



Simposio en Conmemoración por los 18 años del terremoto de Pisco (2007)

Estimación de estados de daño de edificaciones híbridas de albañilería confinada usando métodos de Machine Learning

Por el Dr. Ing. Edison Alberto Moscoso Alcantara

La presente investigación corresponde a los resultados del concurso de proyectos de investigación UNI/FIC UNI 2025 titulado “Estimación de estados de daño de edificaciones híbridas de albañilería confinada usando métodos de Machine Learning”.

Jefe de proyecto:

Dr. Ing. Edisson Alberto Moscoso Alcantara

Co-investigadores:

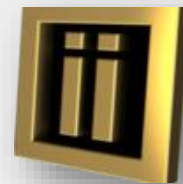
Mag. Ing. Joseph Darwin Jaramillo del Aguila

Mag. Luis Martin Lavado Durand

Asistentes de investigación:

Juan Victor Zevallos Arzapalo

Piero Olaya Aller



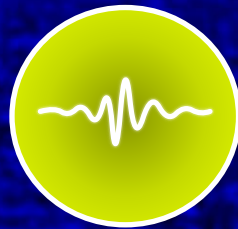
Contenido



1. Introducción



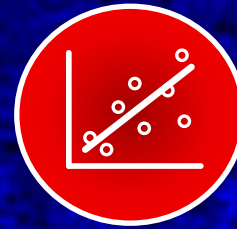
2. Modelos Paramétricos



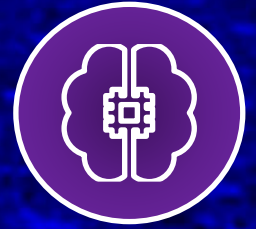
3. Demanda Sísmica



4. Base de Datos



5. Análisis de Sensibilidad



6. Machine Learning

1. Introducción

VULNERABILIDAD DEL SISTEMA ESTRUCTURAL PREDOMINANTE

FENOMENO	EMERGENCIA	DAÑOS MATERIALES					
		VIVIENDAS		CENTROS EDUCATIVOS		HAS. CULTIVO	
		AFECTADAS	DESTRUIDAS	AFECTADOS	DESTRUIDOS	AFECTADOS	PERDIDOS
TOTAL	4.536	65.294	96.357	573	54	32.310	5.719
ACTIVIDAD VOLCANICA	2						
ALUVION	2		14				
COLAPSO DE VIVIENDA	236	708	674	2	1	547	26
CONTAMINAC. AGUA	2						
DERRUMBE DE CERRO	67	29	39		2		
DESLIZAMIENTO	126	474	296	2		35	8
EPIDEMIA	6						
EXPLOSION	3	1	32				
GRANIZADA	138	559	86	1		22	2
HELADA	536	2.506	103			25.570	5.167
HUAYCO	53	712	474	22		5	7
INCENDIO FORESTAL	7		4				
INCENDIO URBANO	1.397	384	1.751	2	4		
INUNDACION	272	8.308	848	62	2	1.922	469
LLUVIA INTENSA	522	6.865	402	135	6	92	10
MAREJADA (MARETAZO)	1						
NEVADA	11	929					
PLAGA	8					810	
RIADA (CRECIDA DE RIO)	61	30	14			100	20
SEQUIA	23					3.018	
SISMO (*)	200	41.210	89.683	313	34		
TORMENTA ELECTRICA	25	23	25				
VIENTO FUERTE	617	2.419	820	28	3		
OTRO †	221	137	1.092	6	2	189	10

Reporte de daños causados por el sismo de Pisco (INDECI, 2007)

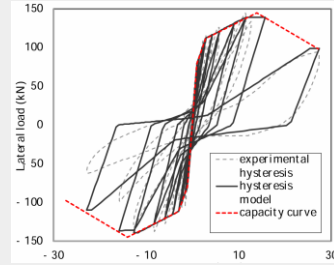
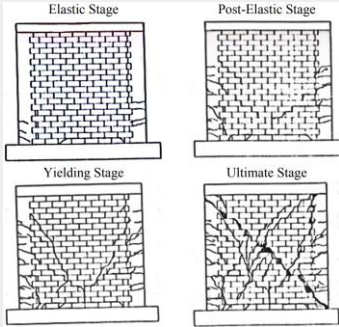


