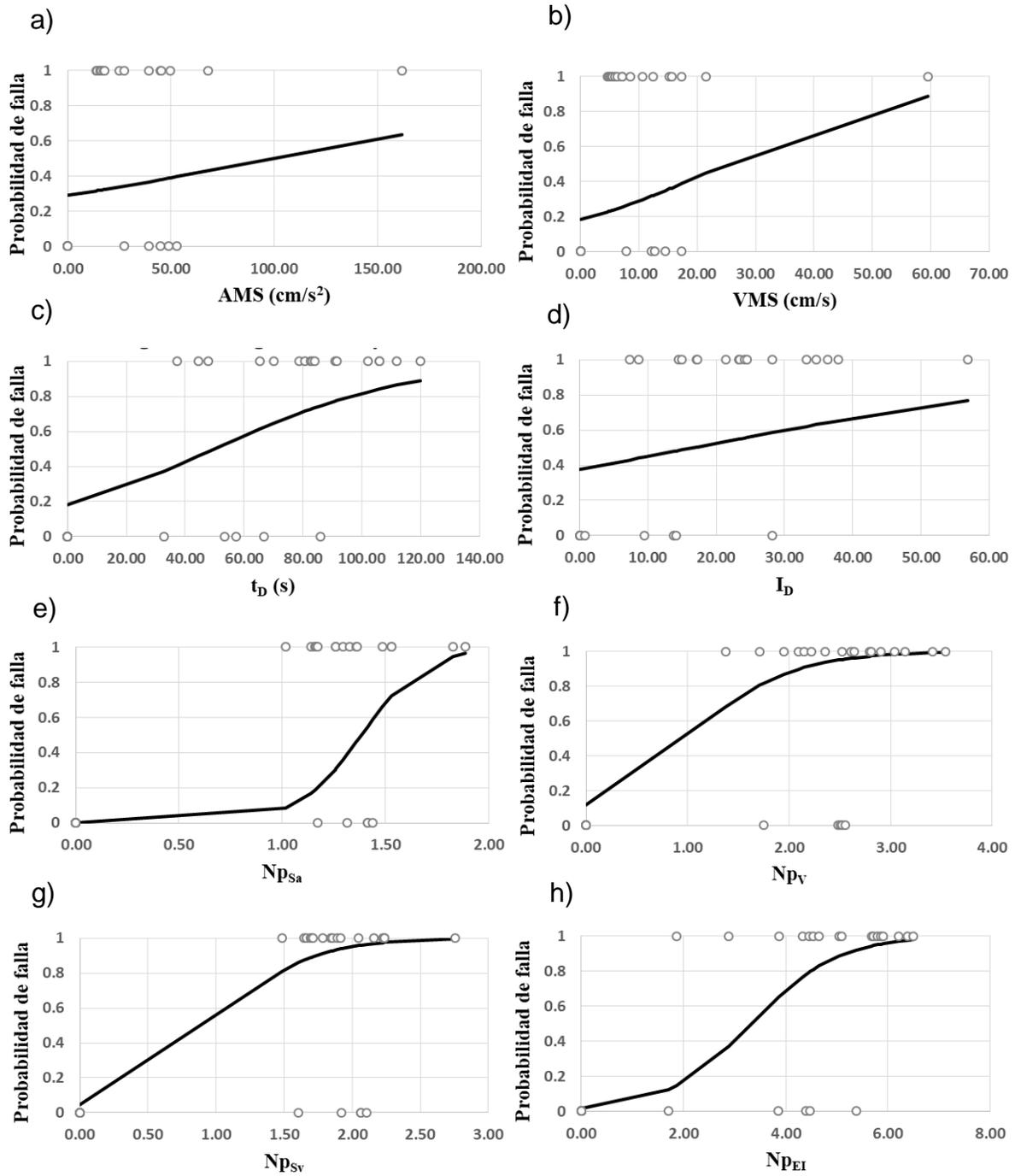


Figura A. 26 Curvas de fragilidad del ECR 4N con E_H e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

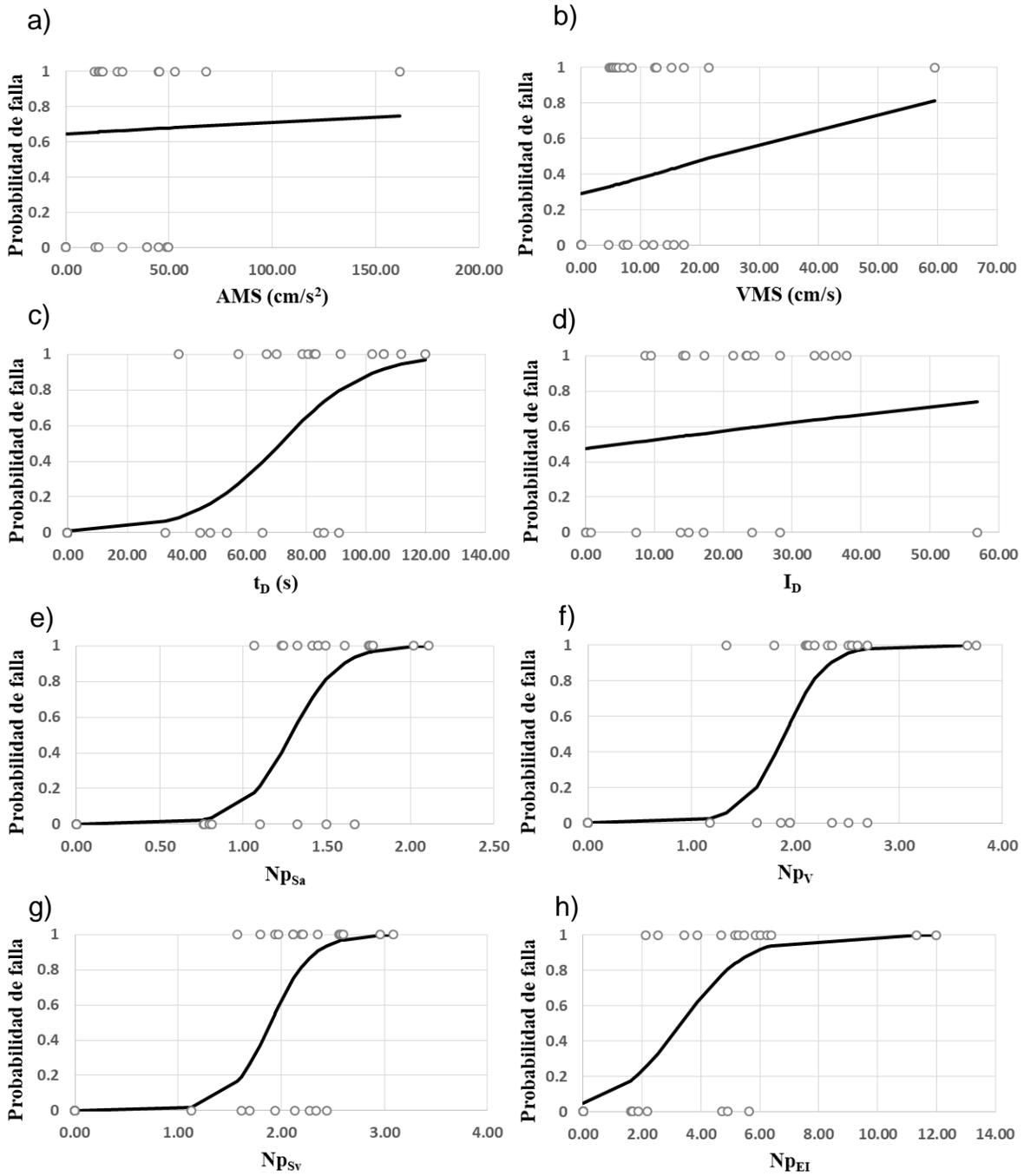


Figura A. 27 Curvas de fragilidad del ECR 7N con DME e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{psa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

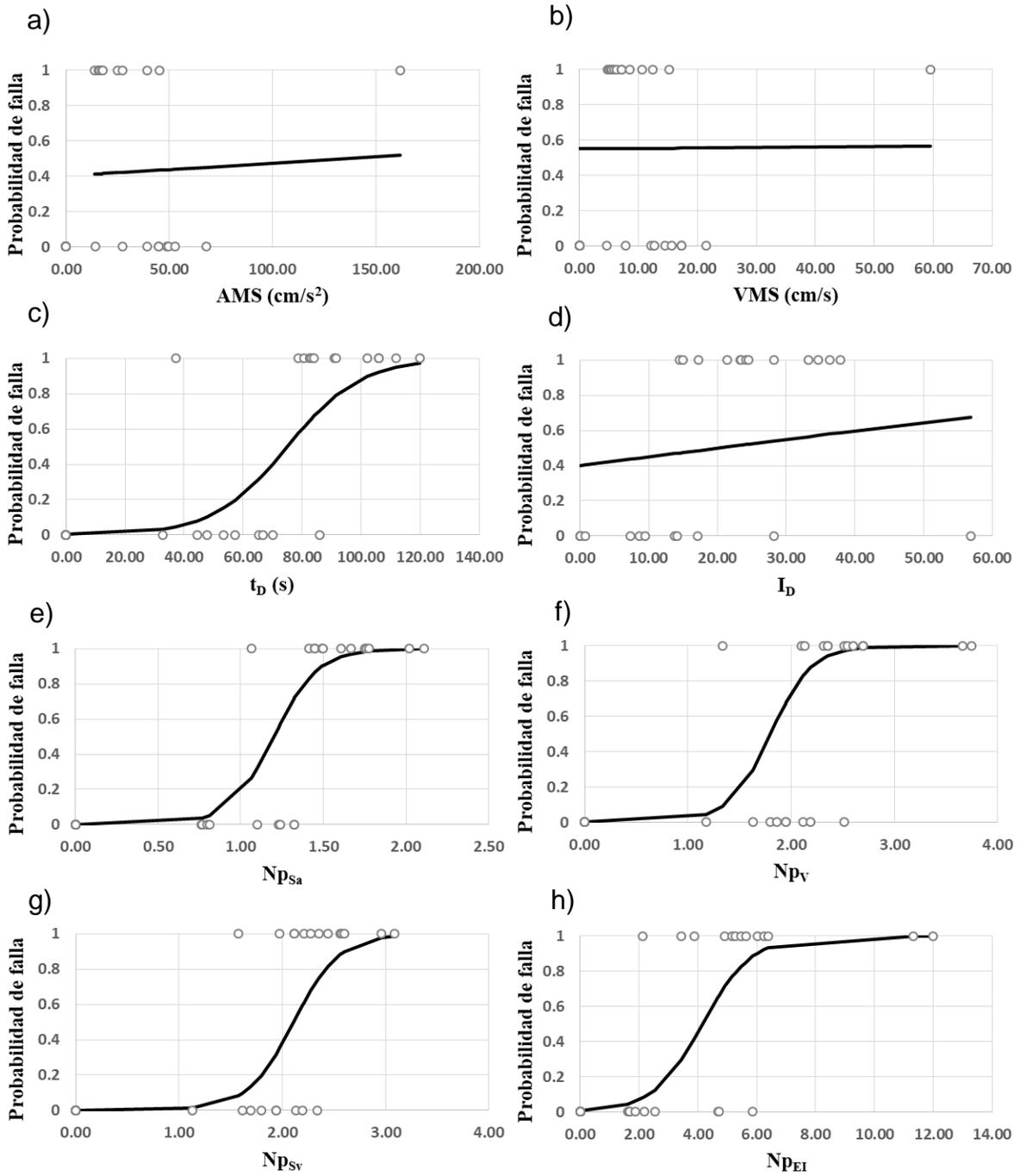


Figura A. 28 Curvas de fragilidad del ECR 7N con E_H e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

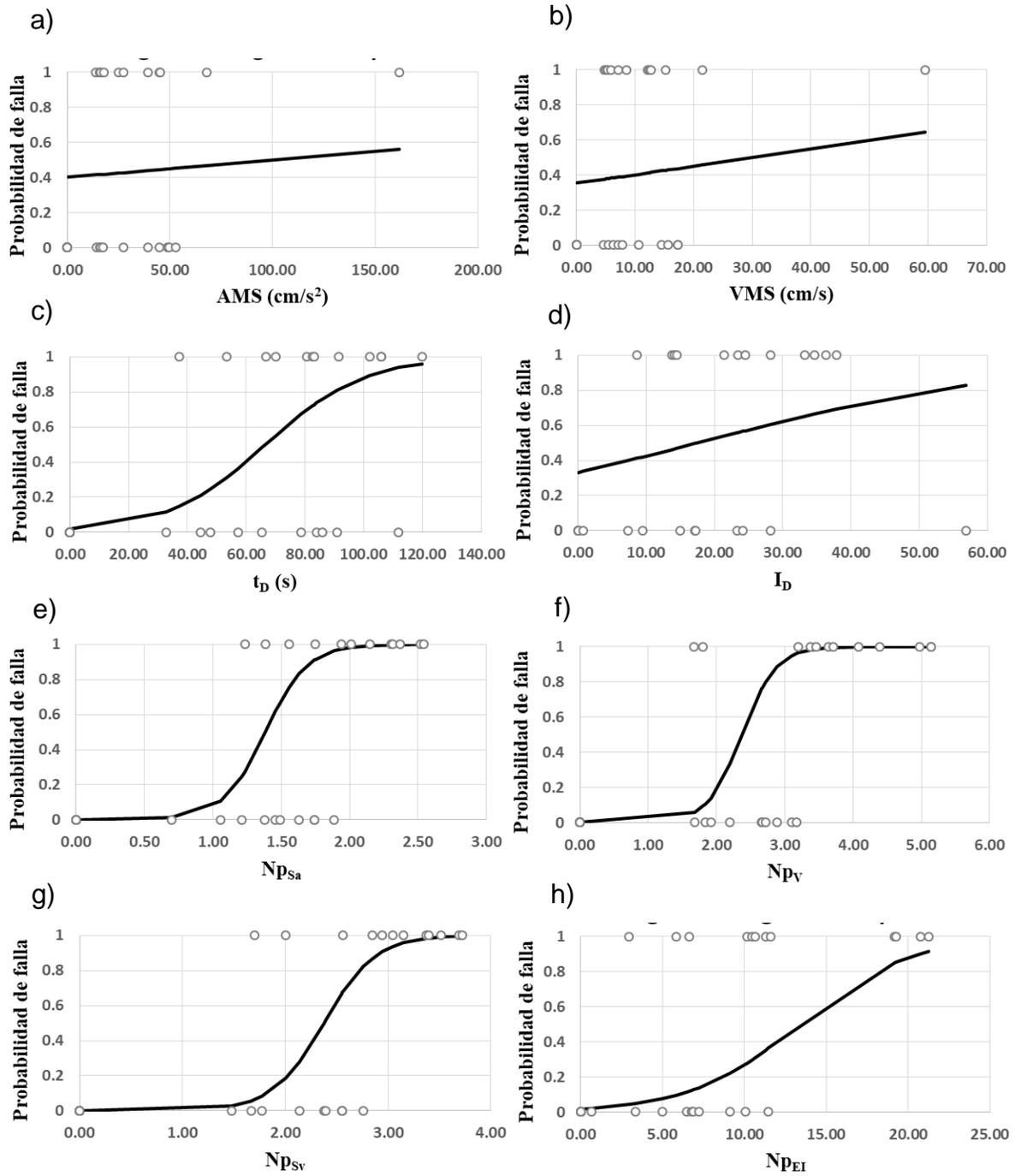


Figura A. 29 Curvas de fragilidad del ECR 10N con DME e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.

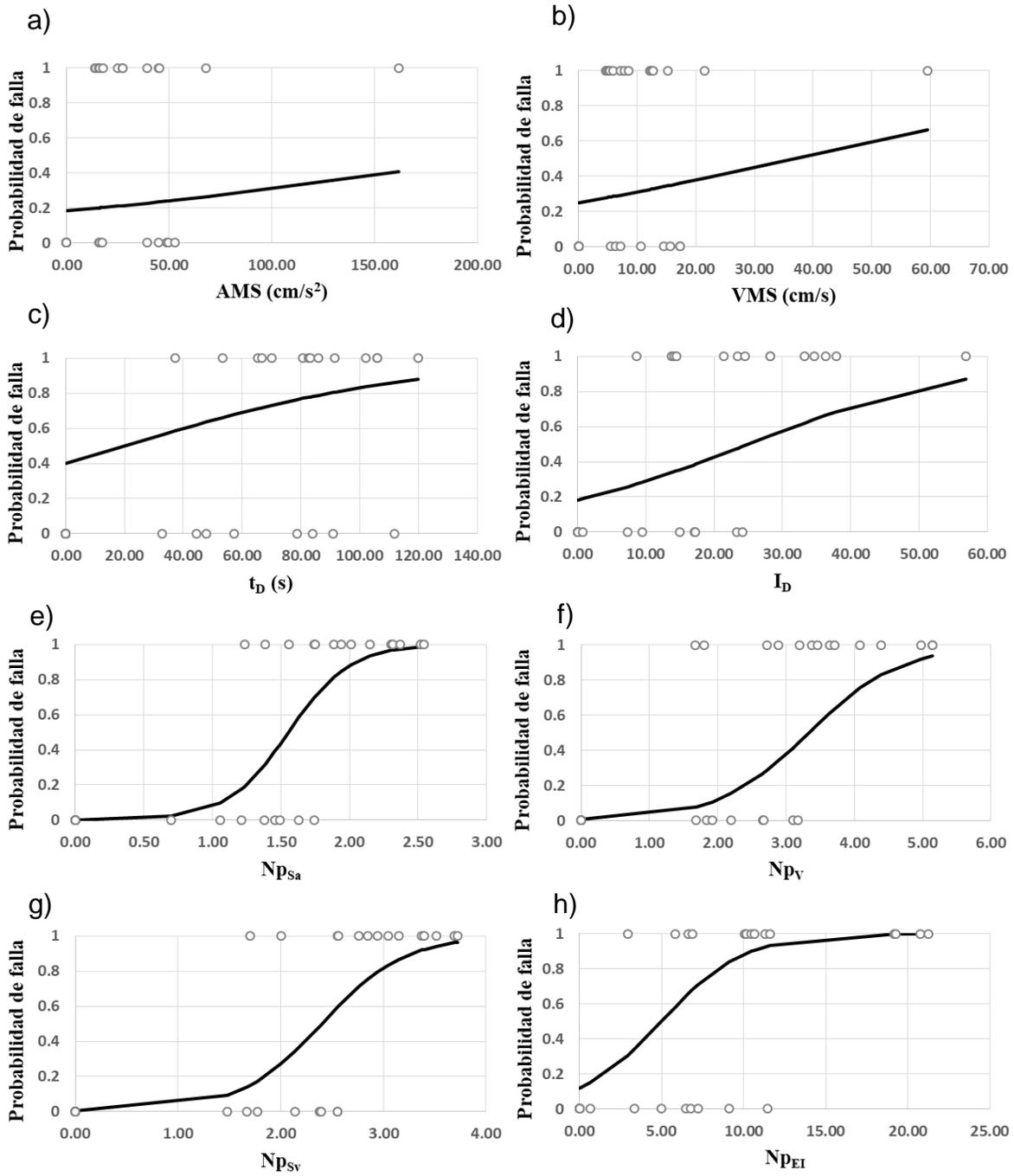


Figura A. 30 Curvas de fragilidad del ECR 10N con E_H e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.

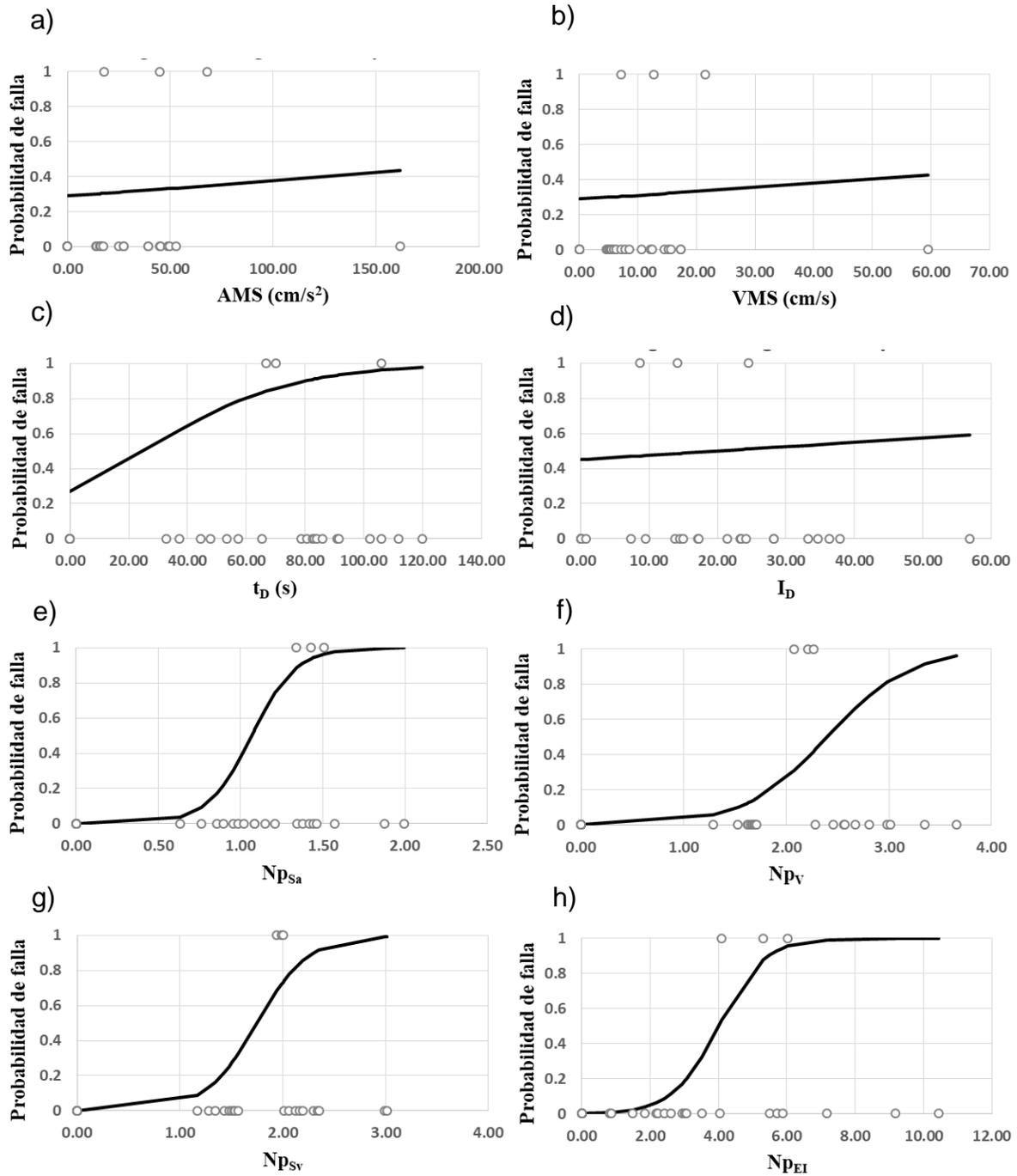


Figura A. 31 Curvas de fragilidad del ECR 15N con DME e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.