Sistema estructural más empleado en Lima Metropolitana: Albañilería confinada



Daño típico en vivienda de albañilería confinada de ladrillo artesanal tras simulación sísmica (CISMID)

ANTECEDENTES



$$\frac{\tau}{F_m} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{P_t \cdot \sigma_y}{F_m} \right)^{0.7} + \beta_2 \frac{P_{we} \cdot \sigma_{wy}}{F_m} + \beta_3 \frac{\sigma_0}{F_m}$$

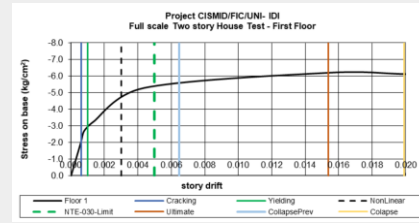
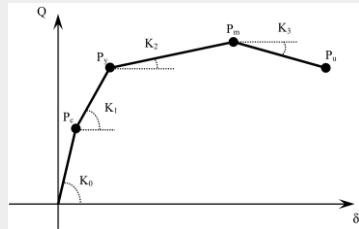
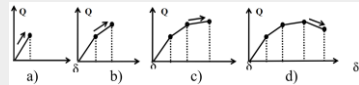
Coefficiente Agrietamiento Fluencia Máximo Último

β_0	0	0	0	0
β_1	0	0	0.054	0.221
β_2	0.249	0.426	0.432	0.077
β_3	0.221	0.175	0.29	0.503

Ladrillo Agrietamiento Fluencia Máximo Último

Industrial	0.6	1.9	7.6	11.7
Artesanal	0.4	1.3	3.5	8
Tubular	0.4	0.6	1.9	3.7

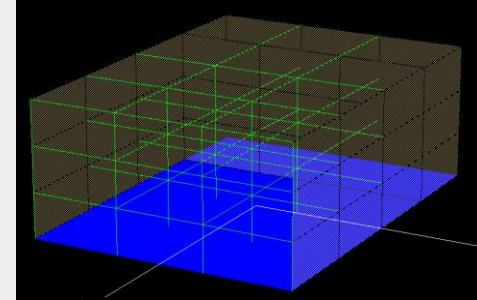
Curva de capacidad y distorsiones ($\times 10^{-3}$) para muros de albañilería (Díaz, Zavala, Flores y Cardenas, 2019)



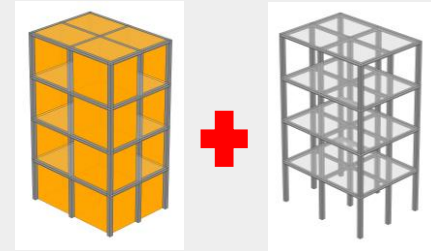
Estado	Distorsión		
Agrietamiento	0.0006	O	
Fluencia	0.0010	IO	10.5%
No lineal	0.0030		
NTE-030	0.0050	LS	18.4%
P. Colapso	0.0065		
Último	0.0154	CP	46.8%
Colapso	0.0200		C

Límites de desempeño para una edificación de albañilería confinada (Zavala, Díaz, Flores y Cardenas, 2019)

PROBLEMÁTICA

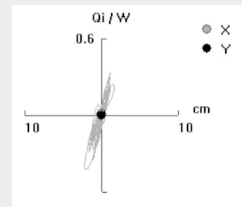
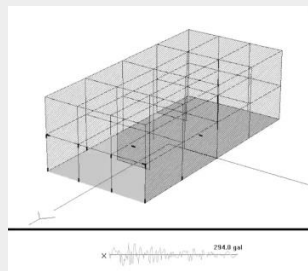
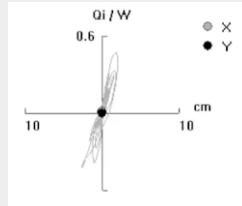
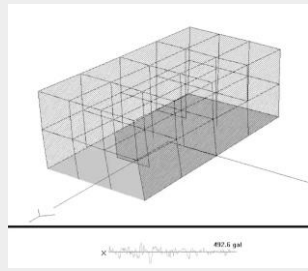
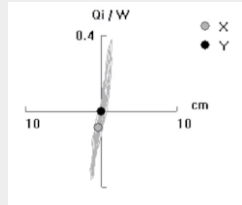
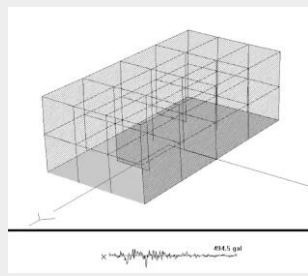
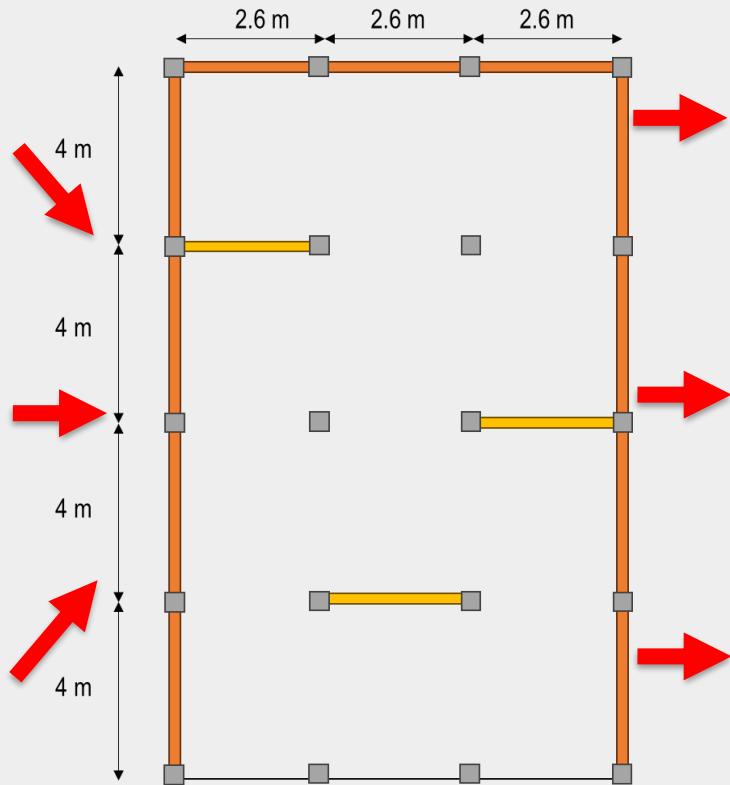
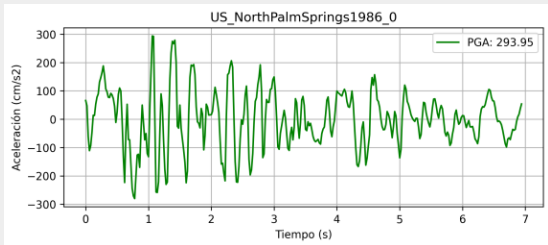
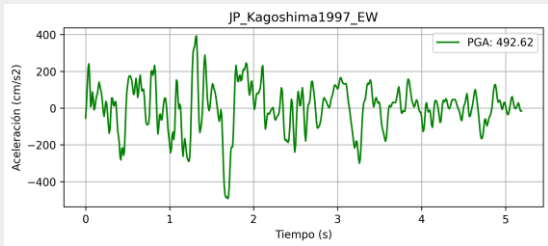
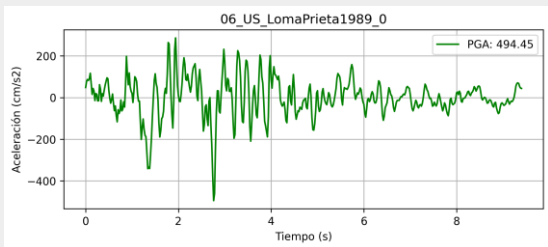


Sistema híbrido: albañilería confinada y pórticos de concreto armado



Estados límites de muros de albañilería (Cardenas, Reyna, Estacio y Zavala, 2014)