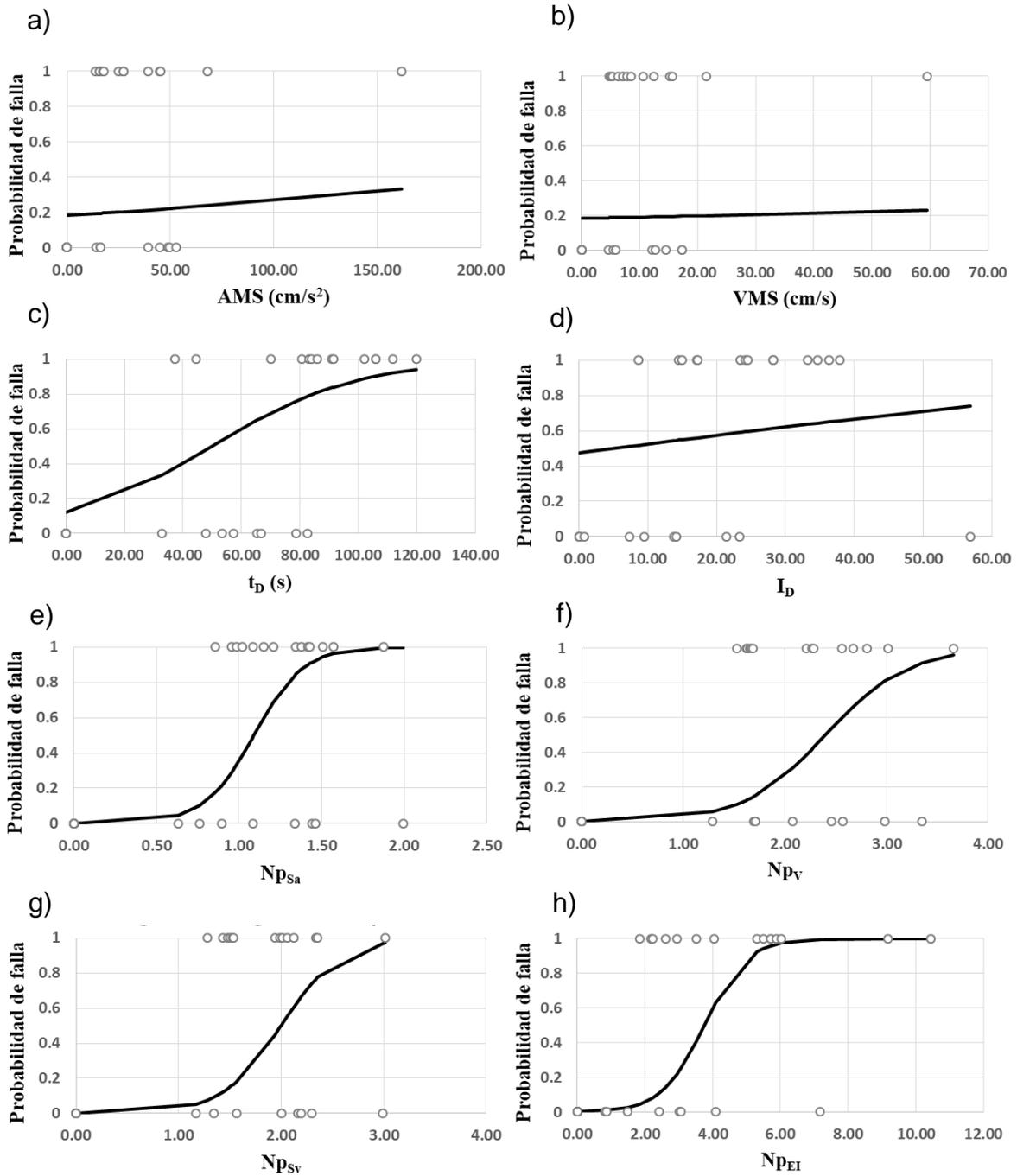


Figura A. 32 Curvas de fragilidad del ECR 15N con E_H e $I_{Np} = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{psa} , f) N_{pV} , g) N_{psv} y h) N_{pEI} como segunda.

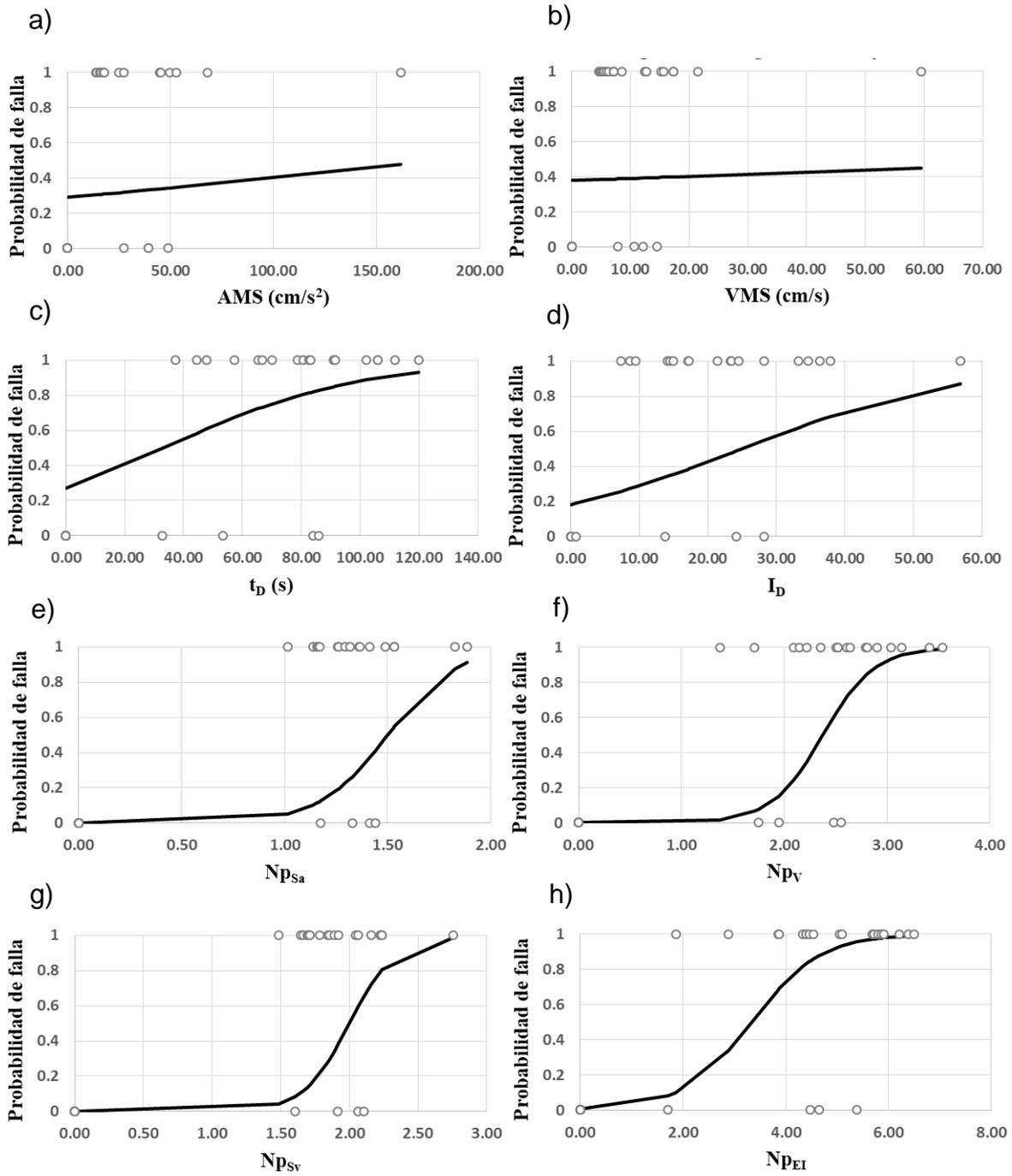


Figura A. 33 Curvas de fragilidad del ECR 4N con DME e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{psa} , f) N_{pV} , g) N_{psv} y h) N_{pEI} como segunda.

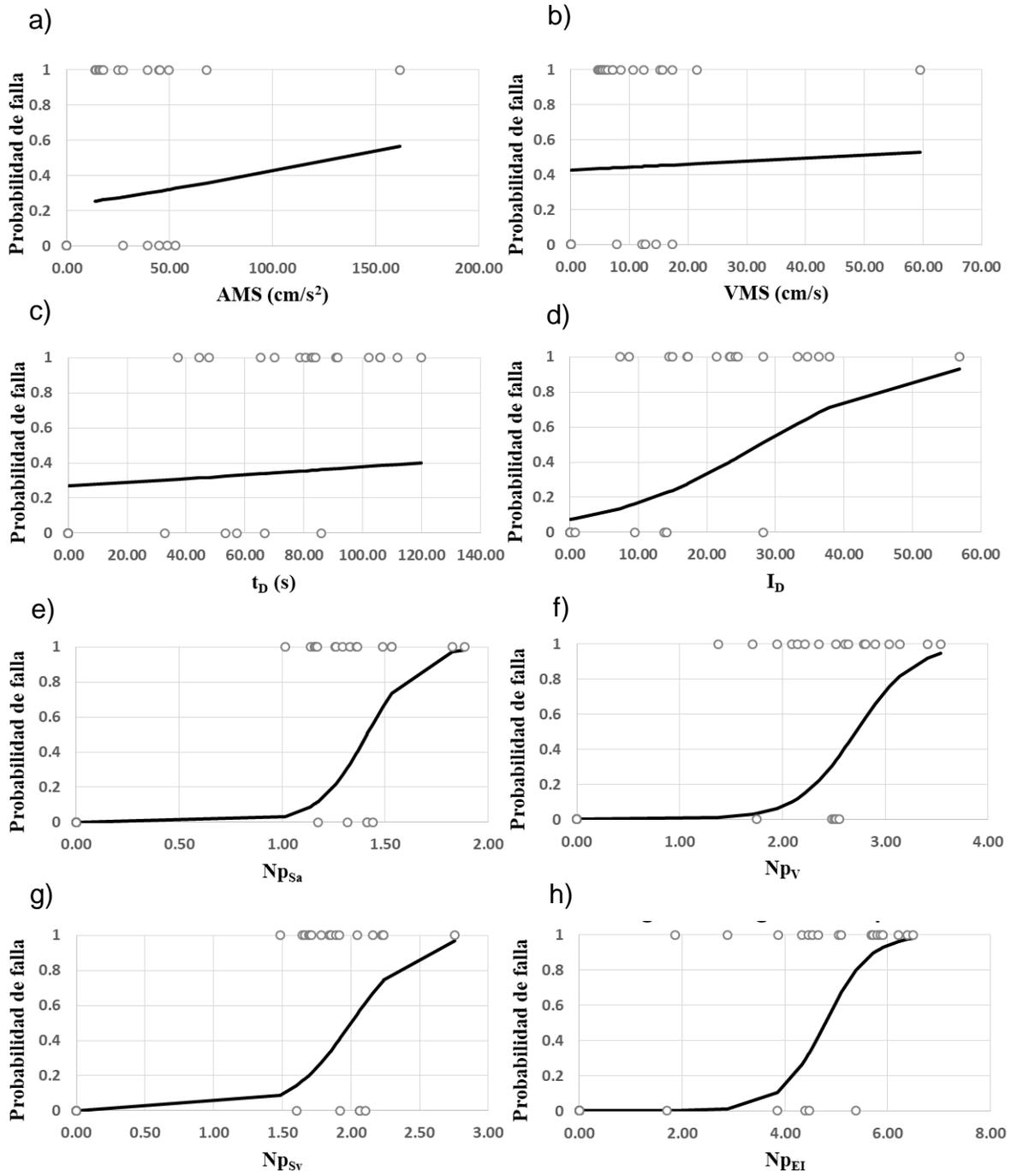


Figura A. 34 Curvas de fragilidad del ECR 4N con E_H e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

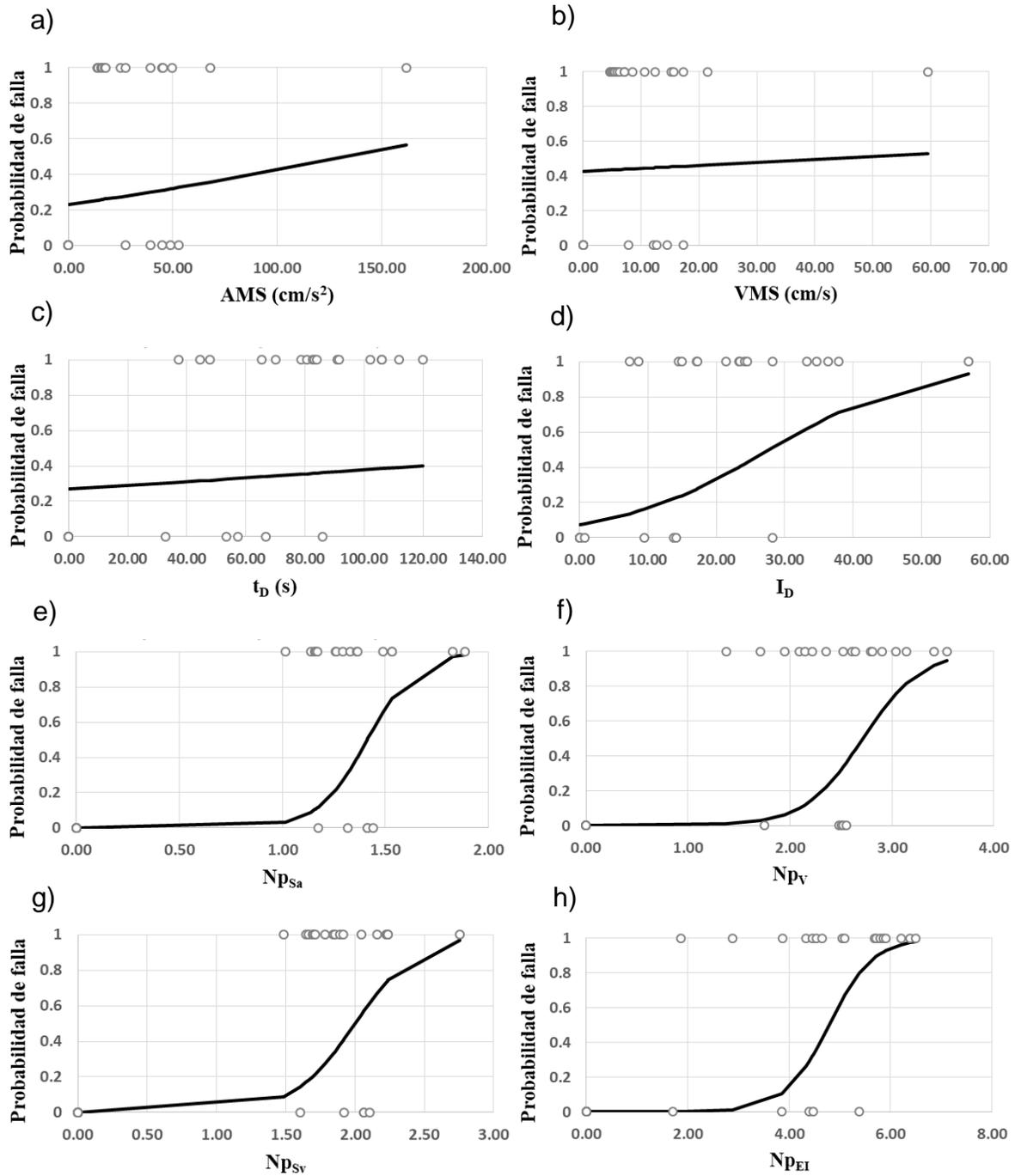


Figura A. 35 Curvas de fragilidad del ECR 7N con DME e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

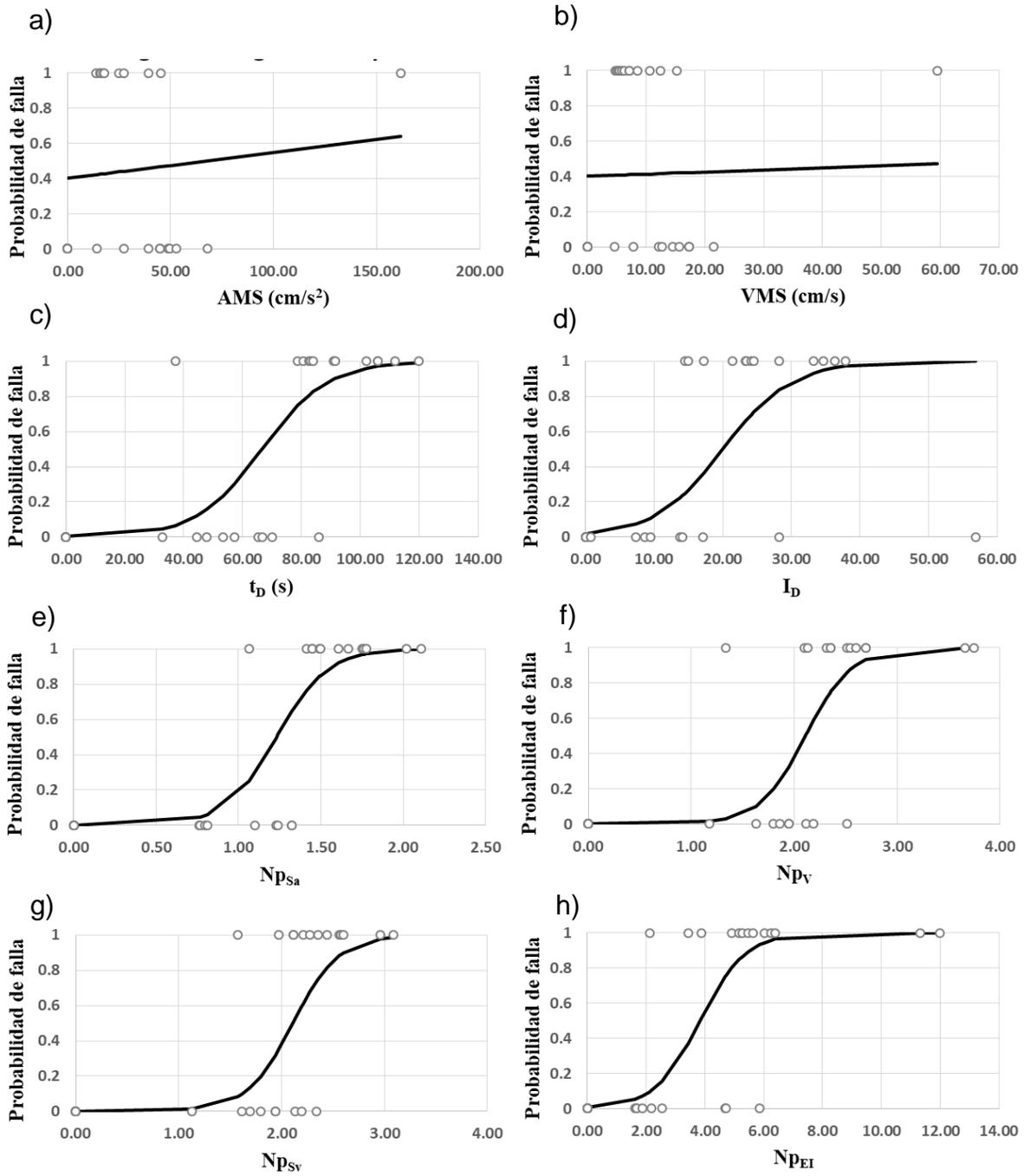


Figura A. 36 Curvas de fragilidad del ECR 7N con E_H e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

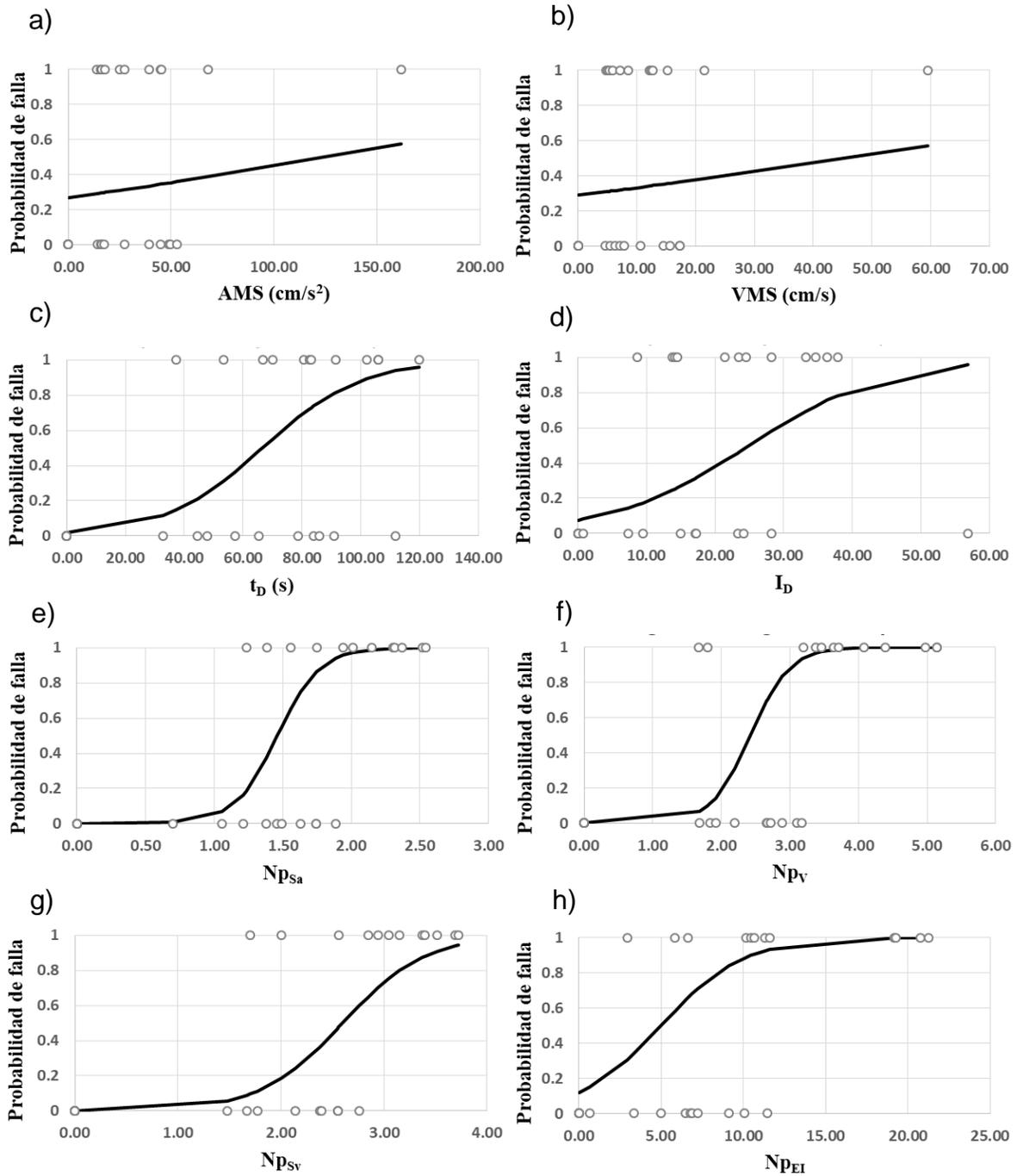


Figura A. 37 Curvas de fragilidad del ECR 10N con DME e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{psa} , f) N_{pV} , g) N_{psv} y h) N_{pEI} como segunda.