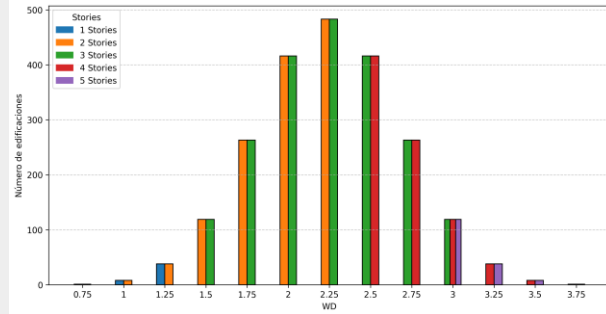
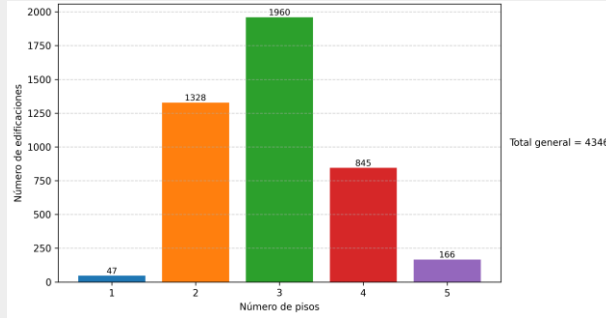
PROBLEMÁTICA: INCERTIDUMBRE POR EL SISMO



2. Modelos Paramétricos

ARQUETIPO DE EDIFICACIÓN

Pisos	WD	Edificaciones
1	0.75	1
	1	8
	1.25	38
2	0.75	1
	1	8
	1.25	38
	1.5	119
	1.75	263
	2	416
3	2.25	483
	1.5	119
	1.75	263
	2	416
	2.25	483
4	2.5	416
	2.75	263
	3	119
	3.25	38
	3.5	8
	3.75	1
5	3	119
	3.25	38
	3.5	8
	3.75	1



Propiedades de las vigas

Propiedad	Valores
Sección	25x30
Acero transversal	4 ϕ 1/2"
Acero longitudinal	2 ϕ 5/16" @200
Resistencia a la fluencia	420 MPa
Resistencia a la compresión del concreto	21 MPa

Propiedades de las columnas

Propiedad	Valores
Sección	25x25
Acero transversal	4 ϕ 1/2"
Acero longitudinal	2 ϕ 1/4" @150 2 direcciones
Resistencia a la fluencia	420 MPa
Resistencia a la compresión del concreto	17 MPa

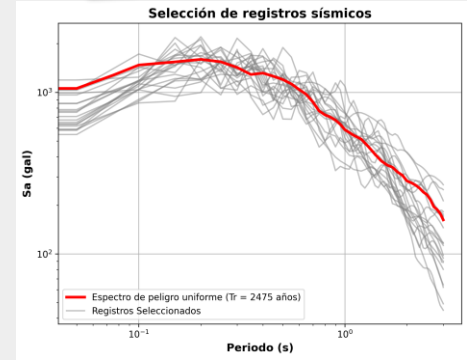
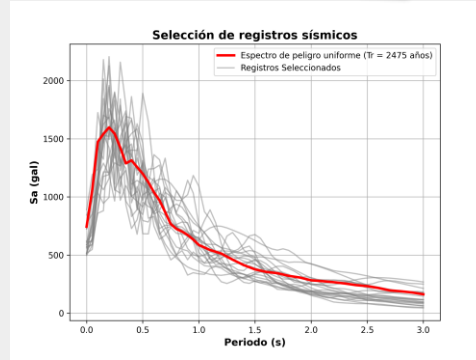
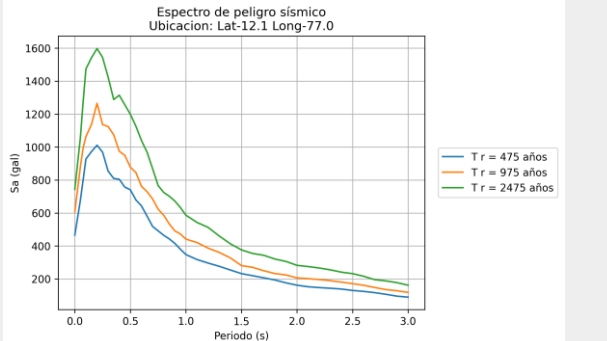
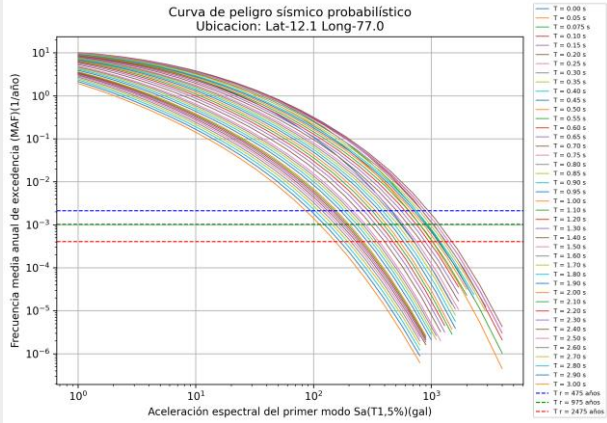
Propiedades de los muros de albañilería