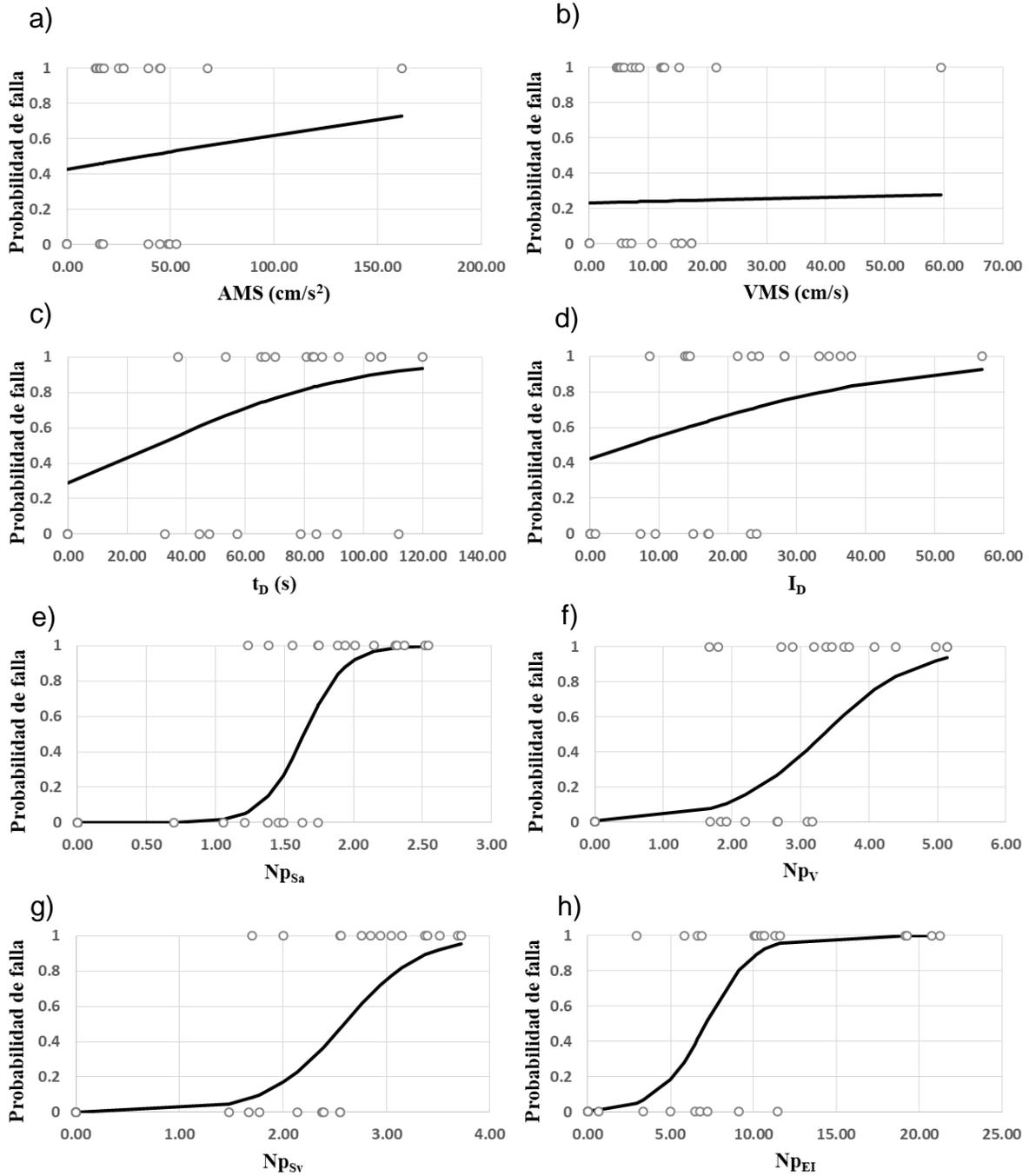


Figura A. 38 Curvas de fragilidad del ECR 10N con E_H e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

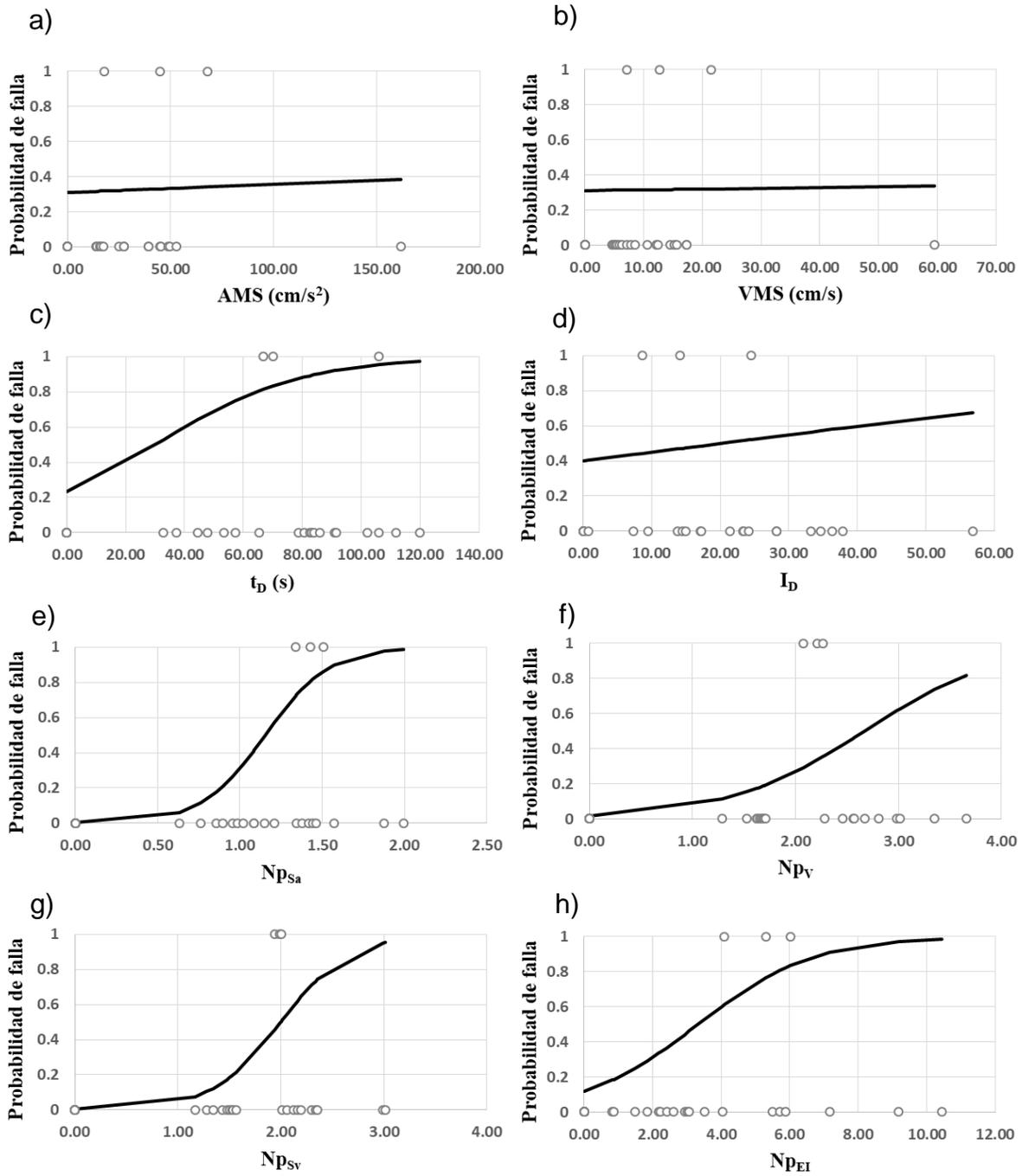


Figura A. 39 Curvas de fragilidad del ECR 15N con DME e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda.

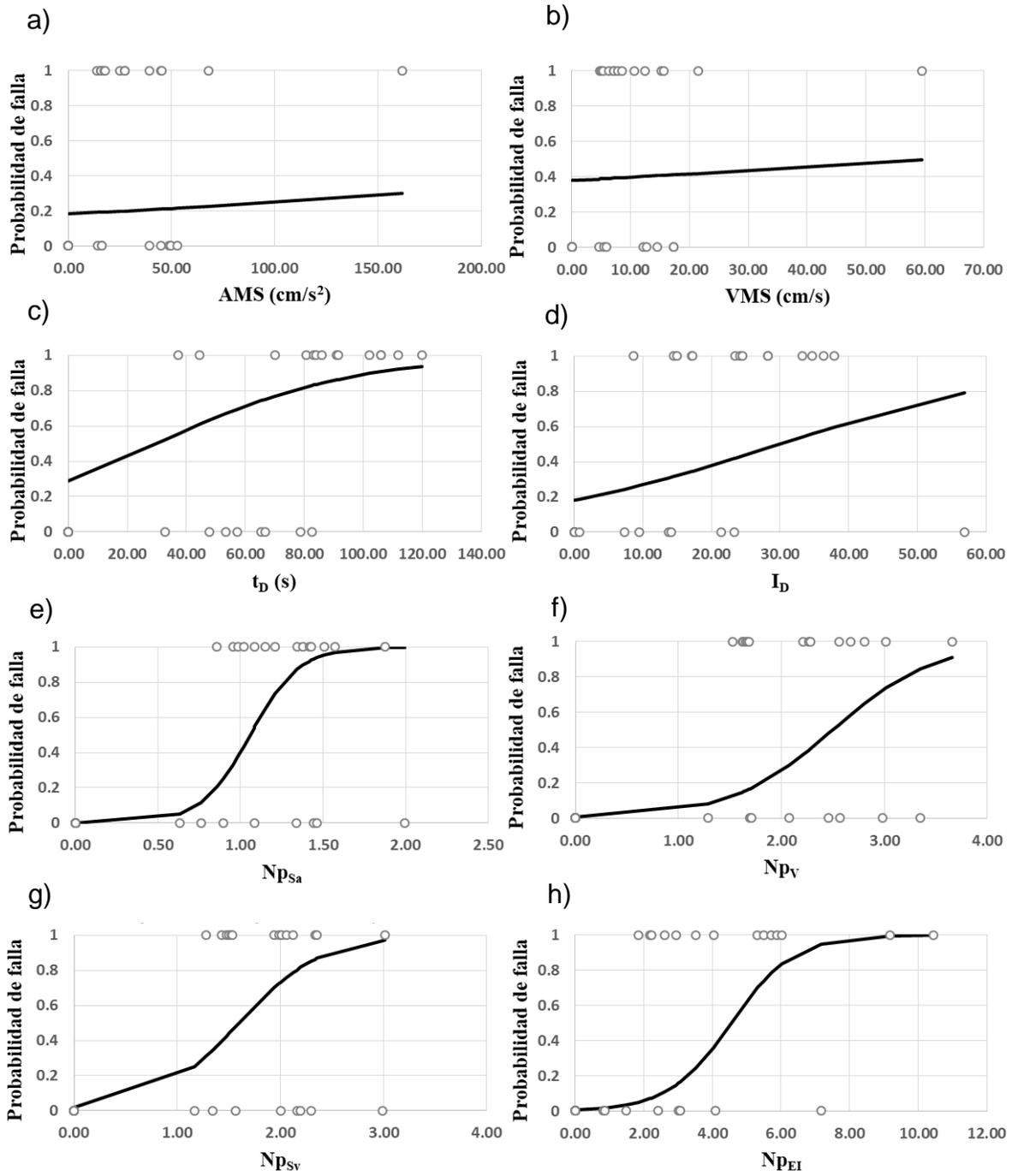


Figura A. 40 Curvas de fragilidad del ECR 15N con E_H e $I_B = 1g$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda.

Apéndice 3. Superficies de fragilidad sísmica.

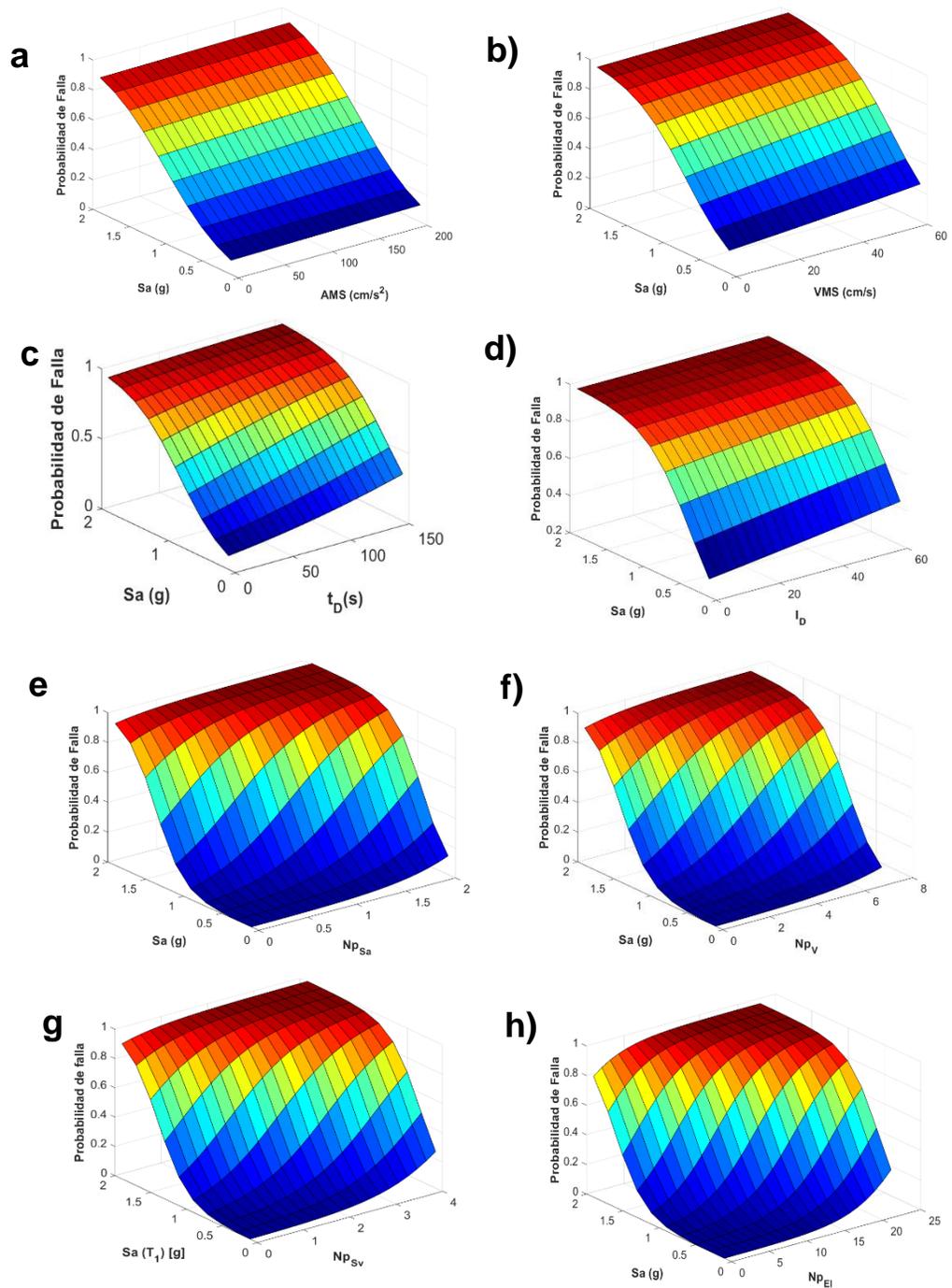


Figura A. 41 Superficies de fragilidad del marco 4N con Sa como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda para E_H como PDS.

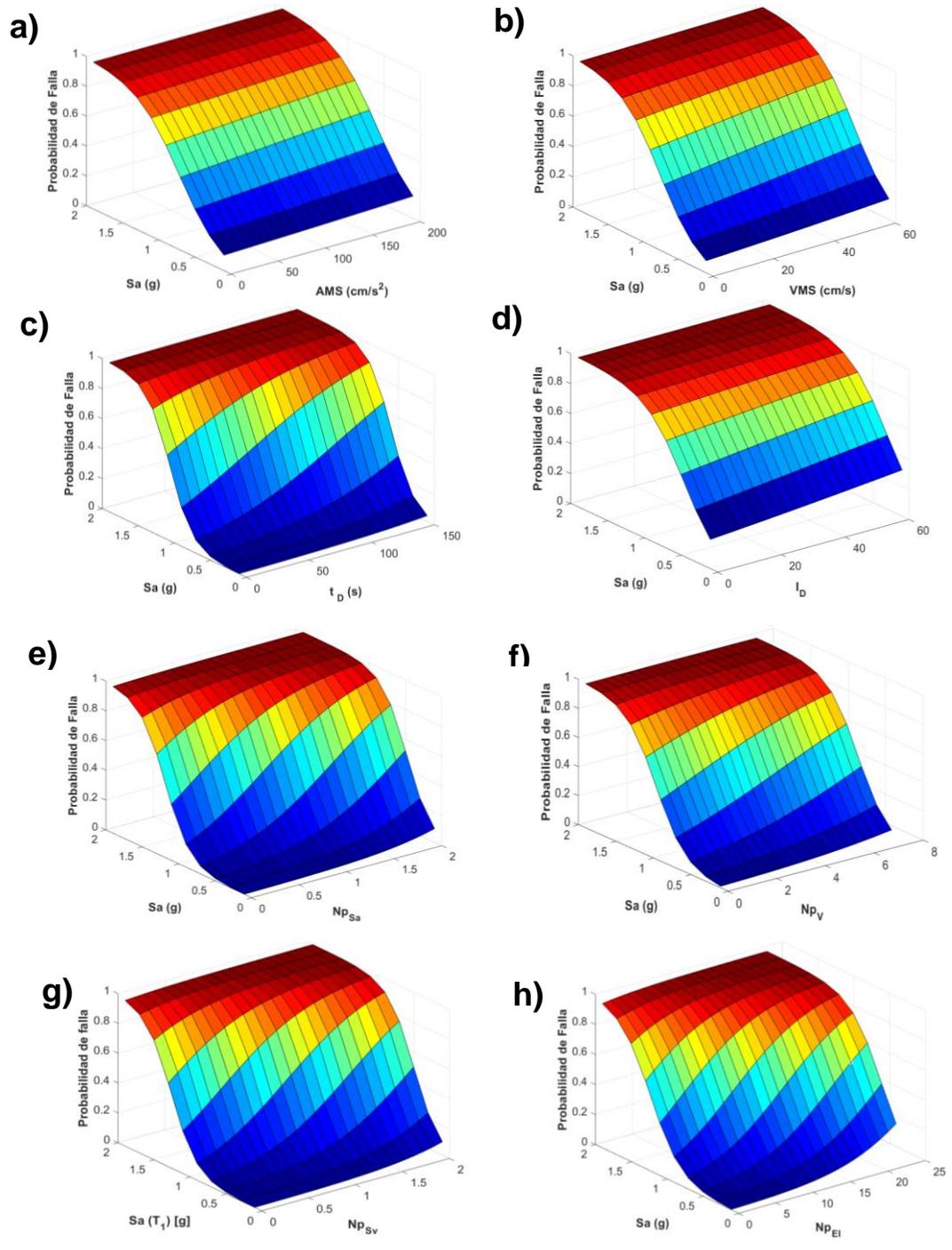


Figura A. 42 Superficies de fragilidad del marco 7N con $S_a(T_1)$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para E_H como PDS.

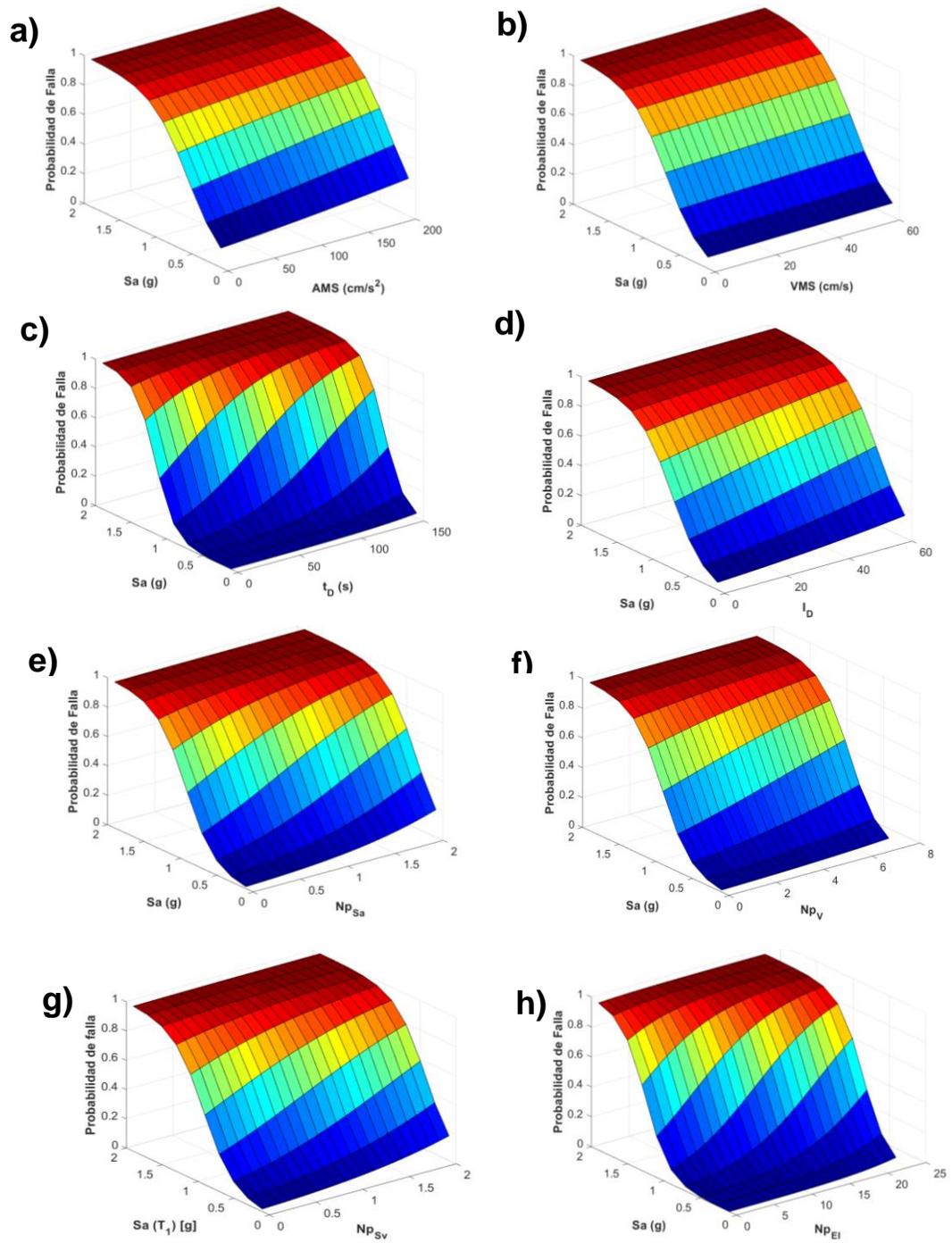


Figura A. 43 Superficies de fragilidad del marco 10N con Sa (T_1) como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) NP_{Sa} , f) NP_V , g) NP_{Sv} y h) NP_{EI} como segunda para E_H como PDS.

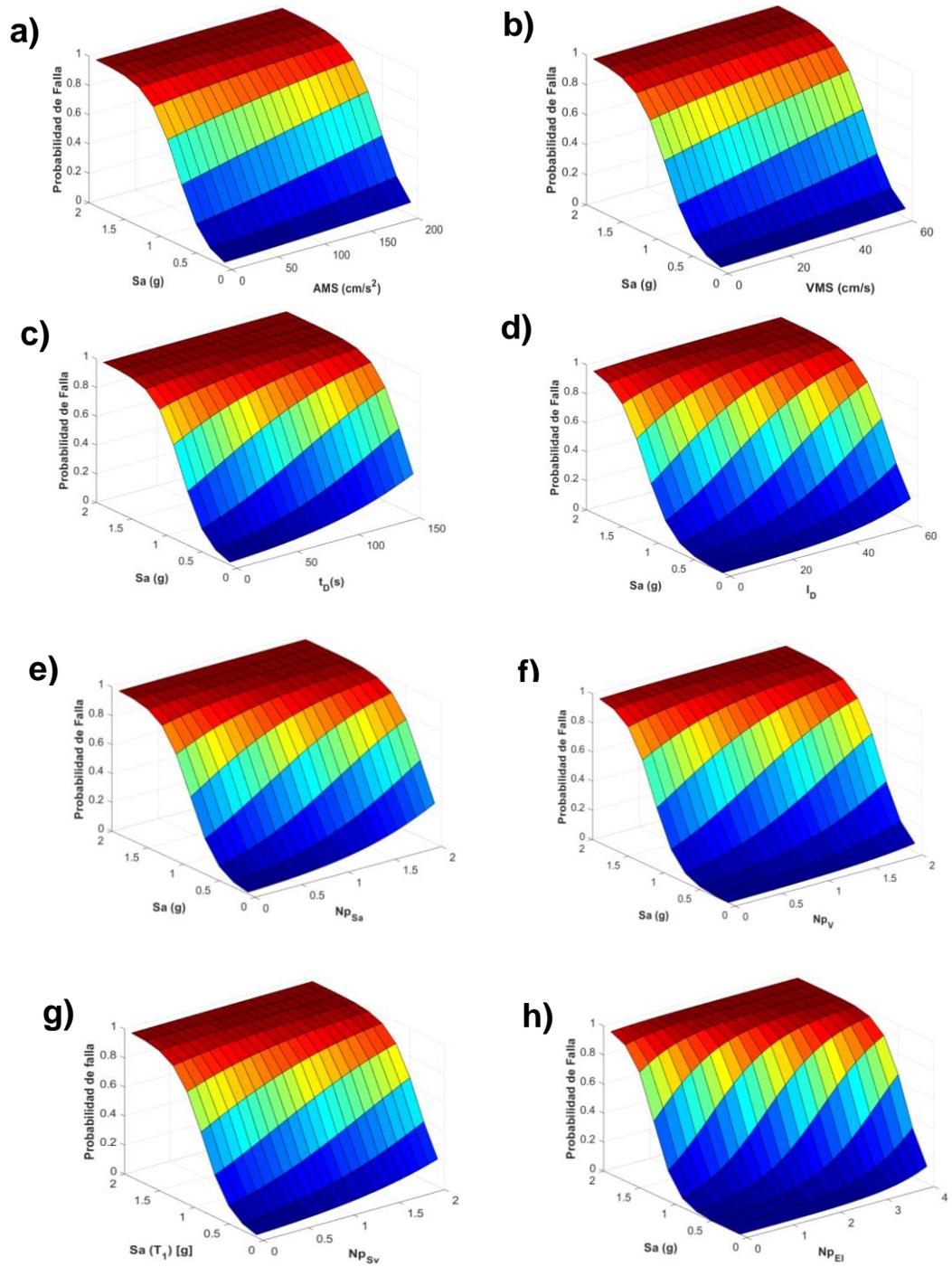


Figura A. 44 Superficies de fragilidad del marco 15N con $S_a(T_1)$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pv} , g) N_{psv} y h) N_{pei} como segunda para E_H como PDS.