Propiedad	Valores
Esfuerzo a la compresión del ladrillo	8.2 MPa
Espesor de ladrillo	110 mm
Altura de ladrillo	90 mm
Esfuerzo a la compresión del mortero	9.3 MPa
Espesor del mortero	10 mm
Coefficiente de calibración (k)	0.6
Exponente de calibración para el mortero (α)	0.84
Exponente de calibración para el ladrillo (β)	0.23
Factor de modificación de rigidez	0.25
Factor de modificación de resistencia al corte	0.5

3. Demanda Sísmica

SELECCIÓN DE REGISTROS

Base de datos: 183 registros sísmicos



ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL

Selección de registros sísmicos

Base de datos

183 registros sísmicos
Strong Motion Center
USGS y CGS

20 registros seleccionados

Northridge 1994
Chi-Chi 1999
Chuetsu 2004

Escalamiento de registros

SF ∈ {0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25}

Análisis no lineal tiempo-historia

Edificaciones

4346 modelos
estructurales

Registros

20 registros
sísmicos

Escalamiento

5 factores
de escala

Total de simulaciones
 $4346 \times 20 \times 5 = 434600$
análisis dinámicos no lineales

Automatización de configuraciones paramétricas

Configuración inicial

Definición de parámetros

- Número de pisos
- Densidad de muros
- Factor de escala

Lectura de registros sísmicos

- List_Records_2475.txt
- Nombre de sismos
- Factores de normalización

Generación de matrices binarias
de configuración estructural
M1-M12 ∈ {0,1}
place_ones(size, count)
checkV(arr)
Matriz_V(M)

**Filtrado de configuraciones
según densidad de muros**

Construcción automática de modelos

Creación de carpetas
para cada combinación
Edificación + Sismo + SF

Copiado automático de archivos

- inputdata.txt
- inputwave_x.txt
- inputwave_y.txt

Modificación automática
de parámetros estructurales

- Número de pisos
- Factores de escala
- Tipos de elementos

**Reescritura del archivo
inputdata.txt**

Ejecución de resultados generados

Generación automática
de edificaciones híbridas
simétricas y válidas

Asignación de registros sísmicos
y factores de escala
para cada caso

Organización jerárquica
de carpetas input/output
para análisis dinámicos
no lineales

434600 carpetas

4. Base de Datos

INPUT - EDIFICACIÓN

Stories	Número de pisos
WD	Densidad de muros en X
WD_ratio	Ratio de WD respecto a la norma
TOX	Periodo fundamental en X
TOY	Periodo fundamental en Y
TOX/TOY	Ratio de periodos fundamentales
TOZ	Periodo fundamental en Z
M1	Configuración de muro 1
M2	Configuración de muro 2
M3	Configuración de muro 3
M4	Configuración de muro 4
M5	Configuración de muro 5
M6	Configuración de muro 6
M7	Configuración de muro 7
M8	Configuración de muro 8
M9	Configuración de muro 9
M10	Configuración de muro 10
M11	Configuración de muro 11
M12	Configuración de muro 12
Ex	Ratio de excentricidad en X
Ey	Ratio de excentricidad en Y

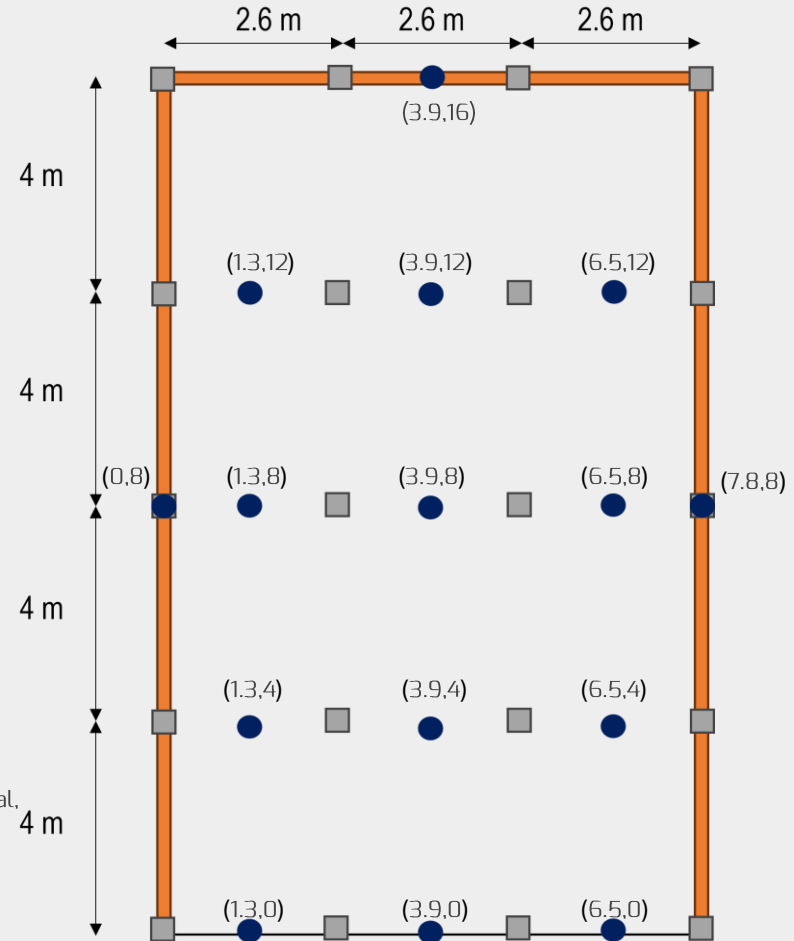
} < 1 → No cumple el mínimo
 } > 1 → Cumple el mínimo

M1–M12 permiten representar la planta estructural como vector binario:

```
000000000000
101010101010
110011001100
111100001111
000011110000
101111000111
010101010101
111111000000
100110011001
011001100110
111111111111
```

Se obtiene a partir de la configuración estructural, de la distribución de muros internos (M1–M12):

$$e_x = \frac{|X_{CM} - X_{CR}|}{L_x}, \quad e_y = \frac{|Y_{CM} - Y_{CR}|}{L_y}$$