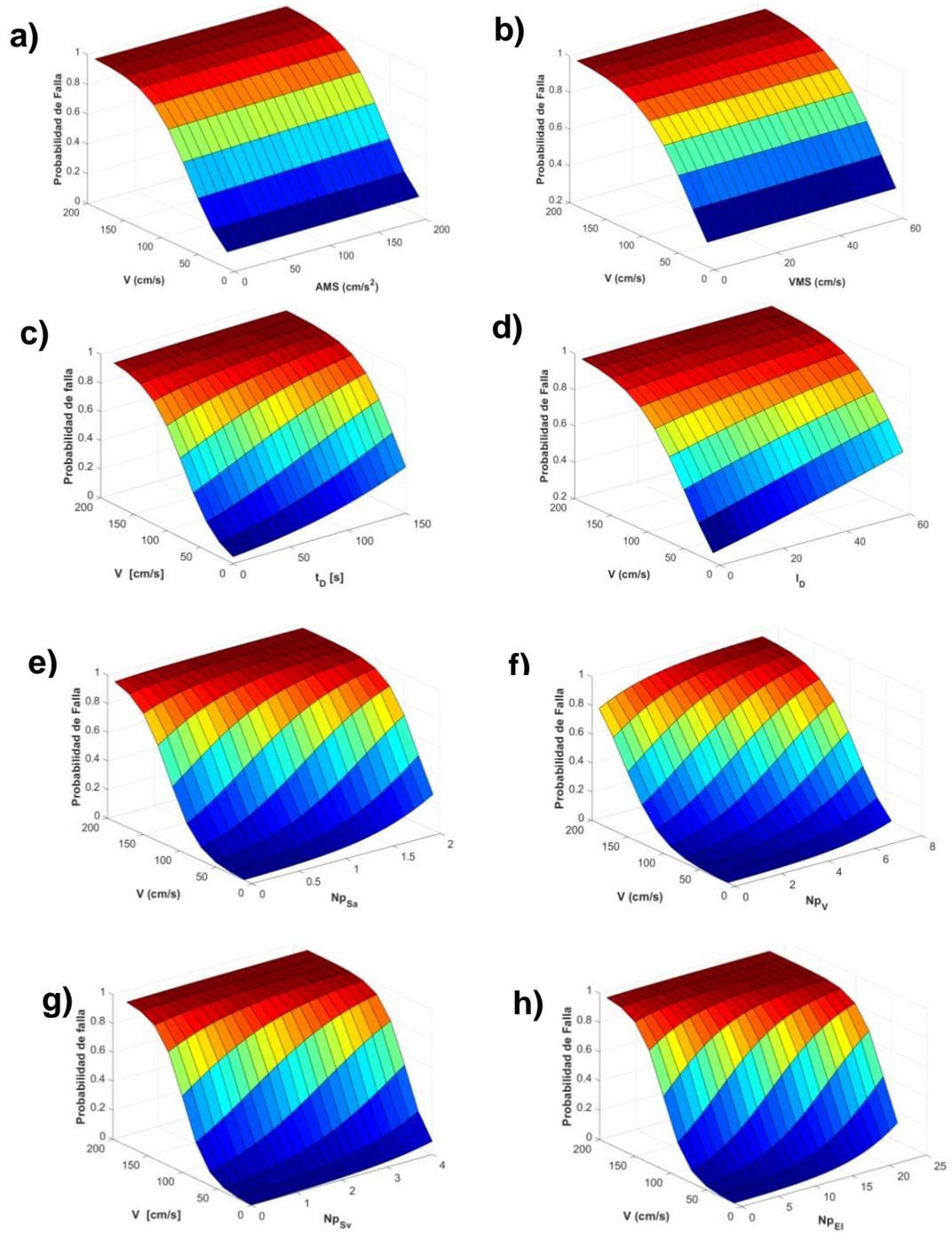


Figura A. 45 Superficies de fragilidad del marco 4N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $Np_{s\alpha}$, f) Np_V , g) Np_{sV} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS.

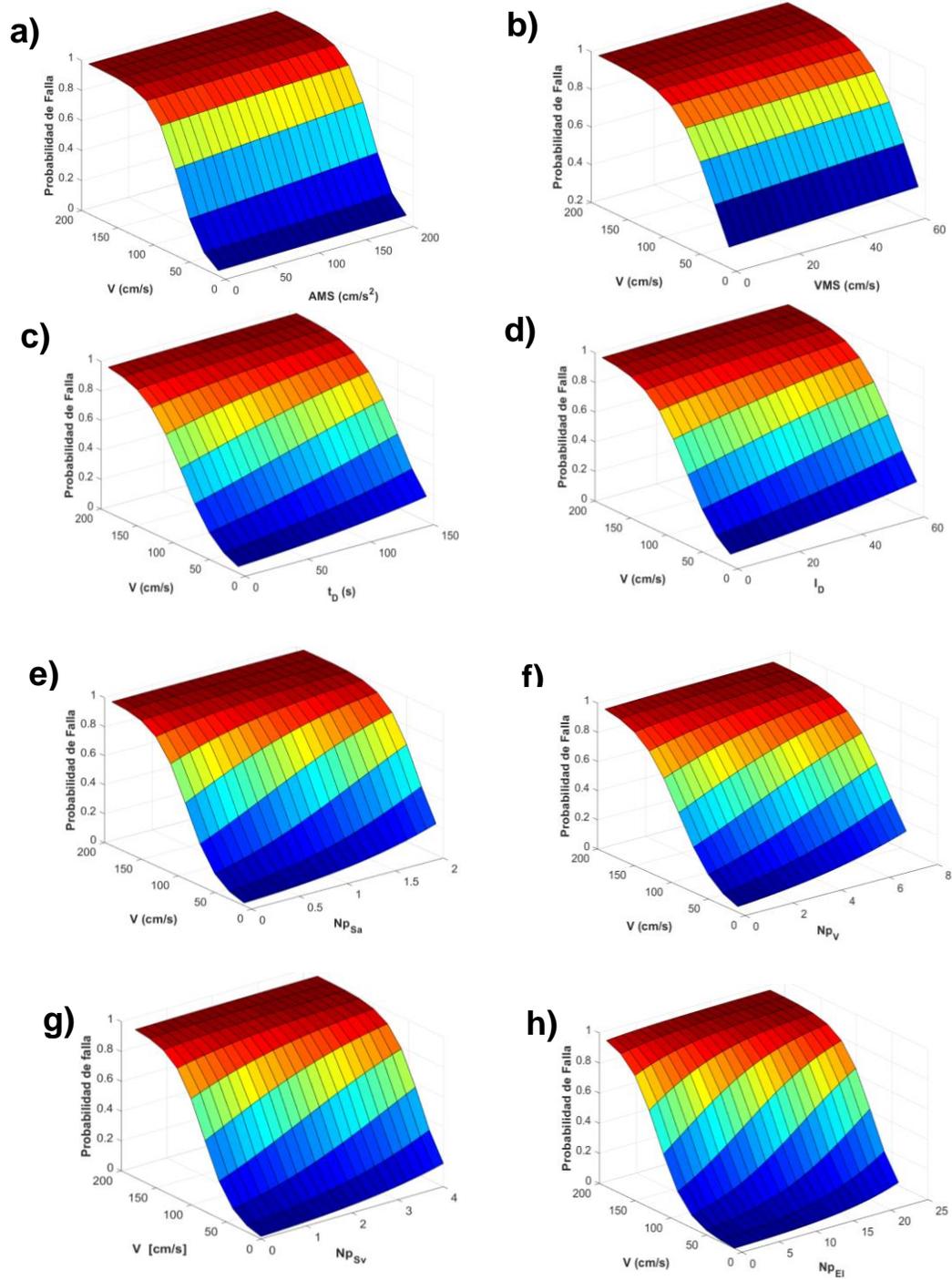


Figura A. 46 Superficies de fragilidad del marco 4N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{sa} , f) Np_v , g) Np_{sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS.

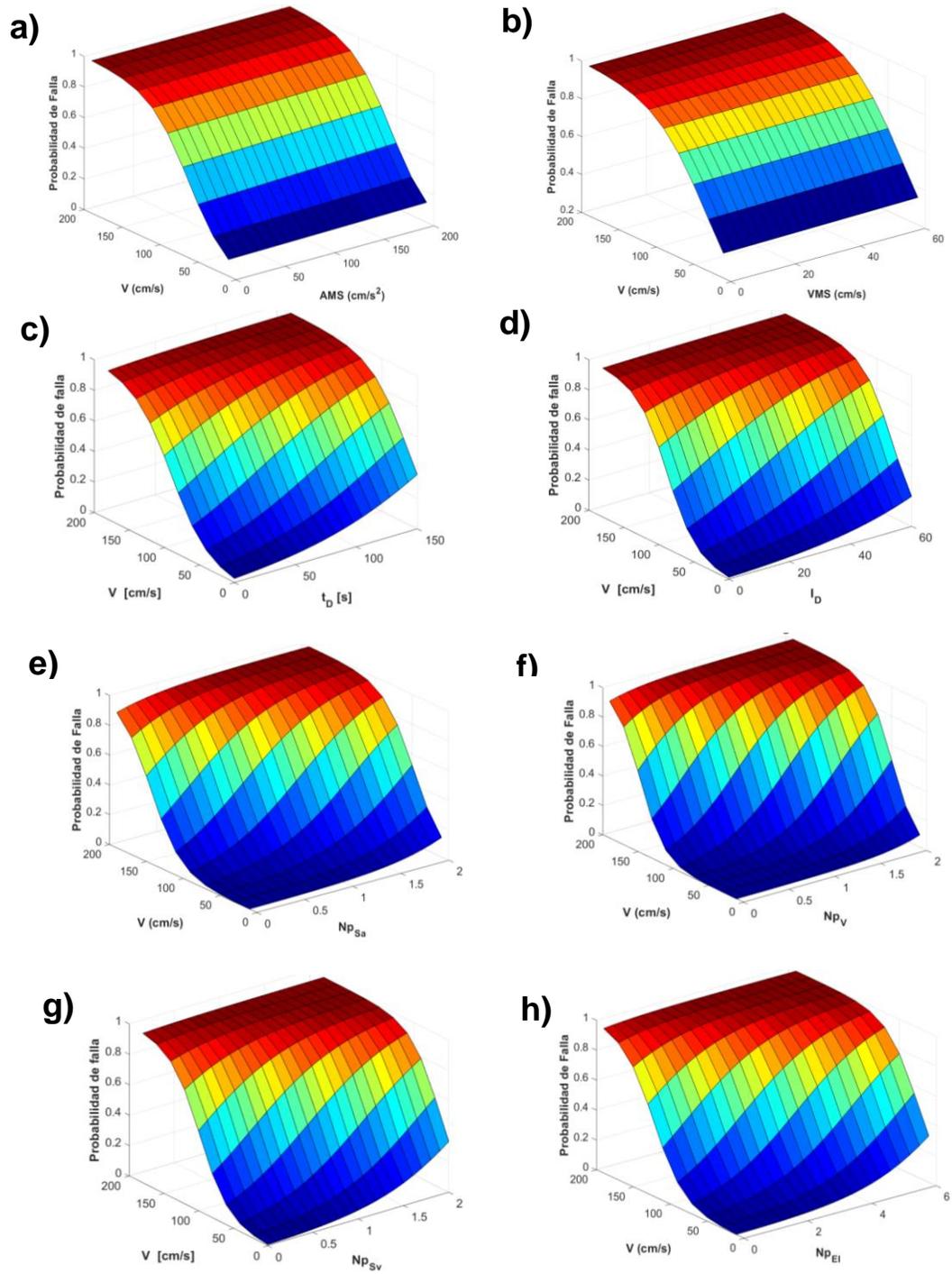


Figura A. 47 Superficies de fragilidad del marco 7N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) NP_{Sa} , f) NP_V , g) NP_{Sv} y h) NP_{EI} como segunda para DME como PDS.

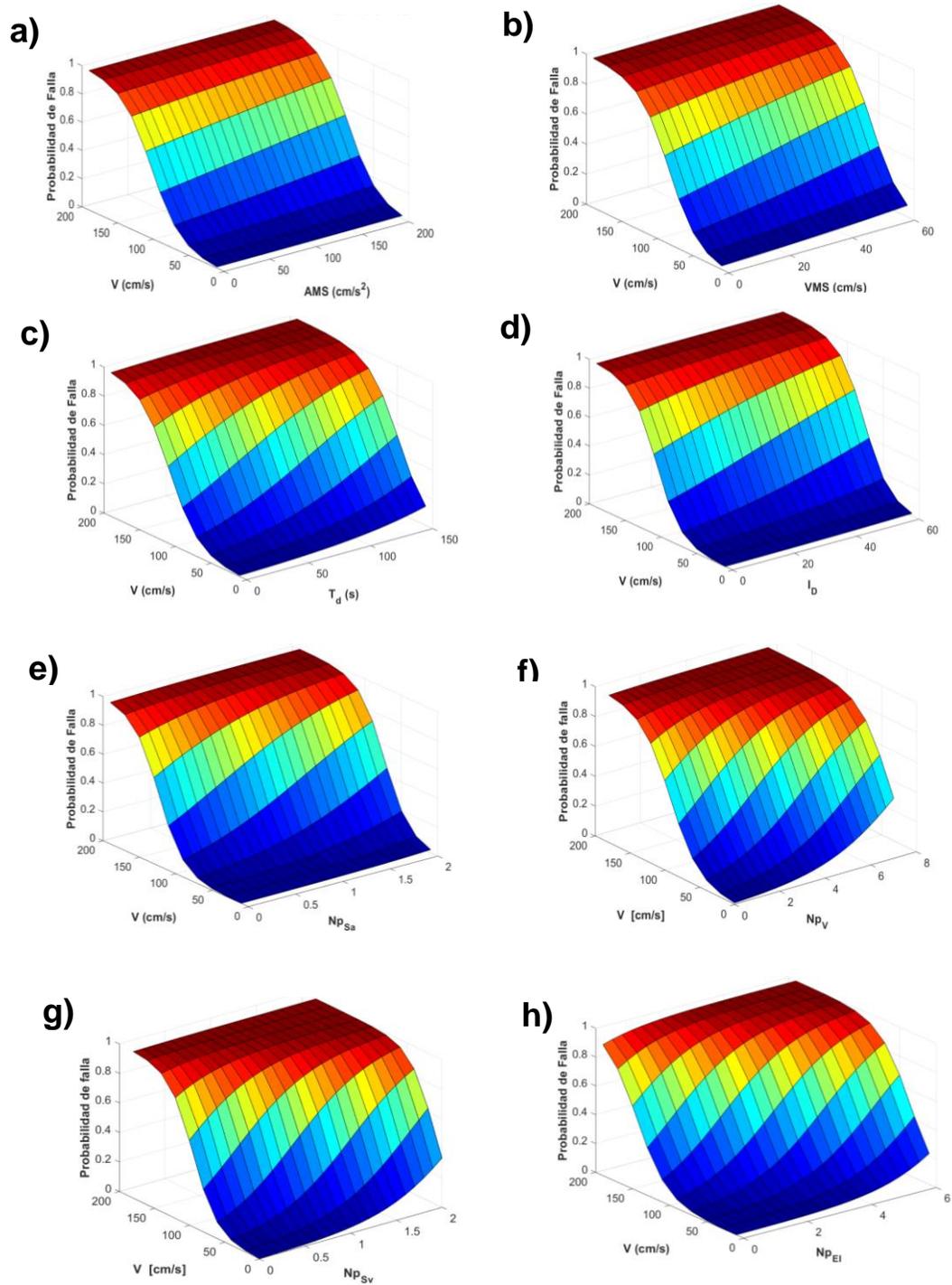


Figura A. 48 Superficies de fragilidad del marco 7N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_d , d) I_d , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para E_H como PDS.

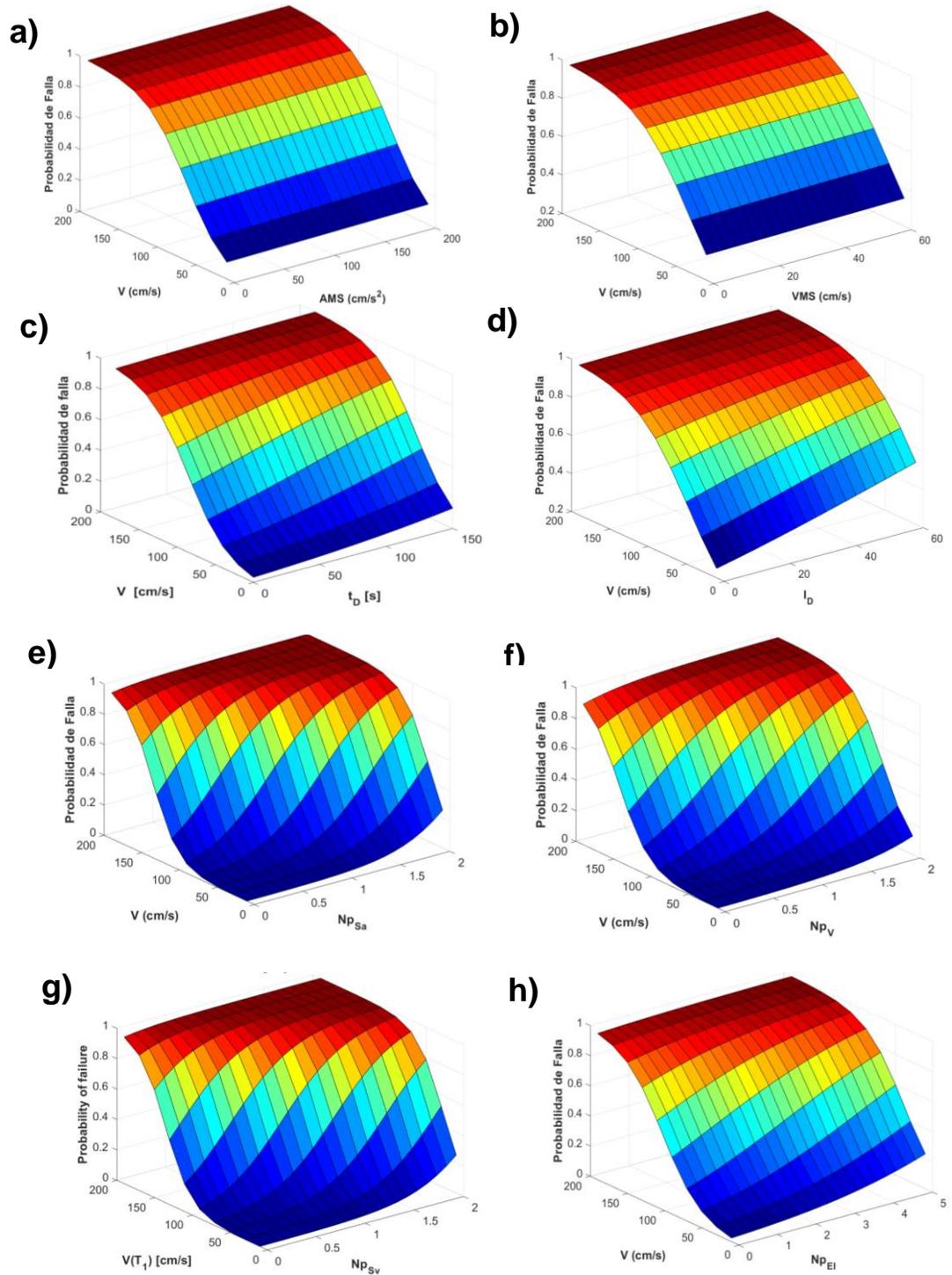


Figura A. 49 Superficies de fragilidad del marco 10N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D, d) I_D, e) N_{psa}, f) N_{pv}, g) N_{psv} y h) N_{pEI} como segunda para DME como PDS.

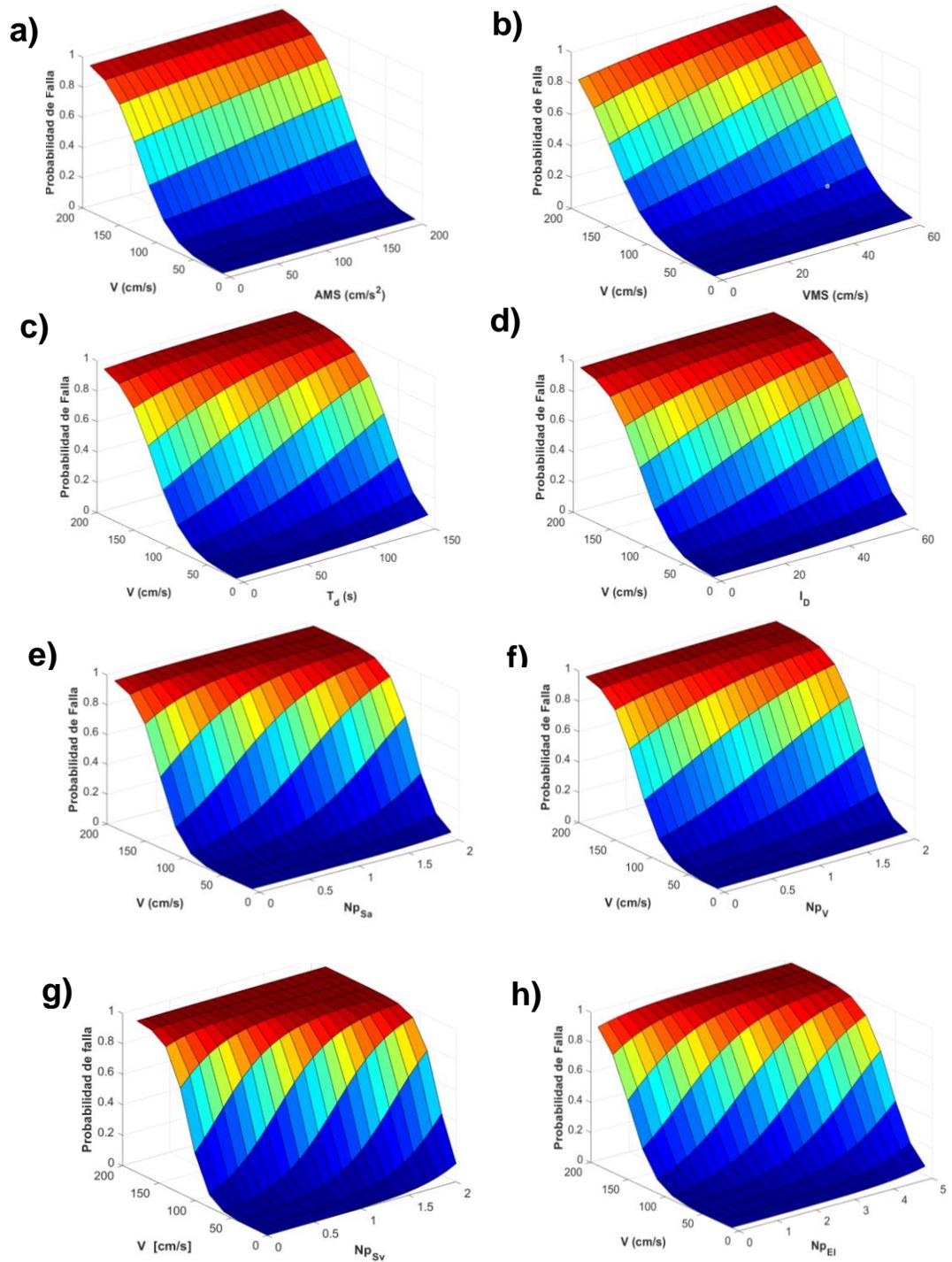


Figura A. 50 Superficies de fragilidad del marco 10N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_d , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para E_H como PDS.

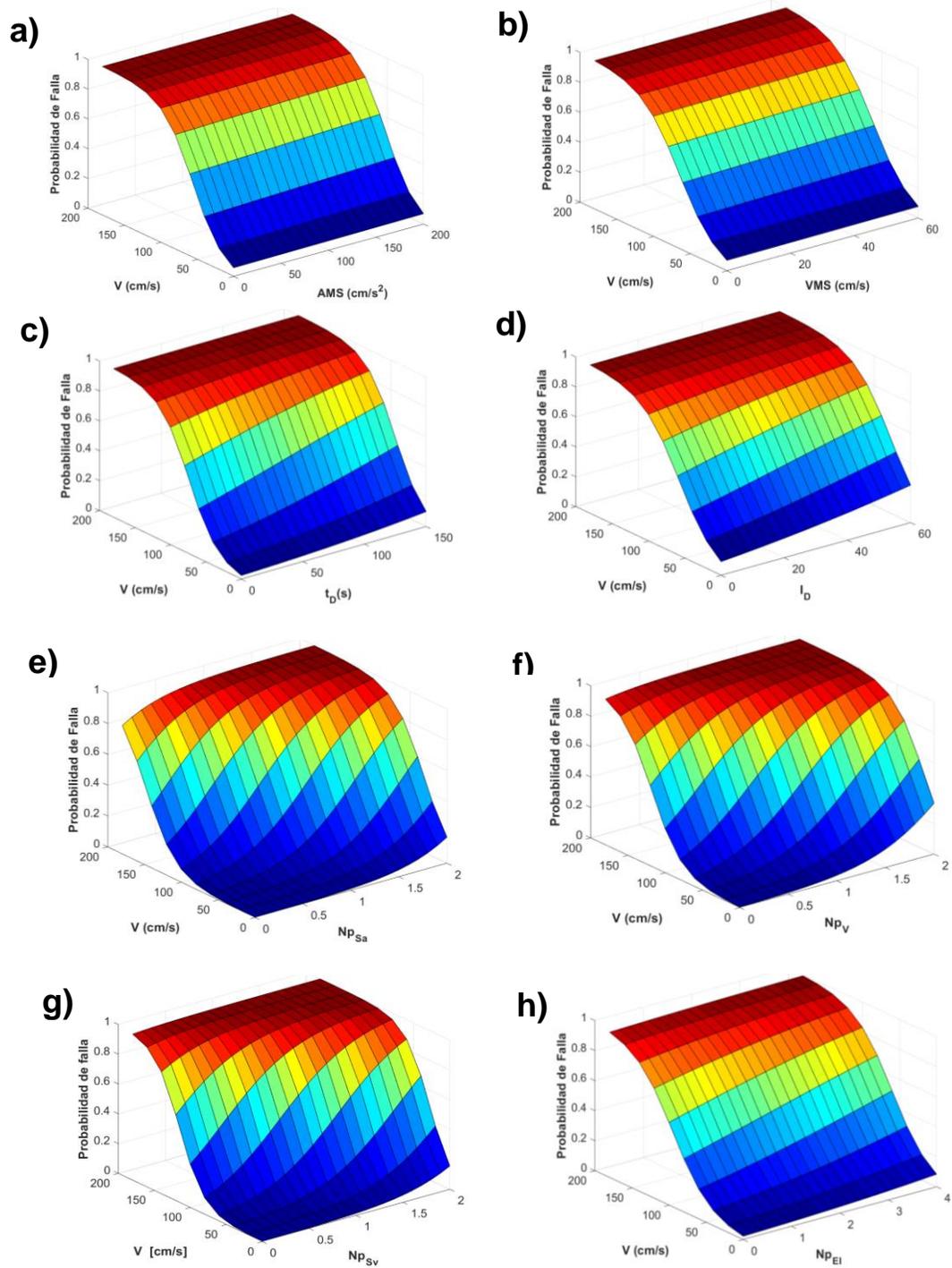


Figura A. 51 Superficies de fragilidad del marco 15N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_d , d) I_d , e) Np_{sa} , f) Np_v , g) Np_{sv} y h) Np_{ei} como segunda para DME como PDS.

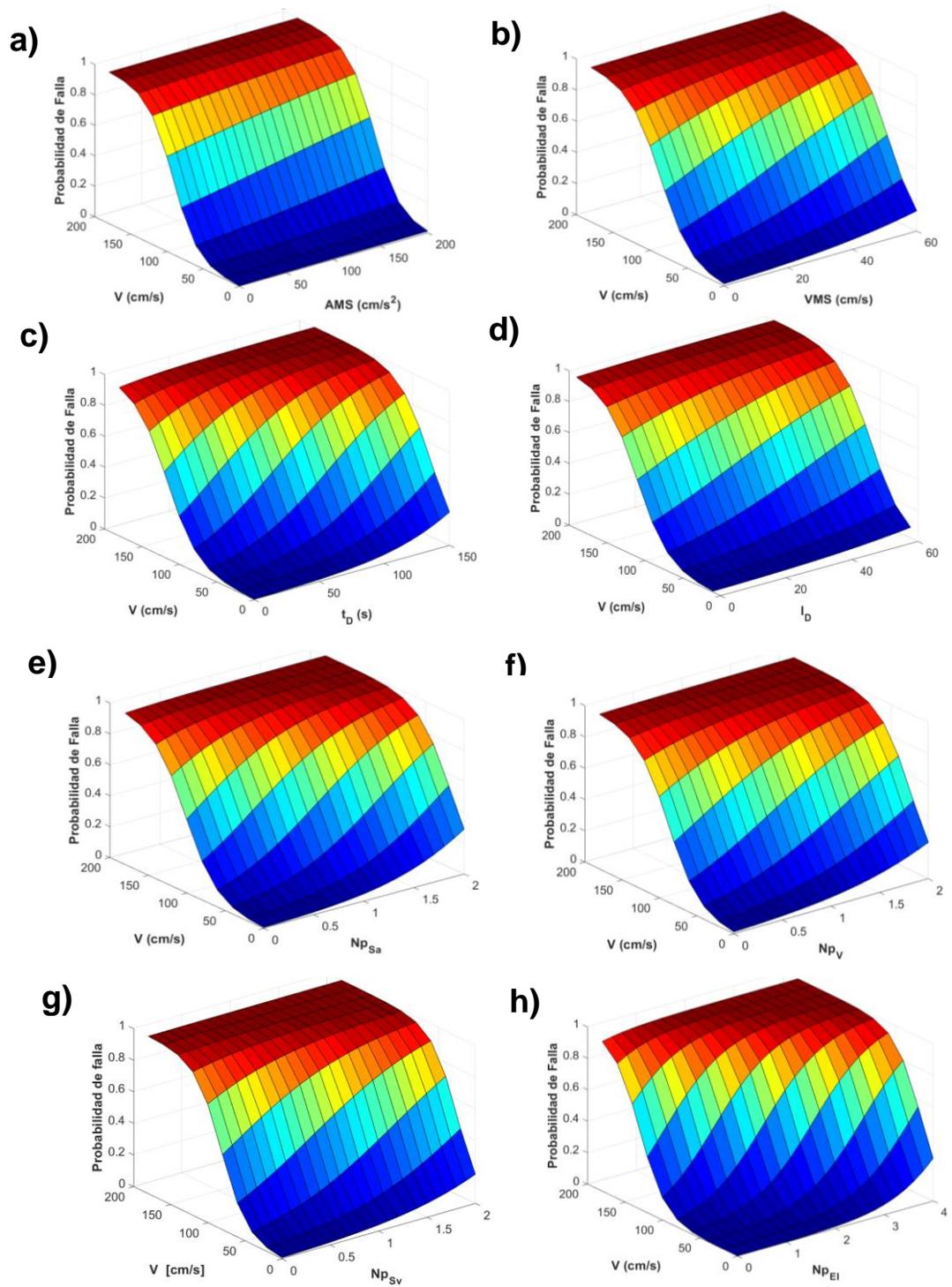


Figura A. 52 Superficies de fragilidad del marco 15N con V como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda para E_H como PDS.

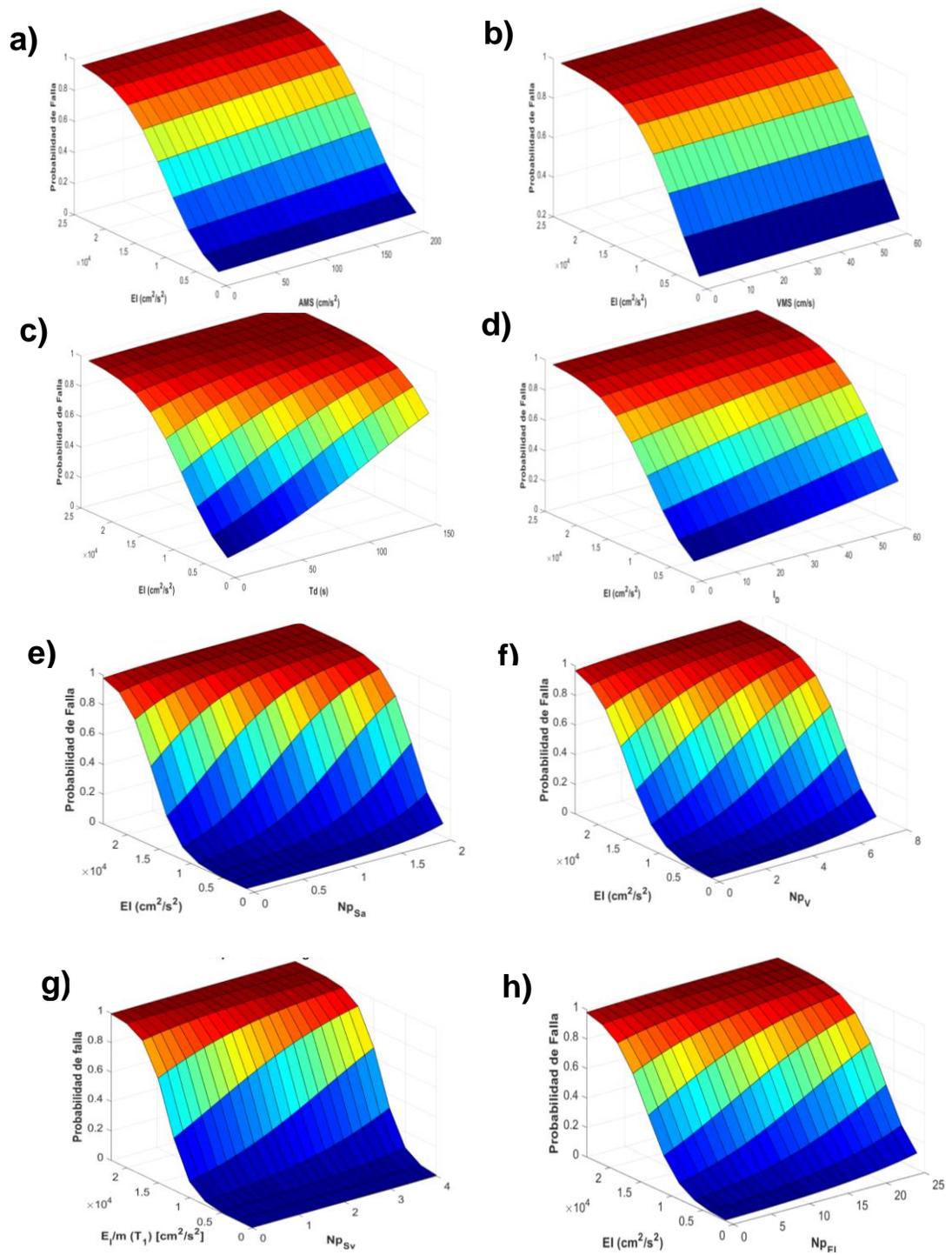


Figura A. 53 Superficies de fragilidad del marco 4N con EI/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_b , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda para DME como PDS.

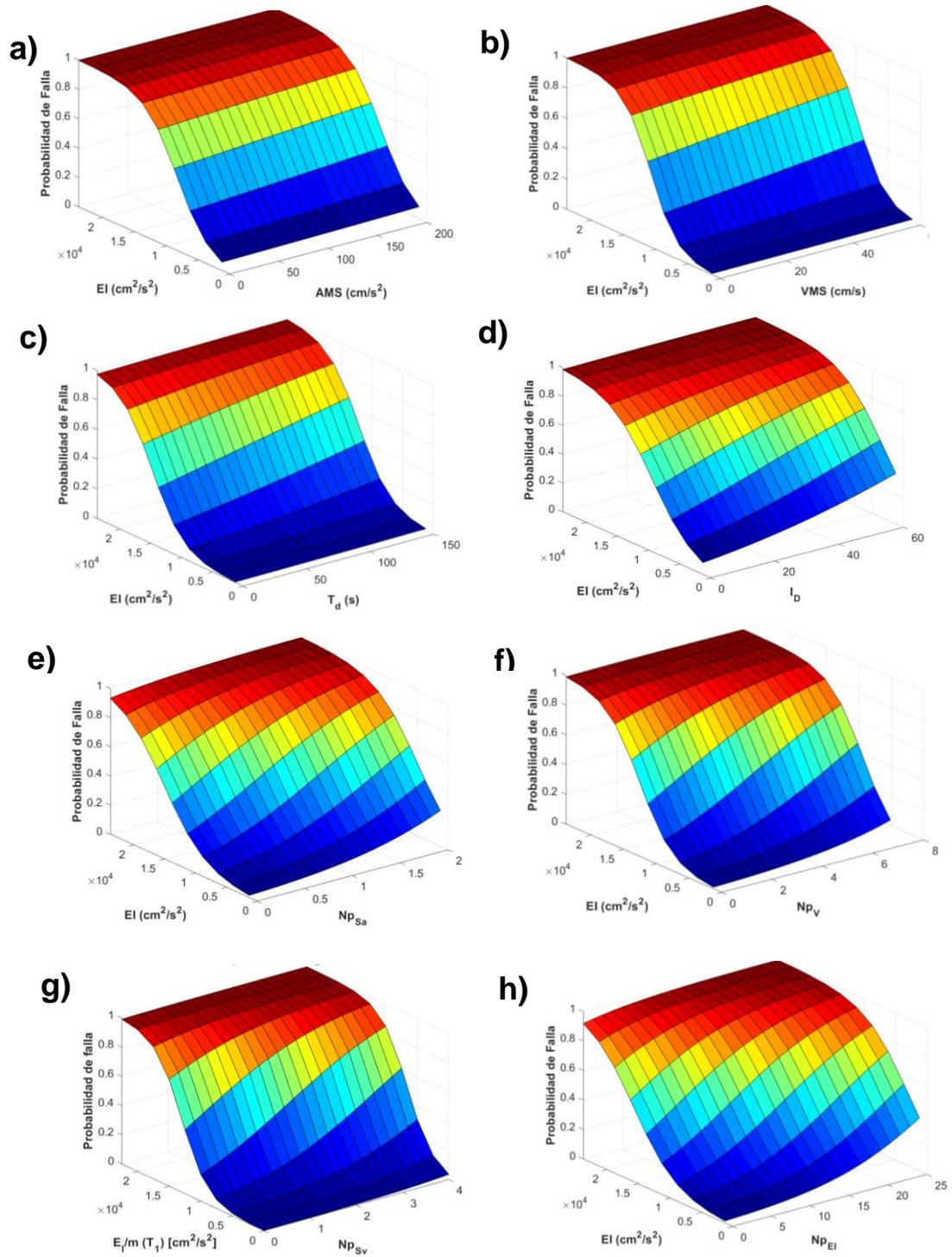


Figura A. 54 Superficies de fragilidad del marco 4N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) T_d , d) I_D , e) N_{psa} , f) N_{pv} , g) N_{psv} y h) N_{pei} como segunda para E_H como PDS.

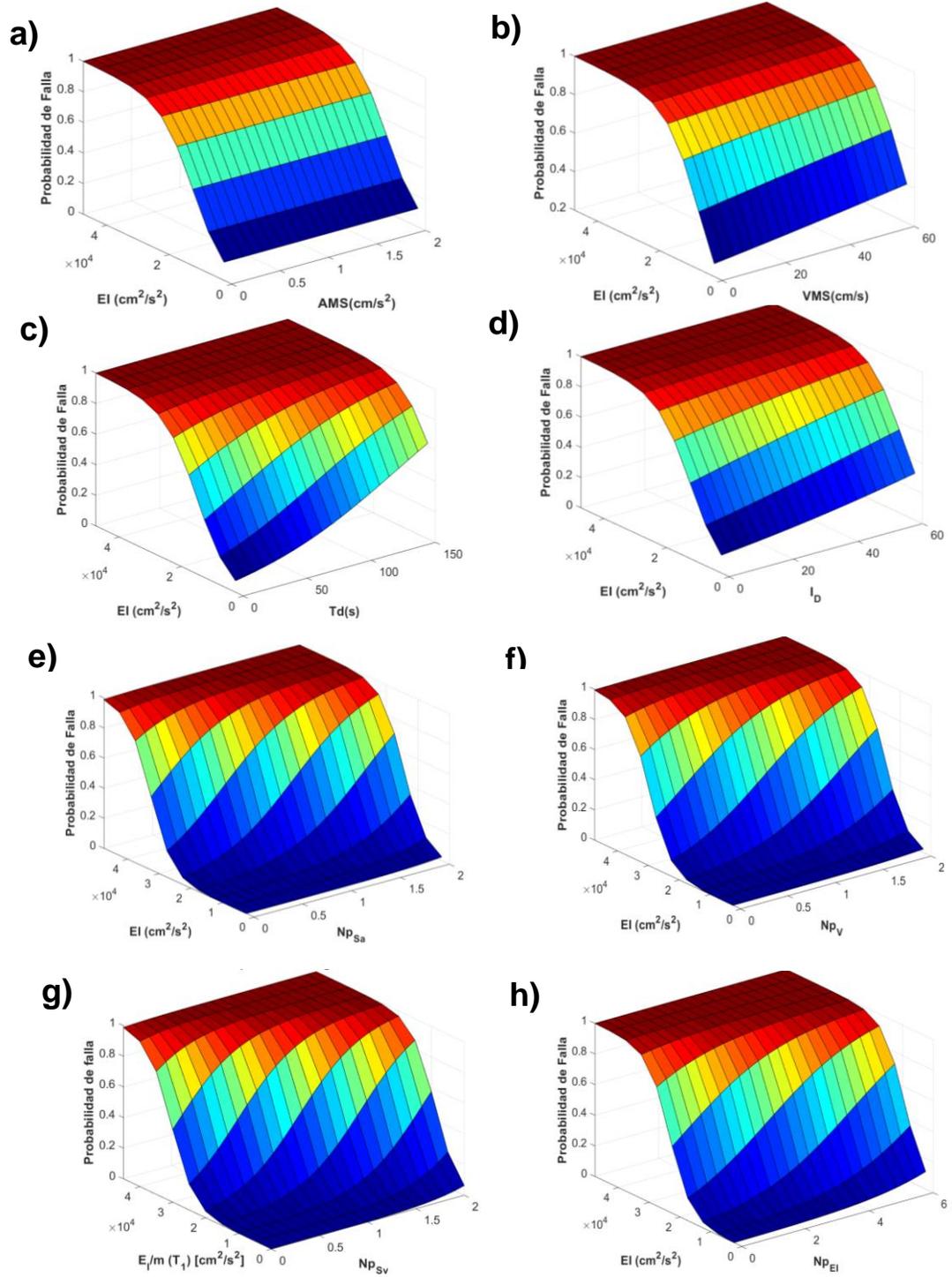


Figura A. 55 Superficies de fragilidad del marco 7N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) T_d , d) I_D , e) $N_{p_{sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{sv}}$ y h) $N_{p_{ei}}$ como segunda para DME como PDS.

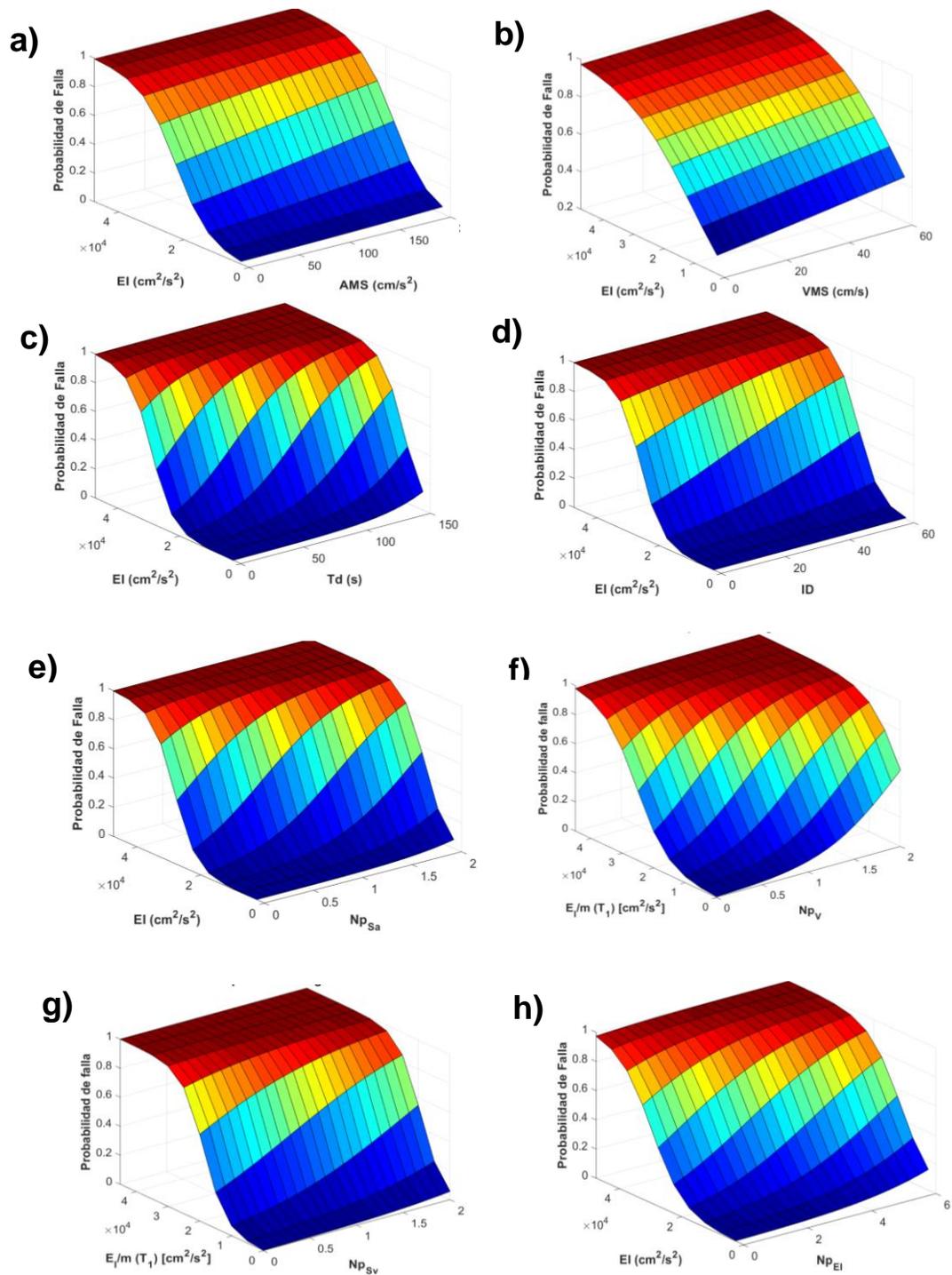


Figura A. 56 Superficies de fragilidad del marco 7N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_d , d) ID, e) $N_{p_{Sa}}$, f) $N_{p_{Sv}}$, g) $N_{p_{sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para E_H como PDS.

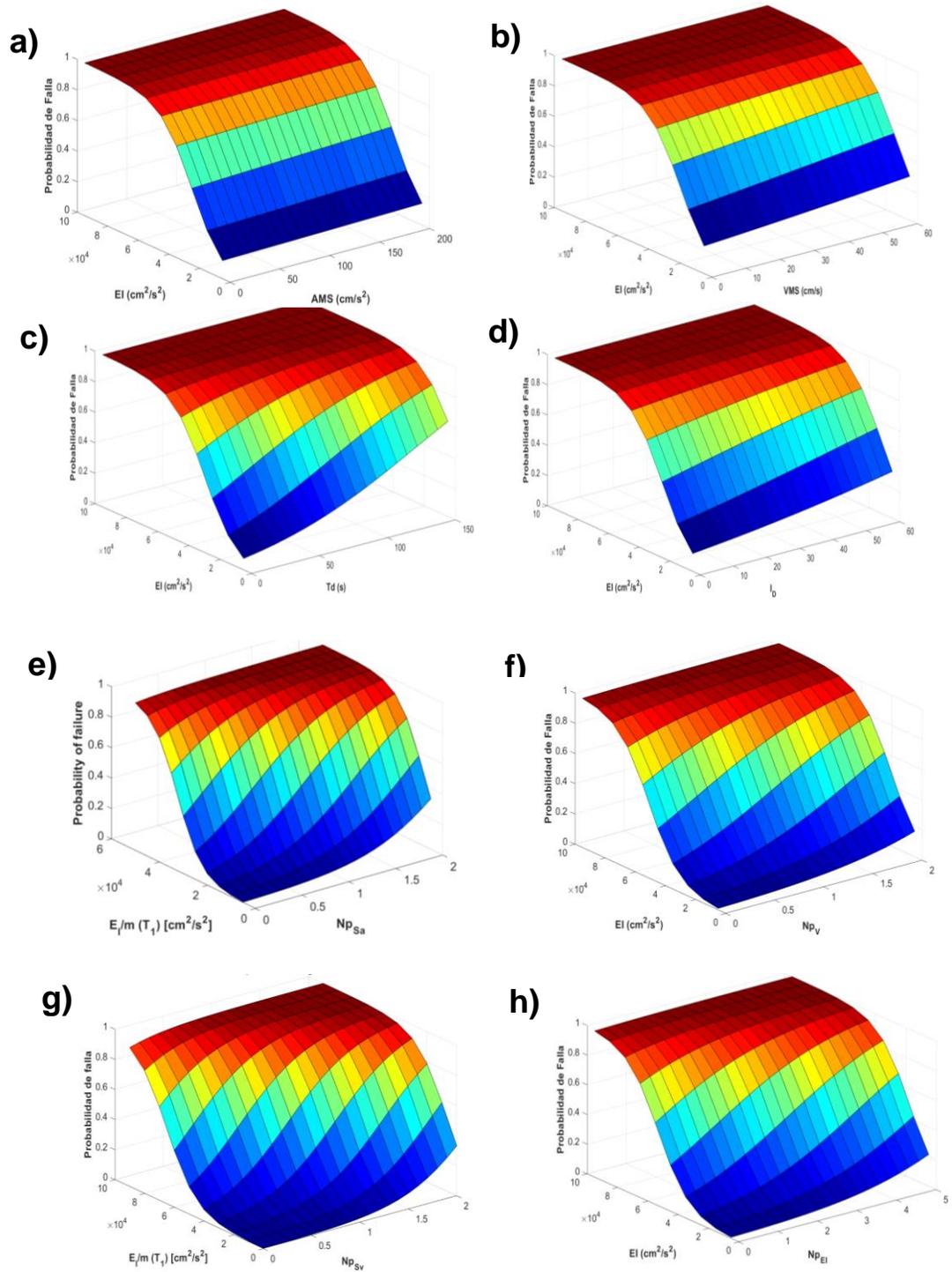


Figura A. 57 Superficies de fragilidad del marco 10N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_d , d) I_b , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda para DME como PDS.

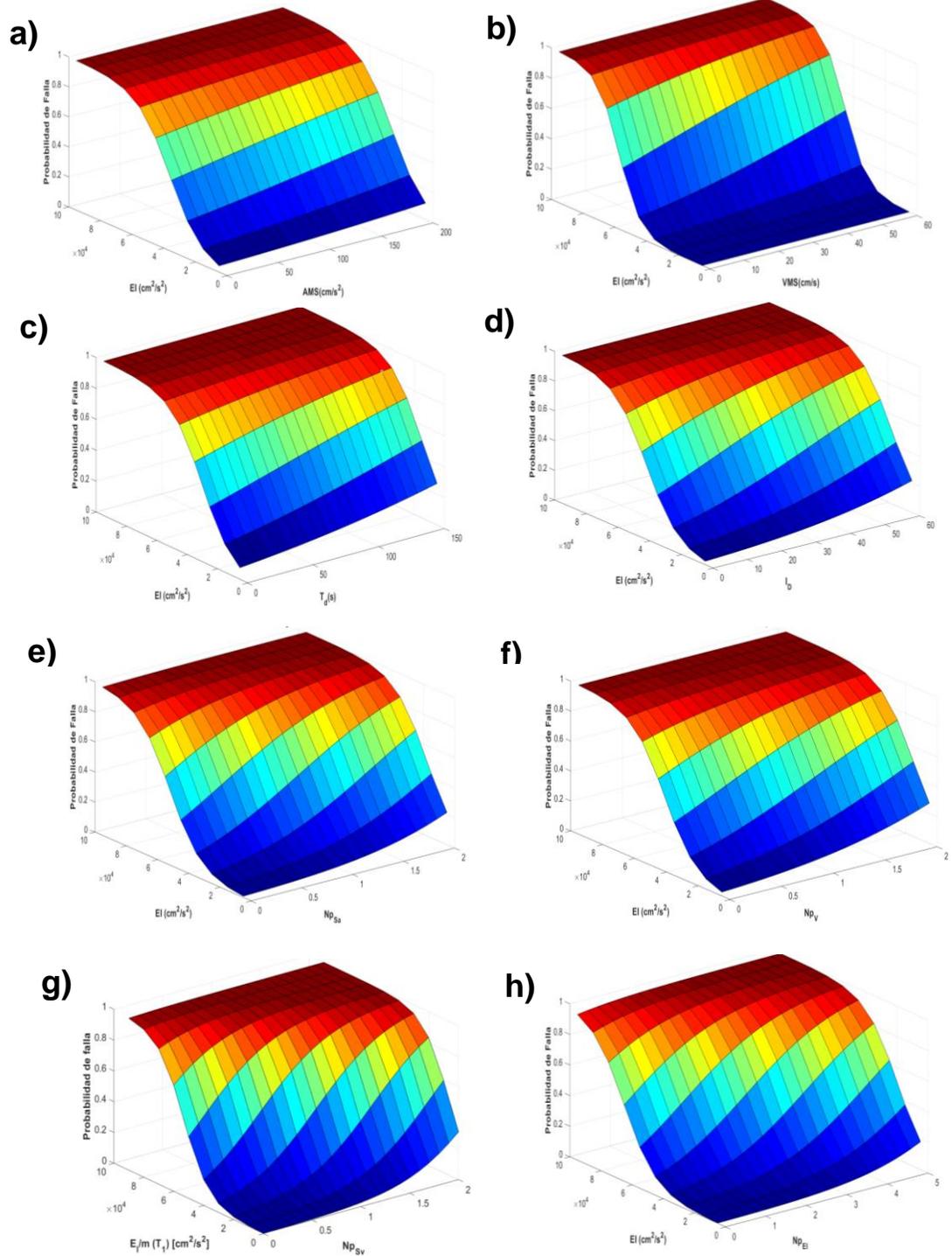


Figura A. 58 Superficies de fragilidad del marco 10N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_b , d) l_b , e) N_{psa} , f) N_{pv} , g) N_{psv} y h) N_{pEI} como segunda para E_H como PDS.

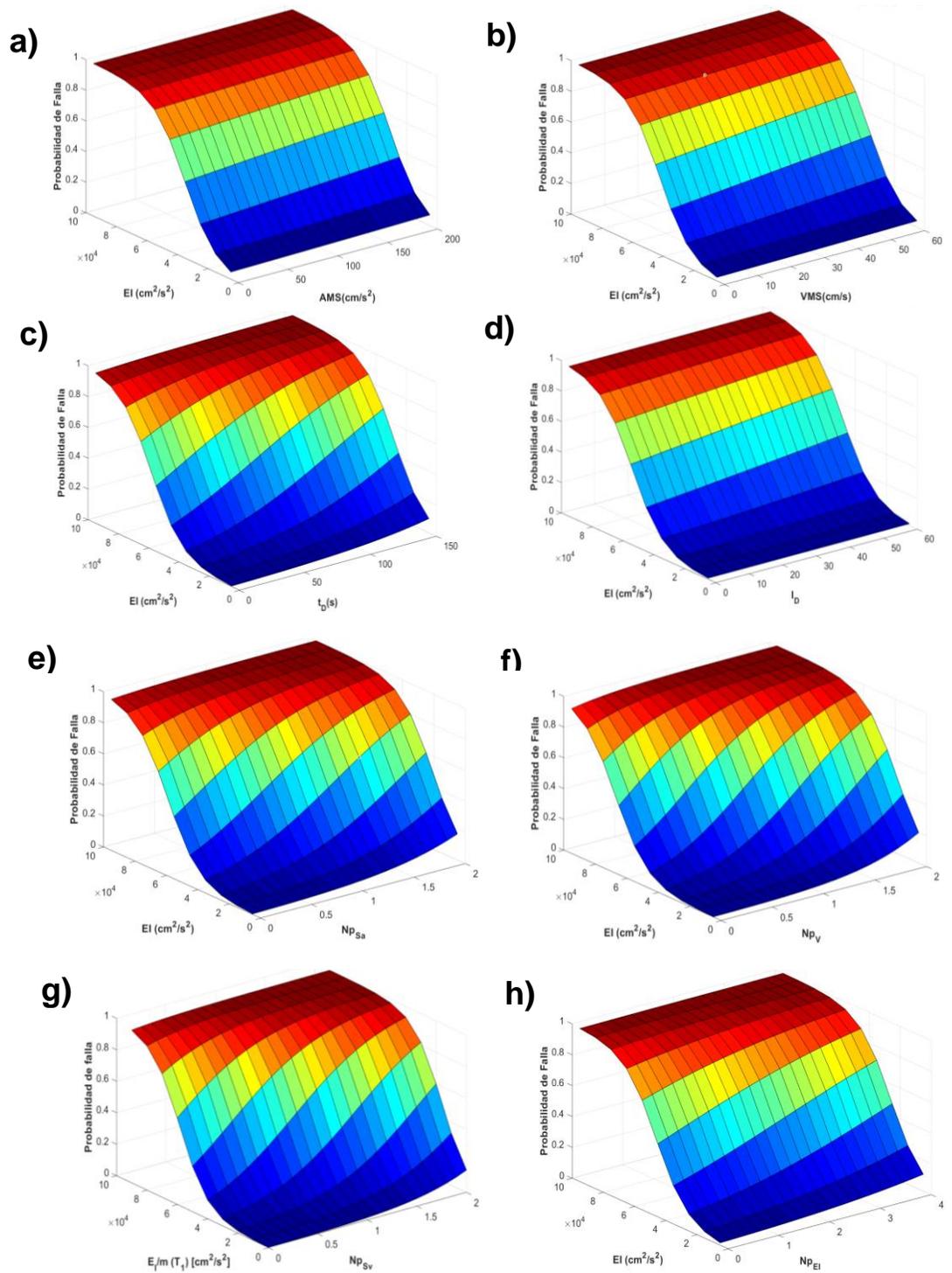


Figura A. 59 Superficies de fragilidad del marco 15N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{psa} , f) N_{pv} , g) N_{psv} y h) N_{pEI} como segunda para DME como PDS.

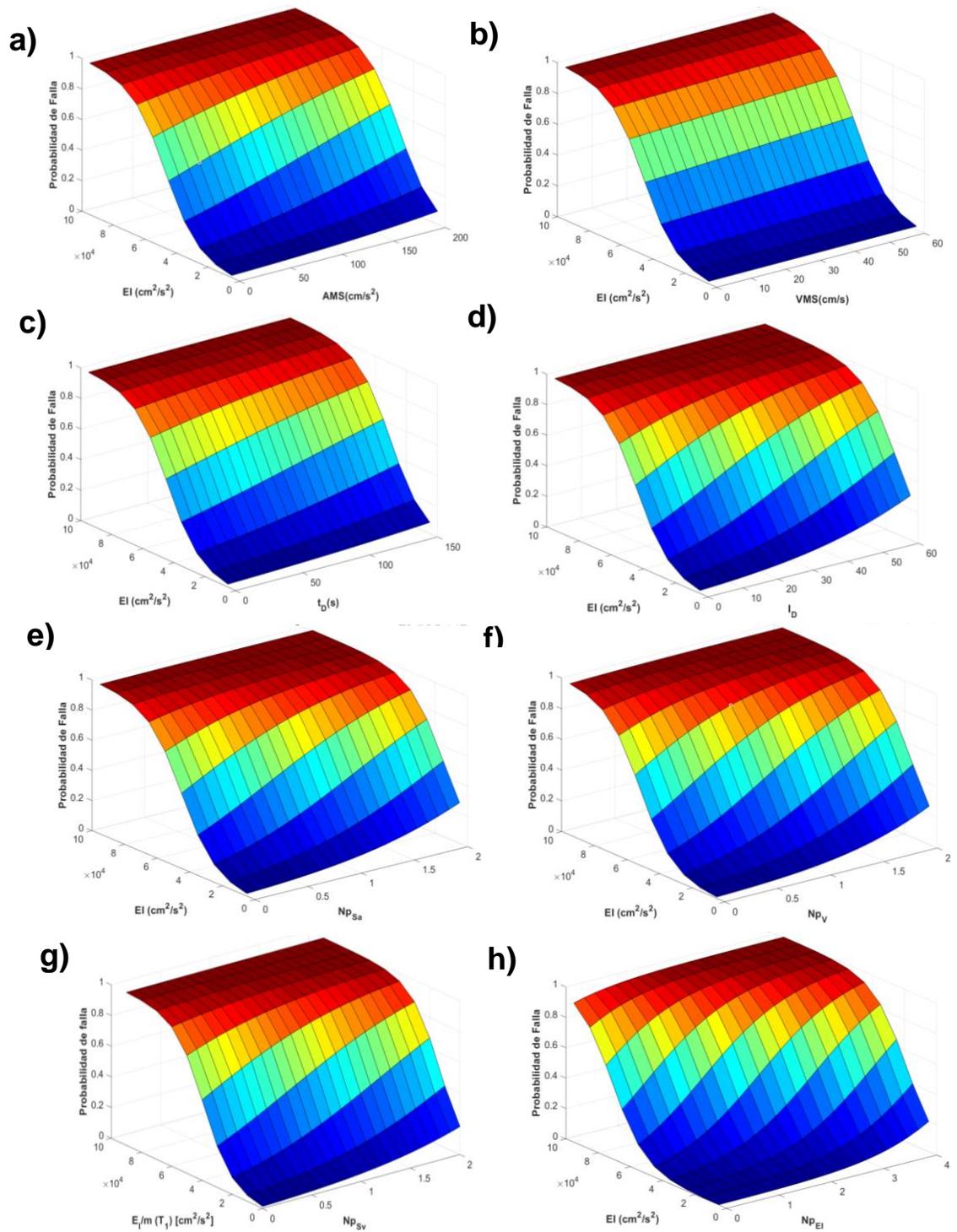


Figura A. 60 Superficies de fragilidad del marco 15N con E_I/m como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda para E_H como PDS.

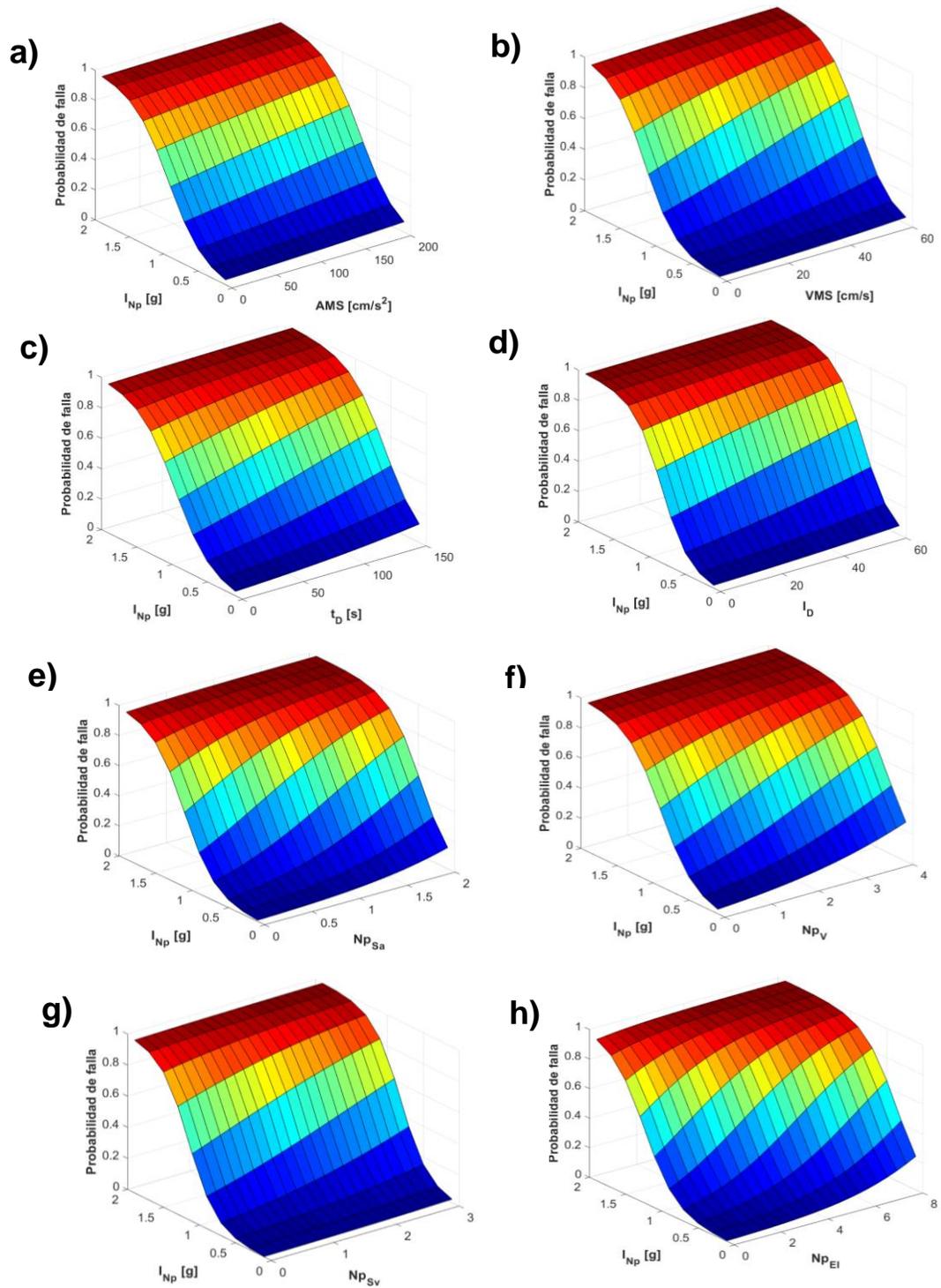


Figura A. 61 Superficies de fragilidad del marco 4N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS.

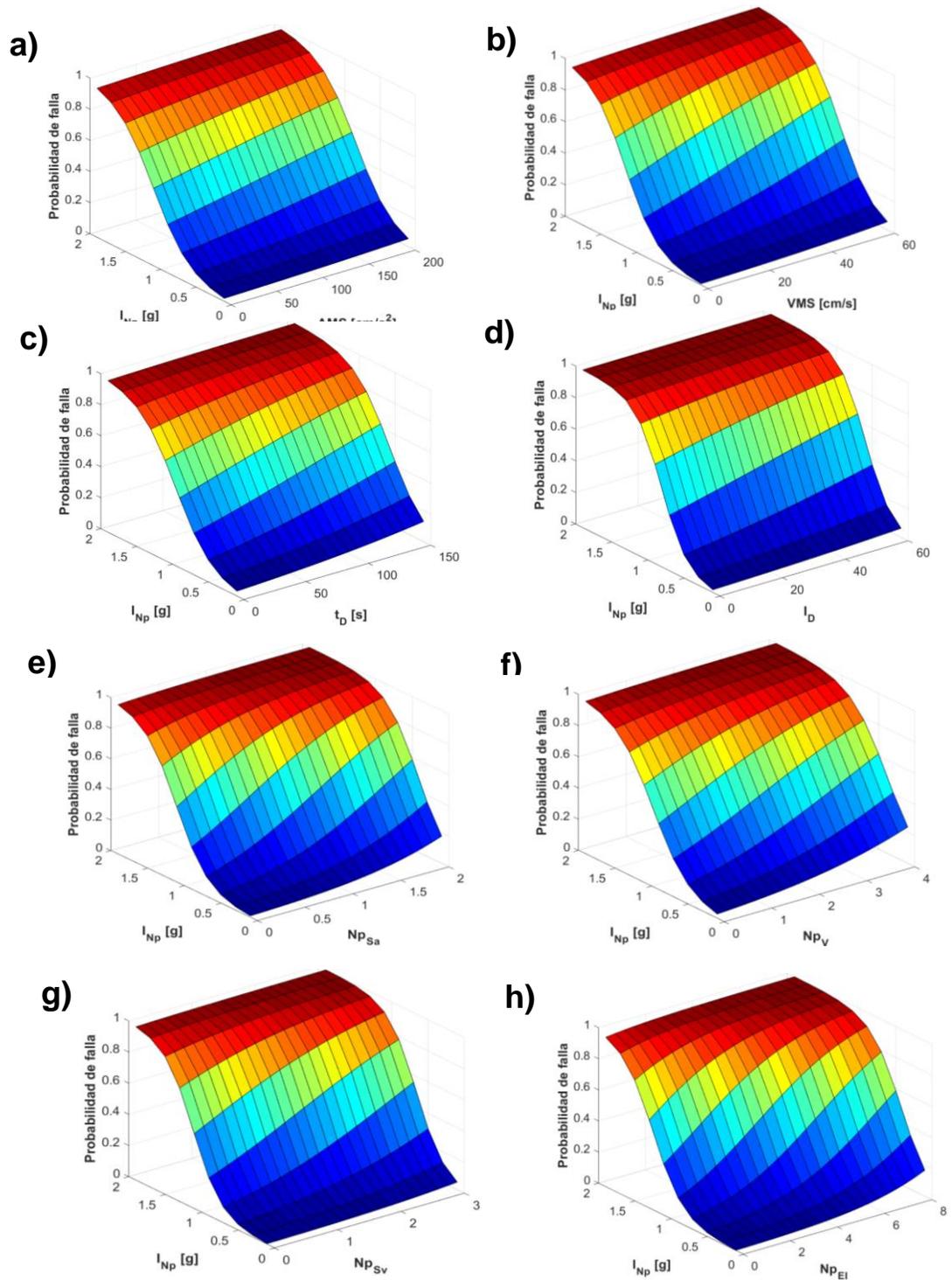


Figura A. 62 Superficies de fragilidad del marco 4N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS.

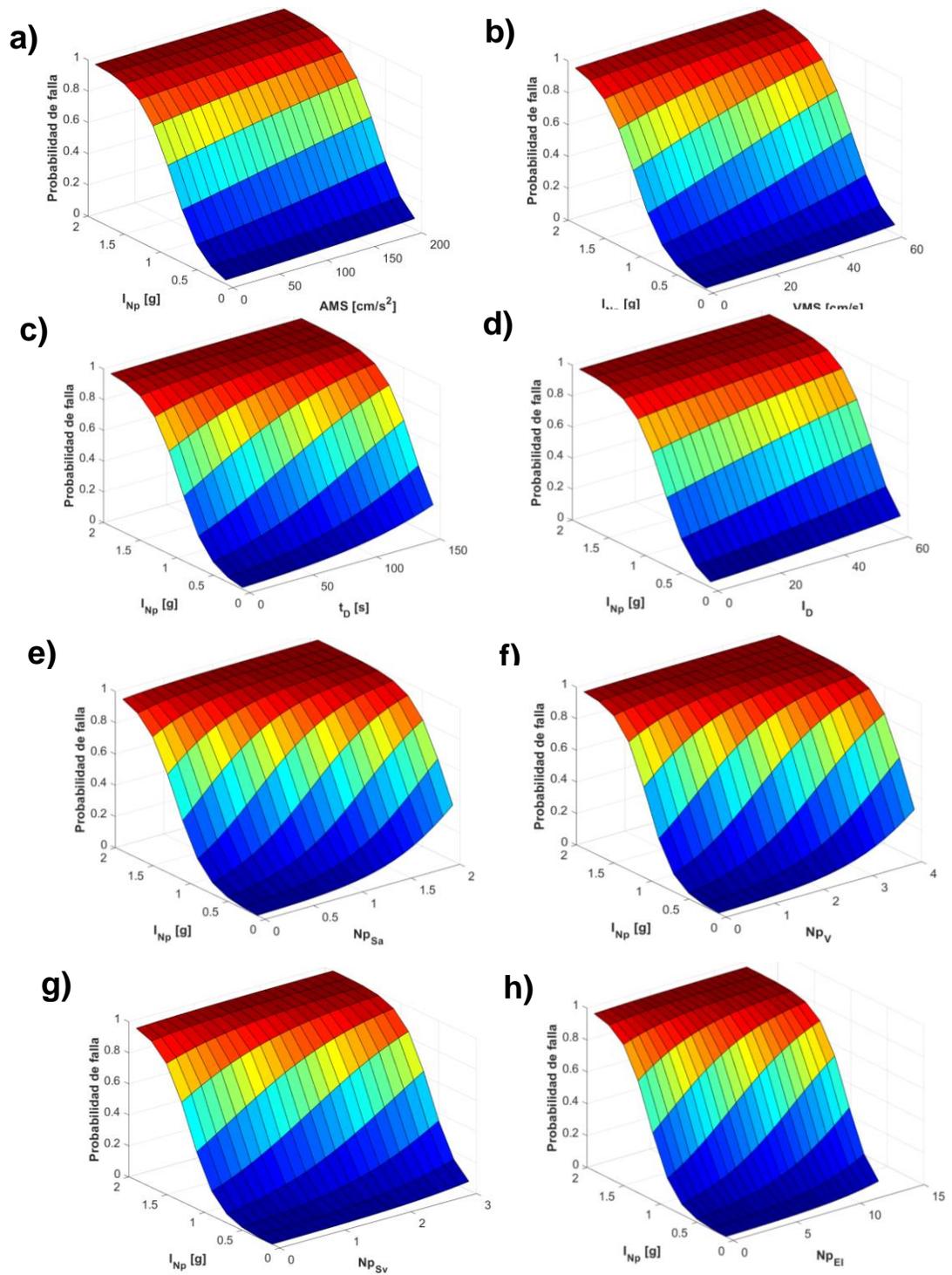


Figura A. 63 Superficies de fragilidad del marco 7N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) NP_{Sa} , f) NP_V , g) NP_{Sv} y h) NP_{EI} como segunda para DME como PDS.

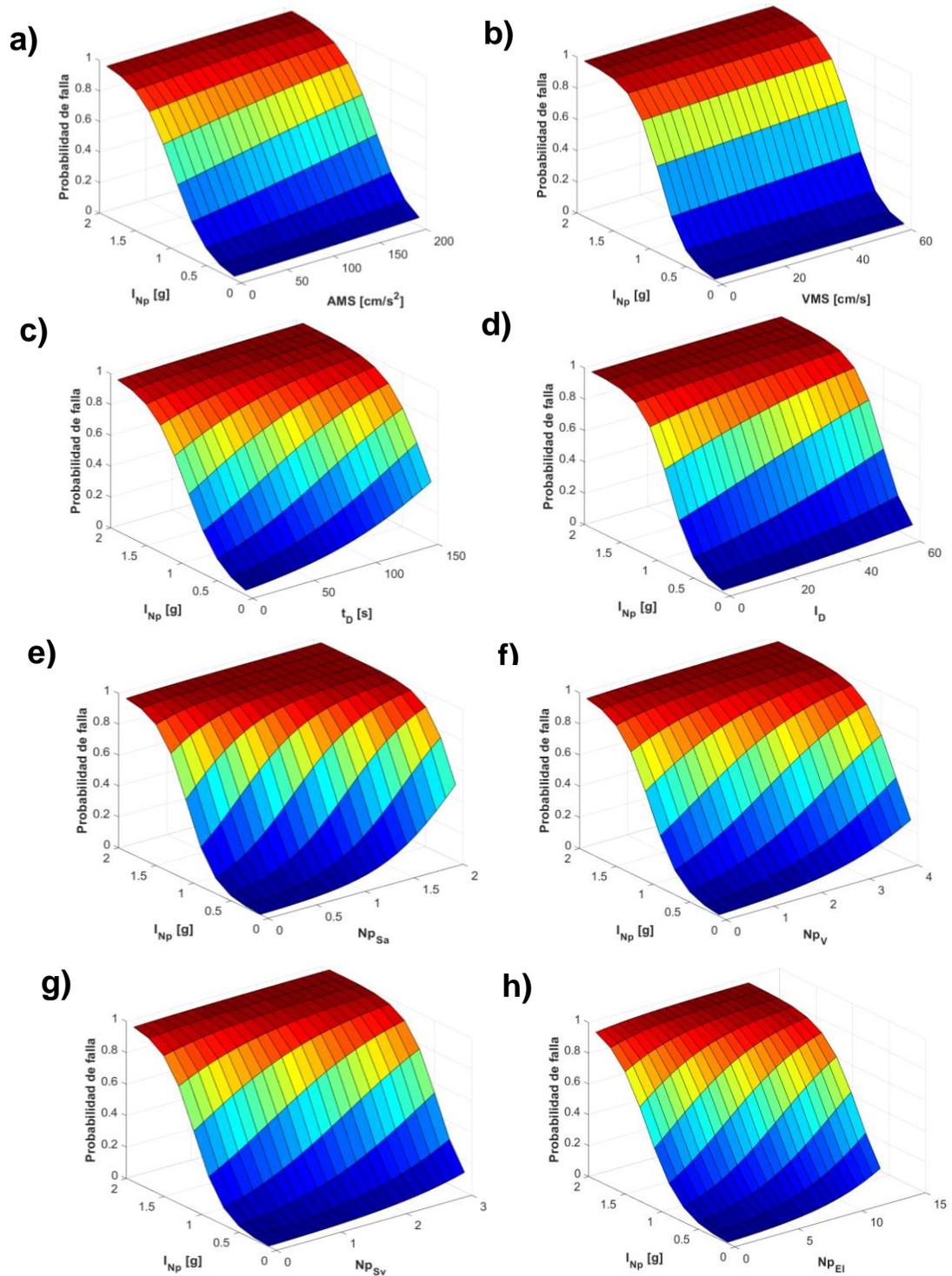


Figura A. 64 Superficies de fragilidad del marco 7N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS.

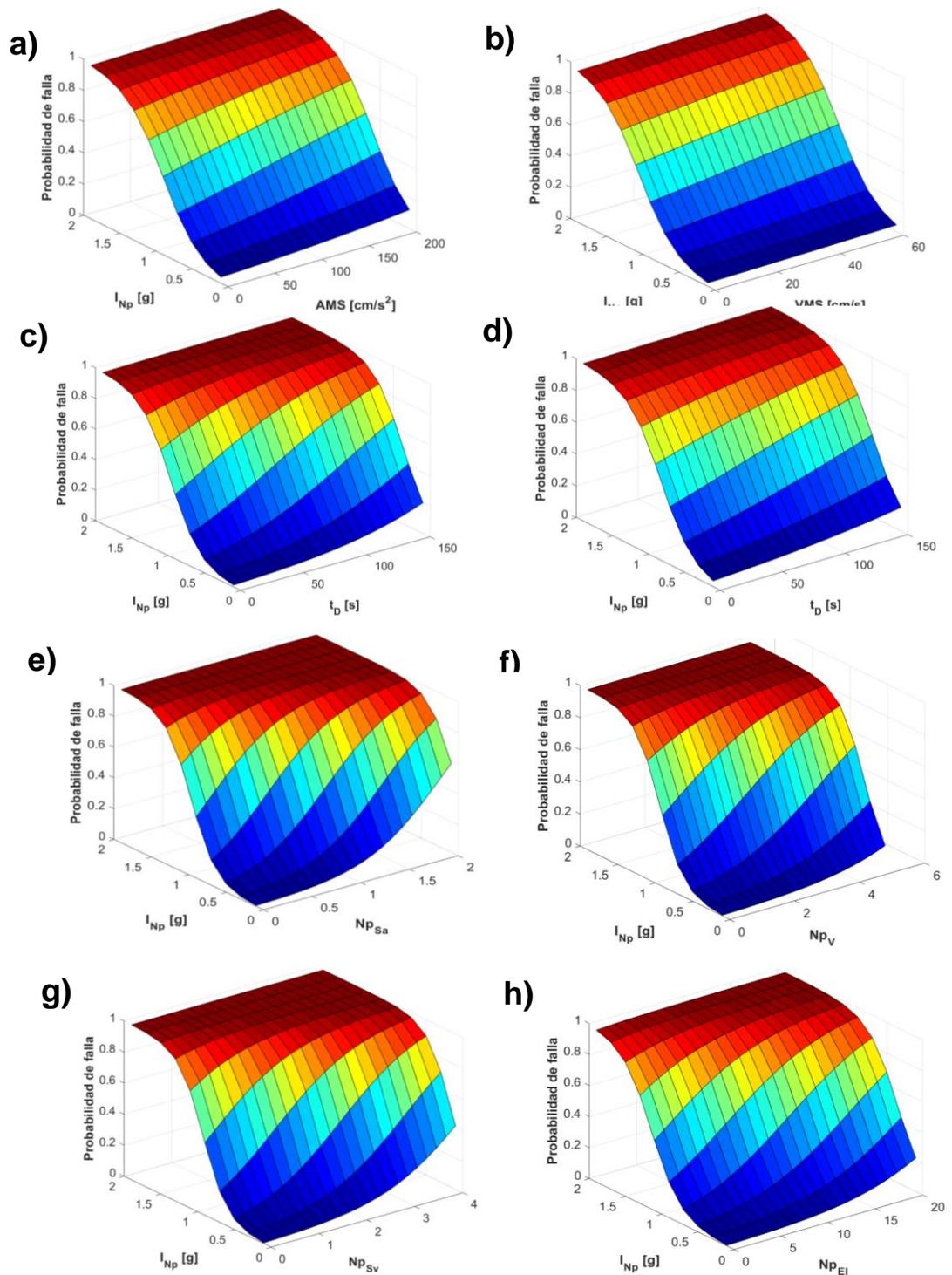


Figura A. 65 Superficies de fragilidad del marco 10N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda para DME como PDS.

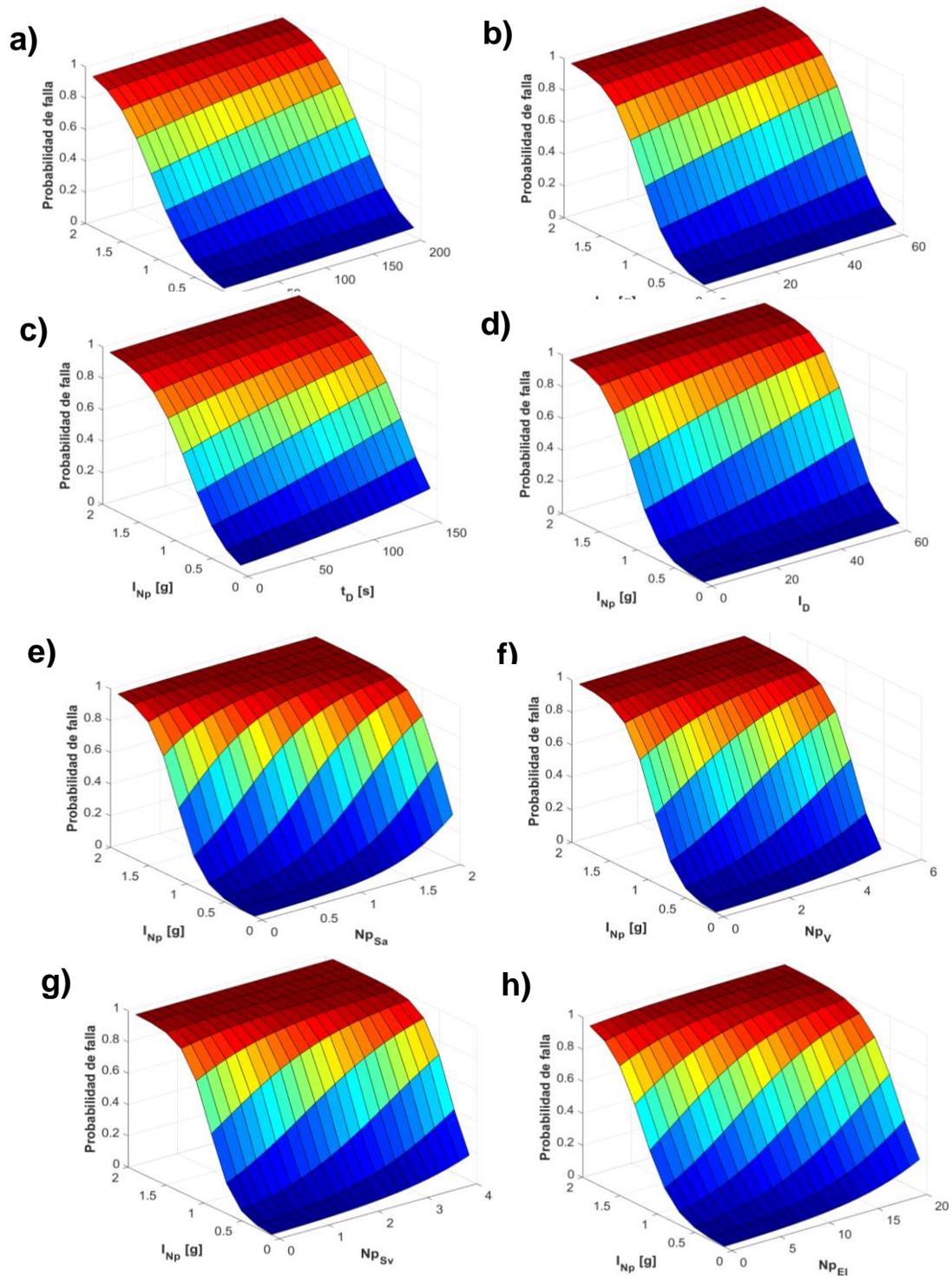


Figura A. 66 Superficies de fragilidad del marco 10N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS.

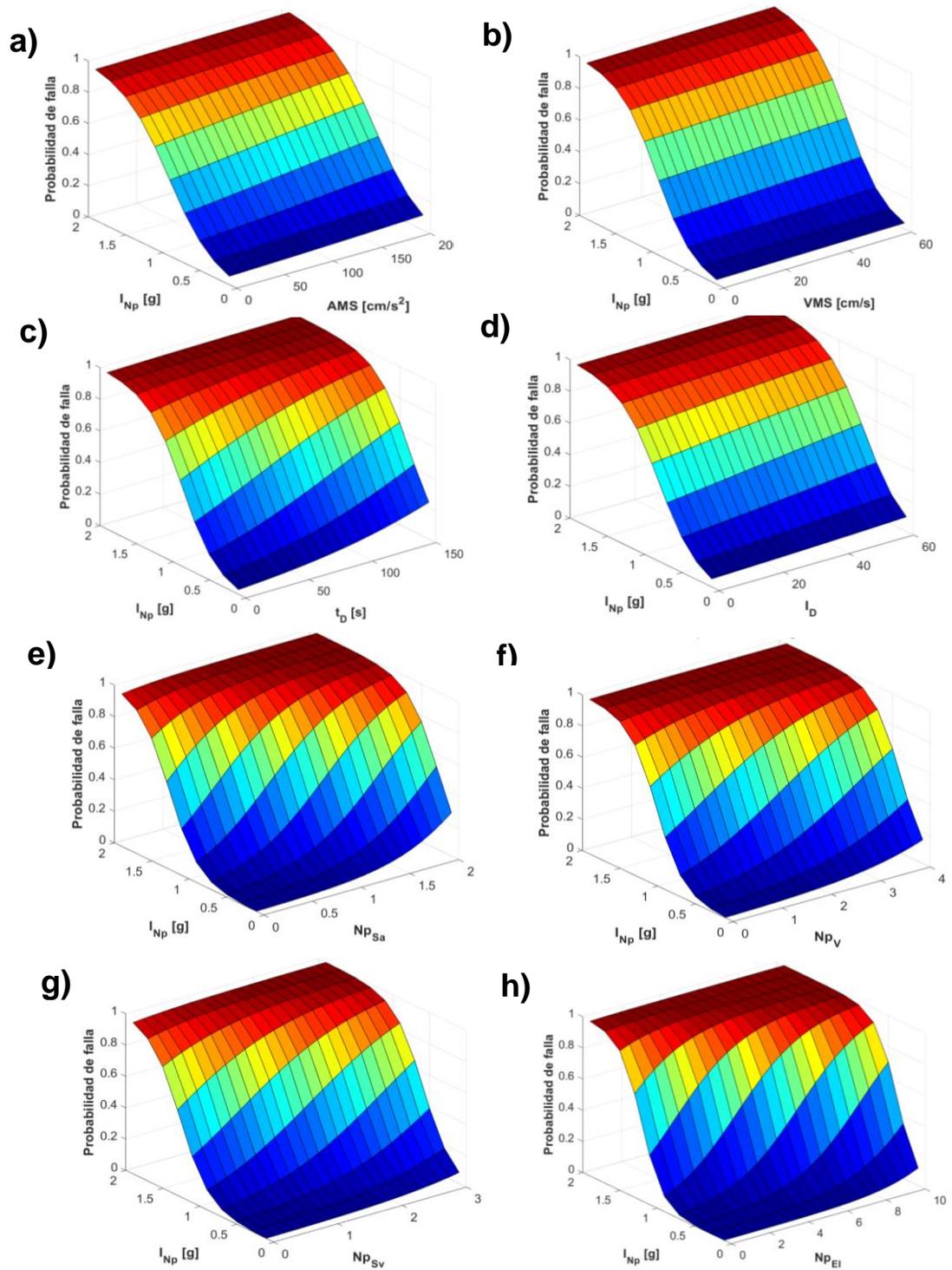


Figura A. 67 Superficies de fragilidad del marco 15N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS.

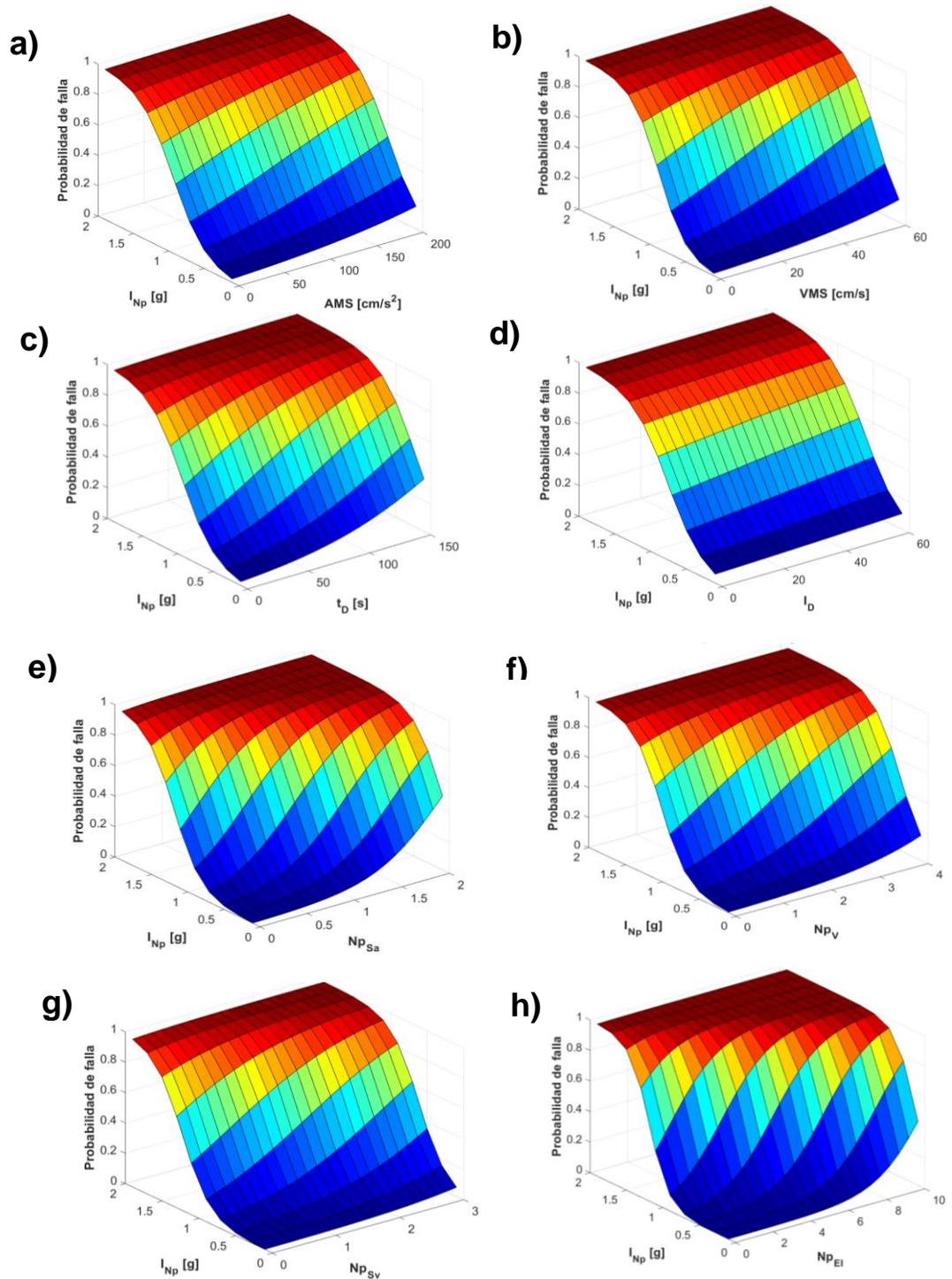


Figura A. 68 Superficies de fragilidad del marco 15N con I_{Np} como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS.

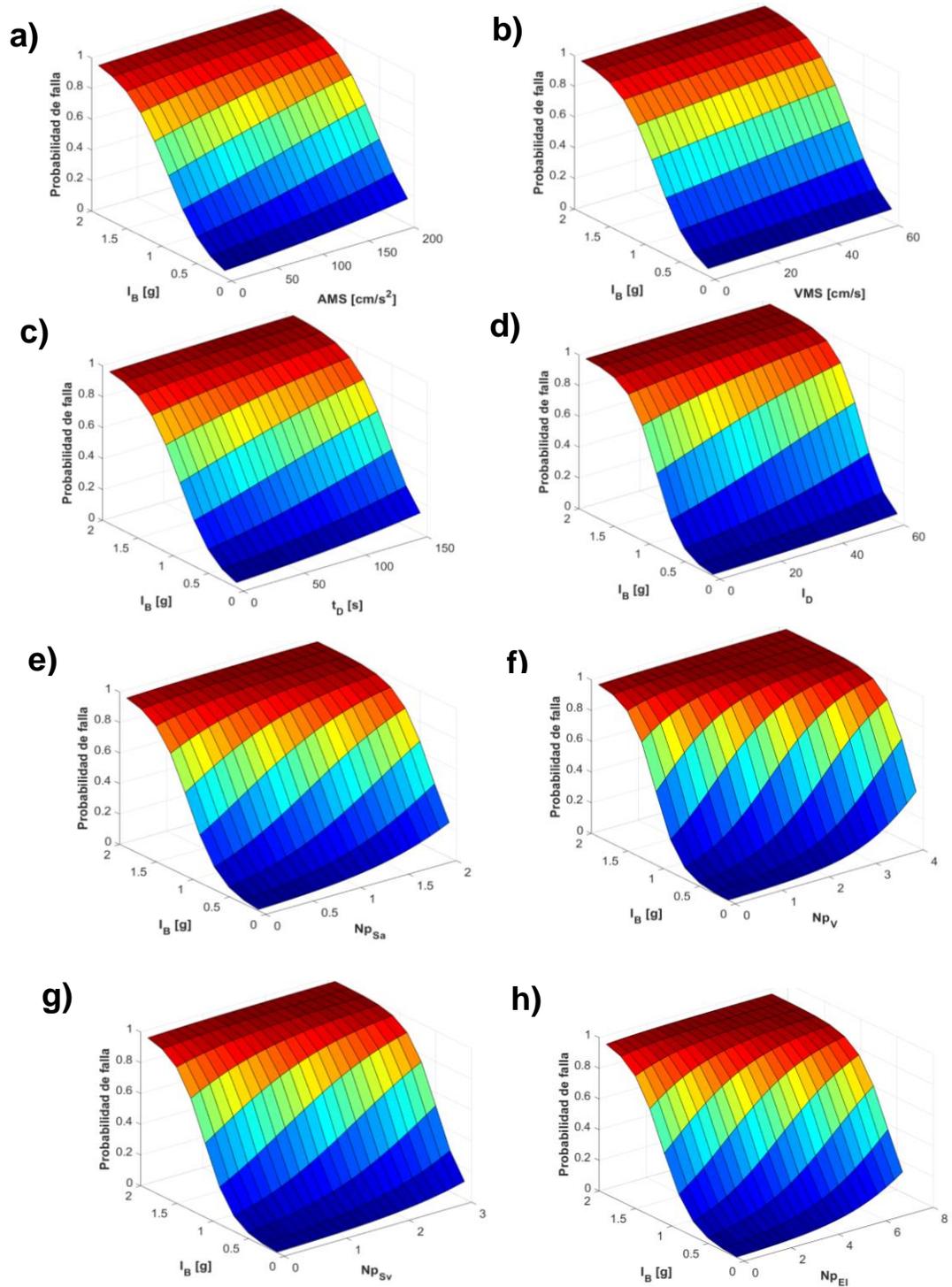


Figura A. 69 Superficies de fragilidad del marco 4N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS.

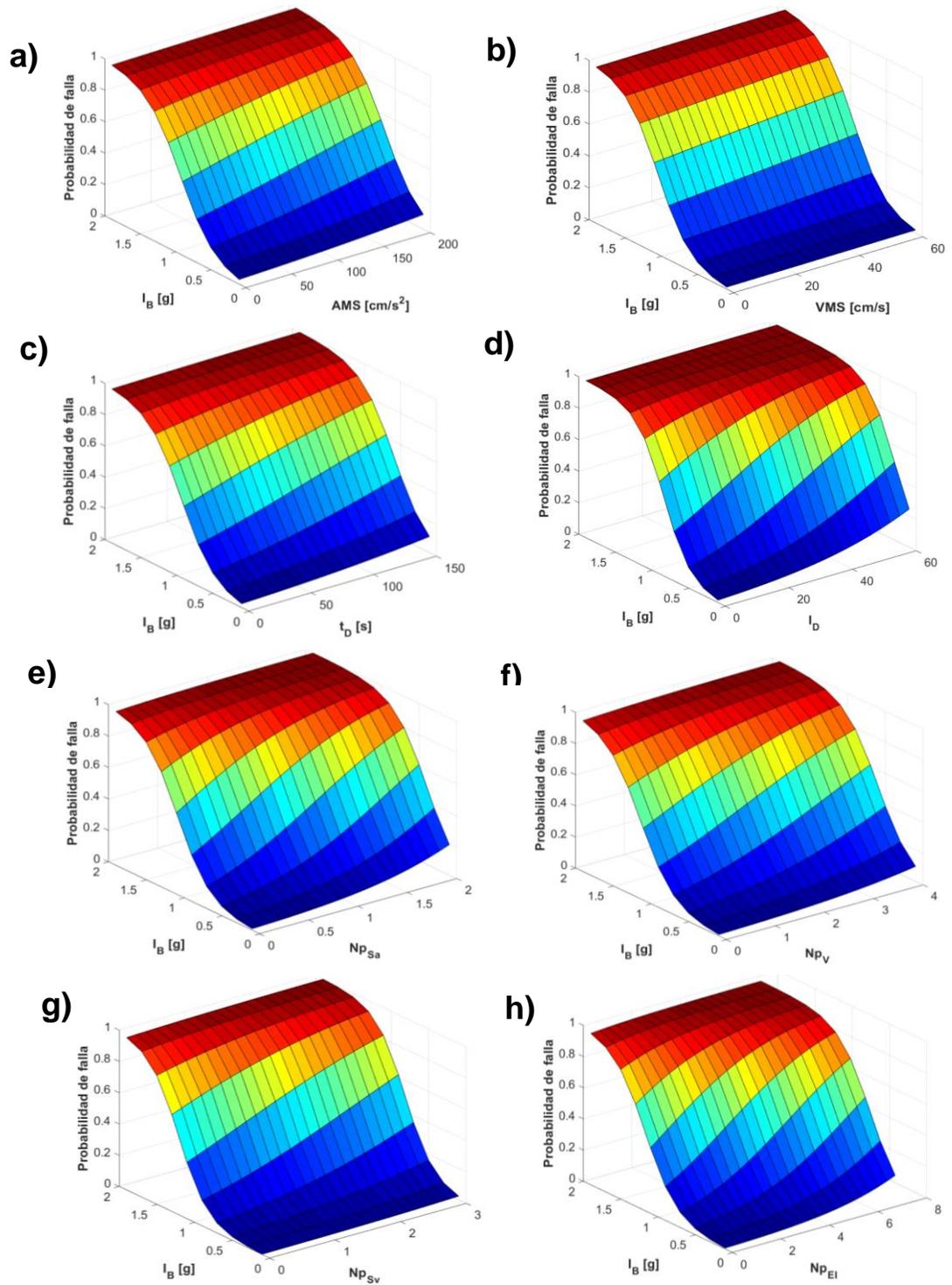


Figura A. 70 Superficies de fragilidad del marco 4N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{Sa}}$, f) N_{p_V} , g) $N_{p_{Sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para E_H como PDS.

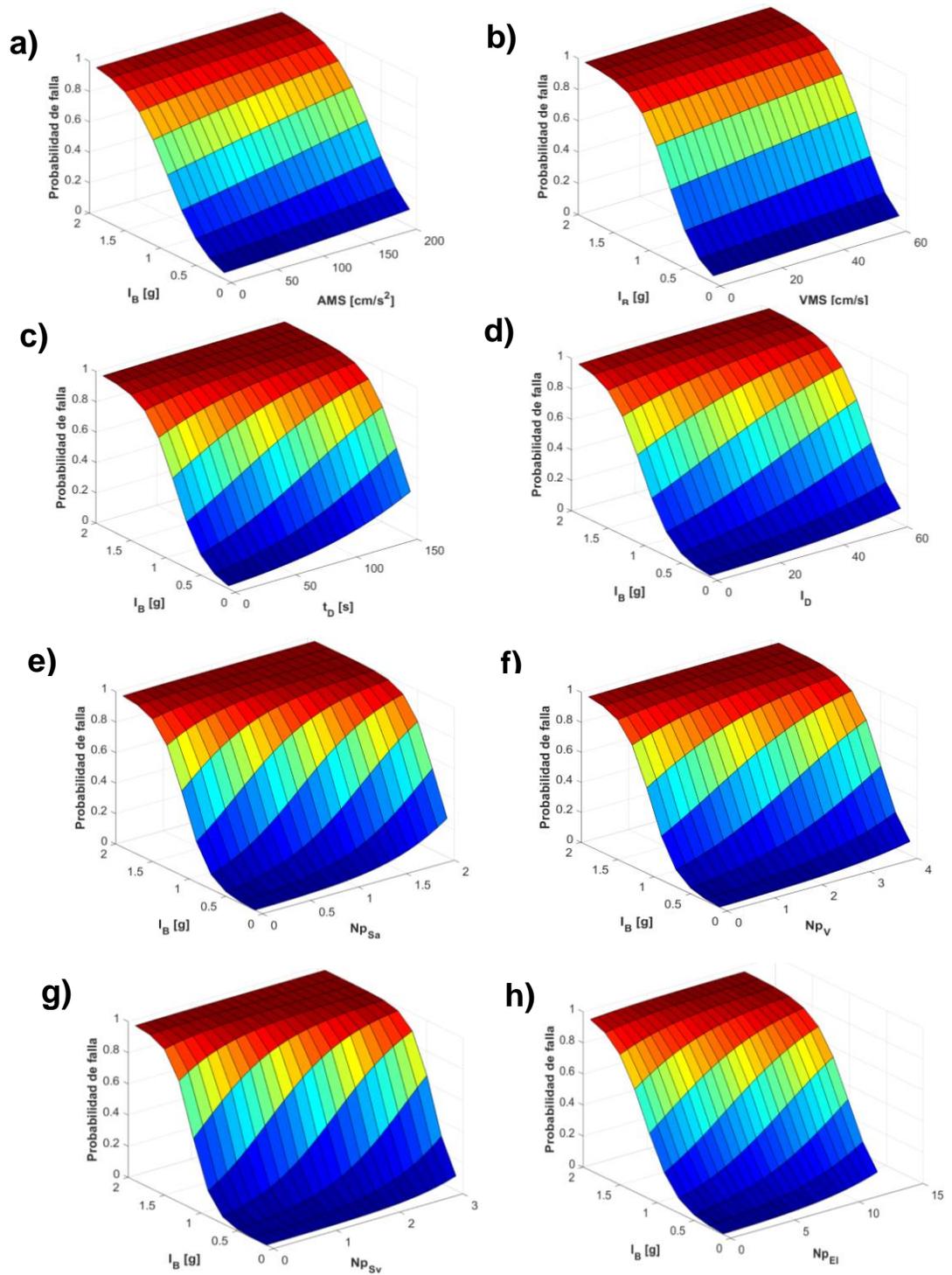


Figura A. 71 Superficies de fragilidad del marco 7N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) $N_{p_{sa}}$, f) N_{p_v} , g) $N_{p_{sv}}$ y h) $N_{p_{EI}}$ como segunda para DME como PDS.

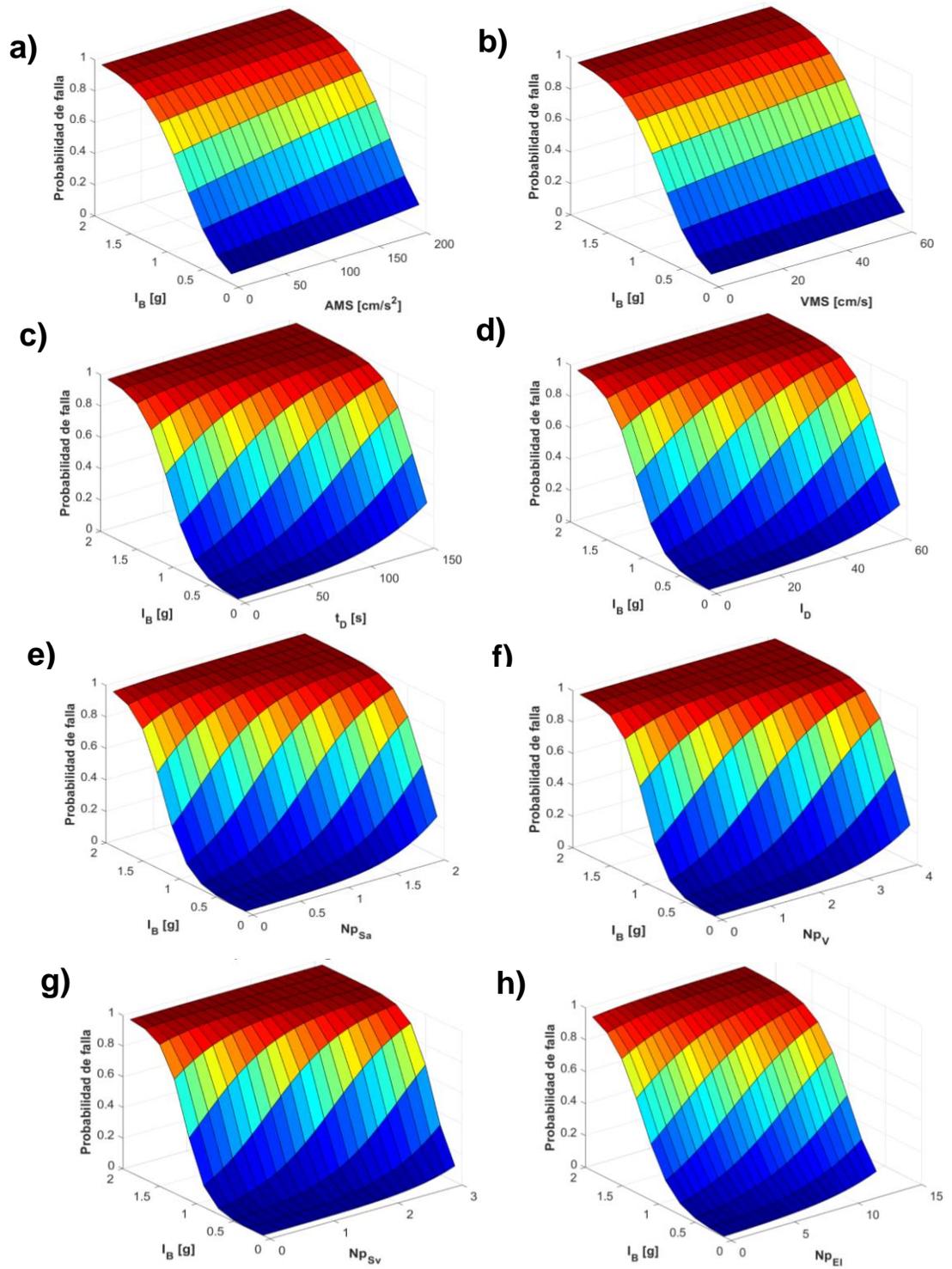


Figura A. 72 Superficies de fragilidad del marco 7N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS.

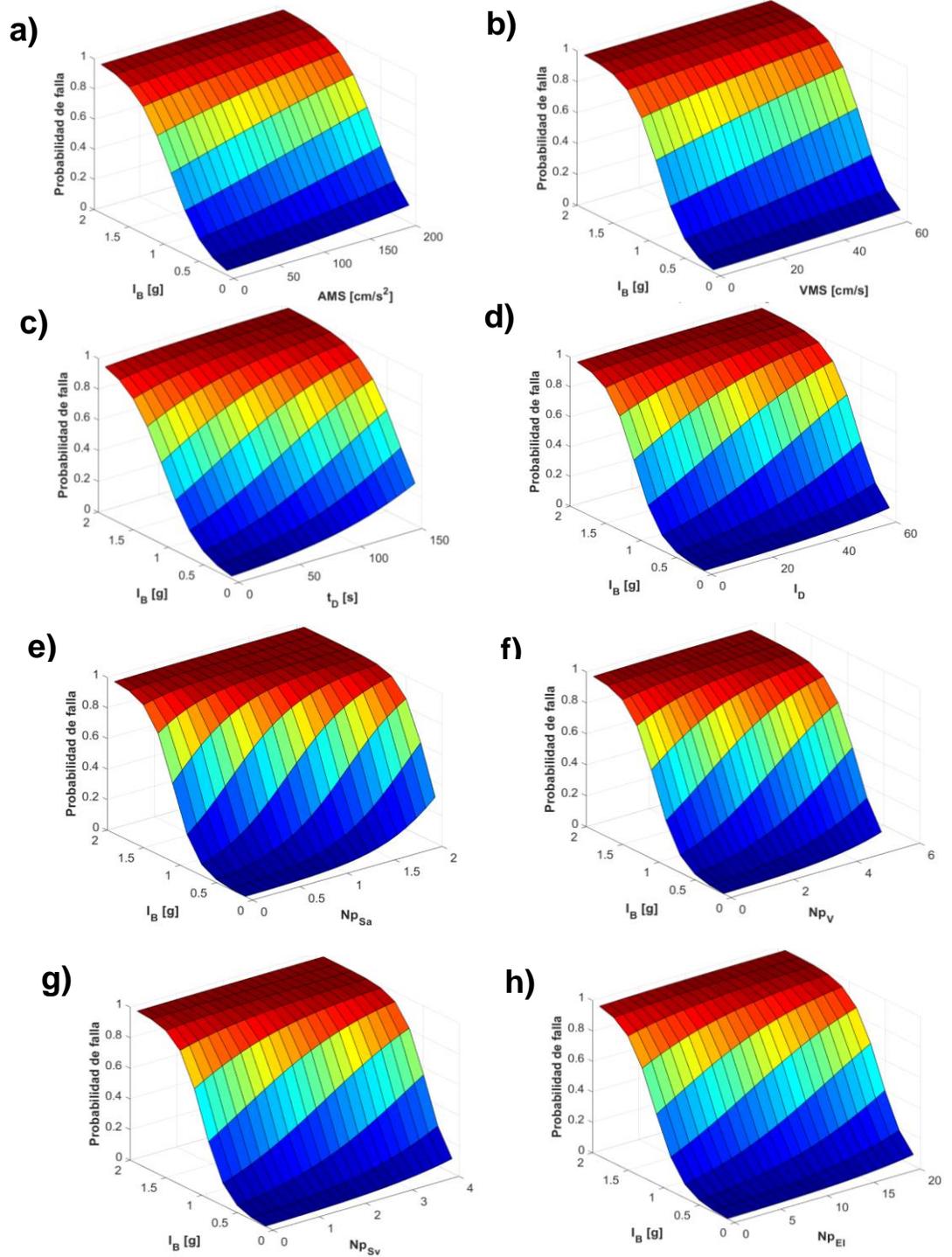


Figura A. 73 Superficies de fragilidad del marco 10N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda para DME como PDS.

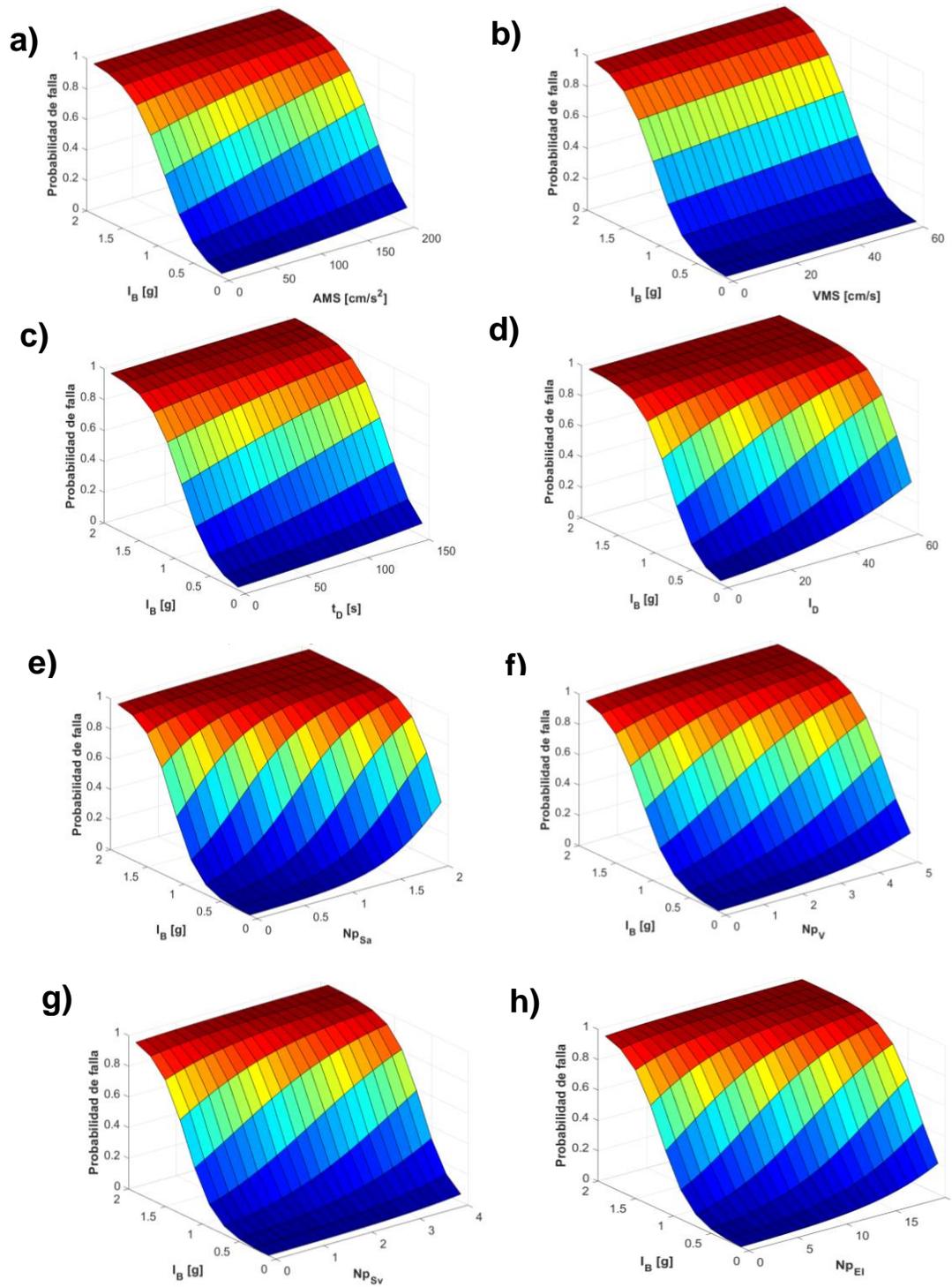


Figura A. 74 Superficies de fragilidad del marco 10N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para E_H como PDS.

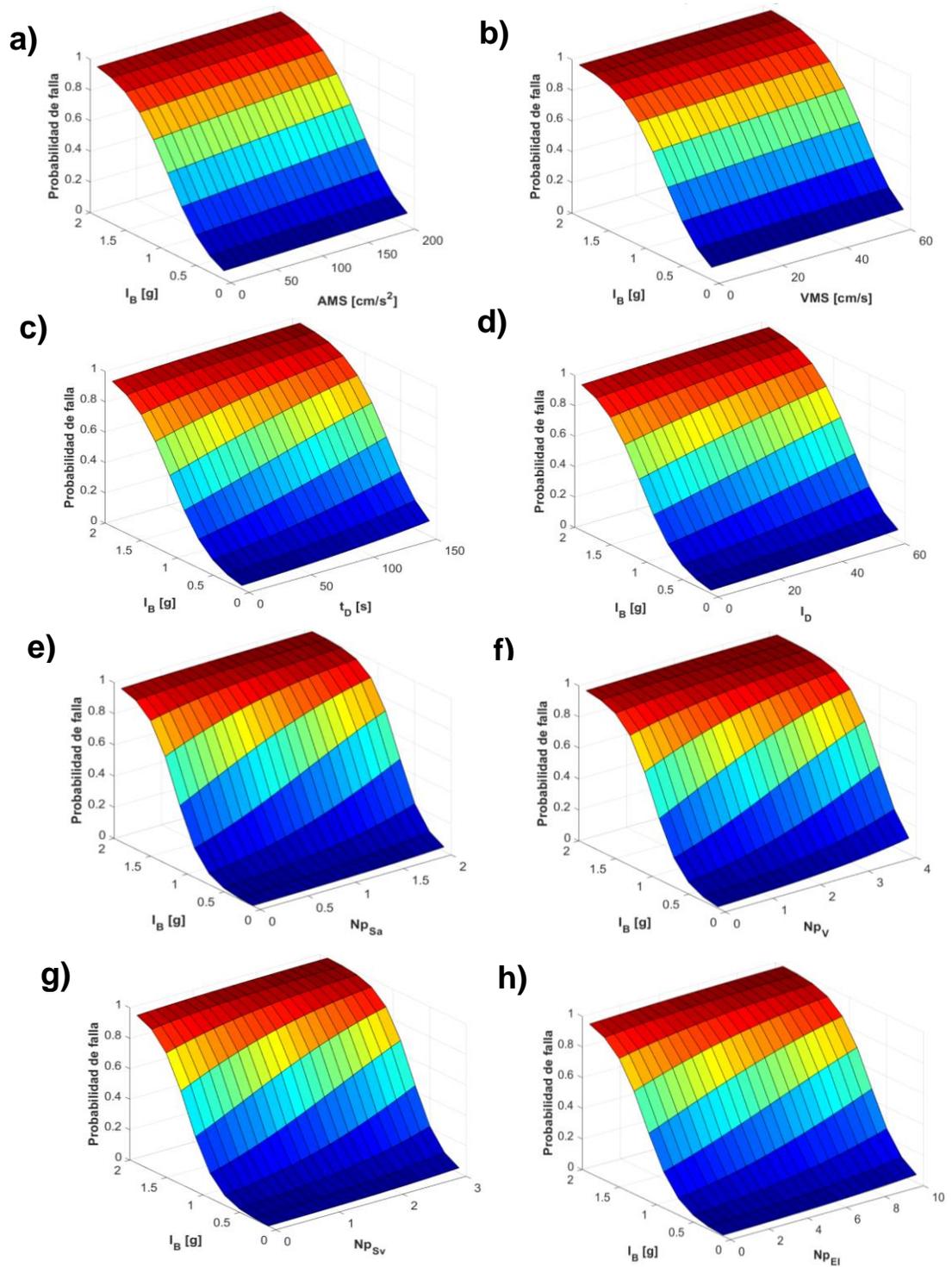


Figura A. 75 Superficies de fragilidad del marco 15N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) Np_{Sa} , f) Np_V , g) Np_{Sv} y h) Np_{EI} como segunda para DME como PDS.

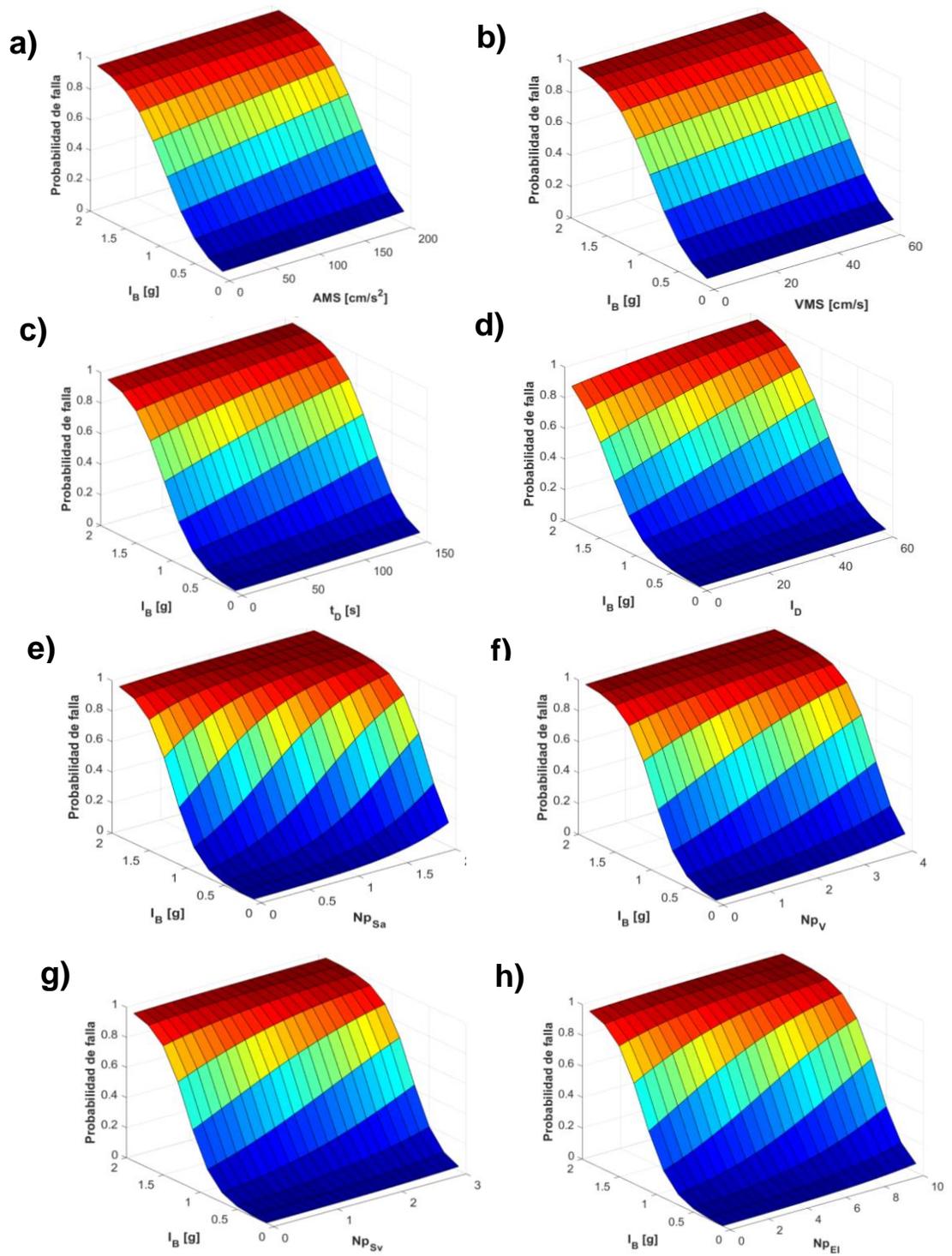


Figura A. 76 Superficies de fragilidad del marco 15N con I_B como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) t_D , d) I_D , e) N_{pSa} , f) N_{pV} , g) N_{pSv} y h) N_{pEI} como segunda para E_H como PDS.