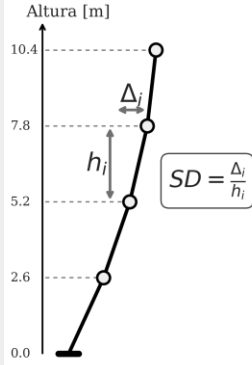
INPUT - DEMANDA

N°	Nombre	Basado en	Notación	Definición	Fuente
1	Aceleración máxima del suelo	A	PGA	$\max_{0 \leq t \leq t_f} \ddot{u} $	(Douglas, 2003)
2	Aceleración espectral del primer modo de vibración con 5% de amortiguamiento	A	$S_a(T_1, 5\%)$	$ \max(\ddot{u}(T_1, 5\%) + \ddot{u}_g) $	(Chopra, 2007)
3	Aceleración espectral promedio	A	$S_{a_{avg}}$	$\left(\prod_{i=1}^n S_a(T_i)\right)^{1/n}$	(Baker y Cornell, 2006)
4	Aceleración máxima efectiva	A	EPA	$\int_{0.1}^{0.5} S_a(T, h = 5\%) dT$	(Newmark et al., 1982)
5	Ley de potencia SR	A	IM_{SR}	$S_a(T_1)^{1-\alpha} S_a(\sqrt{RT_1})^\alpha$	(Mehanny, 2009)
6	Ley de potencia CR	A	IM_{CR}	$S_a(T_1)^{1-\alpha} S_a(\sqrt[3]{RT_1})^\alpha$	(Mehanny, 2009)
7	Índice de potencia sísmica	A	EPI	$\frac{1}{t} \int_0^t a_{(t)}^2 dt$	(Housner, 1975)
8	Aceleración cuadrática media	A	RMS	\sqrt{EPI}	(Housner, 1975)
9	Bojórquez e Iervolino IM	A	I_{NP}	$S_a(T_1, 5\%) \left(\frac{S_{a_{avg}}}{S_a(T_1, 5\%)}\right)^\alpha$	(Bojórquez e Iervolino, 2011)
10	Intensidad de Arias	A	AI	$\frac{\pi}{2g} \int_0^t a_{(t)}^2 dt$	(Arias, 1970)
11	Sarma y Yang IM	A	A_{95}	$0.05 \int_0^t a_{(t)}^2 dt$	(Sarma y Yang, 1987)
12	Intensidad característica	A	I_c	$RMS^{1.5} \cdot t_{95} \cdot t_{05}^{0.5}$	(Park et al., 1985)

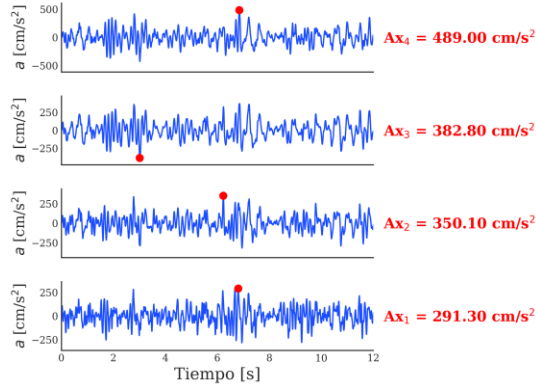
N°	Nombre	Basado en	Notación	Definición	Fuente
13	Riddell y García Aceleración IM	A	I_a	$a_{max} \cdot t_{95} \cdot t_{05}^{1/3}$	(Ridell y Garcia, 2001)
14	Velocidad absoluta acumulada	A	CAV	$\int_0^t a_{(t)} dt$	(Reed y Kassawara, 1990)
15	Velocidad absoluta acumulada estandarizada	A	$S - CAV$	$\sum_{i=1}^N \left(H_{(PGA_i - 0.025)} \int_{i-1}^i a_{(t)} dt \right)$	(Campbell y Bozorgnia, 2011)
16	IM de peligro de dos parámetros	A	TPH	$R_{Sa} = \frac{S_a(T_p)}{S_a(T_1)}, TPH = S_a(T_1) \cdot R_{Sa}^g$	(Cordova et al., 2000)
17	Velocidad máxima del suelo	V	PGV	$\max_{0 \leq t \leq t_f} v_t $	(Douglas, 2003)
18	Velocidad al cuadrado	V	V_{sq}	$\int_0^t v_{(t)}^2 dt$	(Buratti, 2012)
19	Raíz cuadrada de la velocidad	V	V_{rms}	$\sqrt{V_{sq}}$	(Buratti, 2012)
20	Fajfar et al. IM	V	I_F	$PGV \cdot t_{95} \cdot t_{05}^{0.25}$	(Fajfar et al., 1990)
21	Riddell y García Velocidad IM	V	I_v	$PGV^{2/3} \cdot t_{95} \cdot t_{05}^{1/3}$	(Ridell y Garcia, 2001)
22	Velocidad espectral del primer modo de vibración con 5% de amortiguamiento	V	$S_v(T_1, 5\%)$	$S_v(T_1, h)$	(Chopra, 2007)
23	Intensidad del espectro Housner	V	SI_H	$\int_{0.1}^{2.5} S_v dt$	(Housner, 1952)
24	Cosenza y Manfredi IM	H	I_z	$\frac{\int_0^t a_{(t)}^2 dt}{PGA \cdot PGV}$	(Cosenza y Manfredi, 1998)

OUTPUT – MEDIDAS DE DAÑO

Máxima distorsión entre pisos (medida de daño global)



Máxima aceleración de piso (medida de daño global)

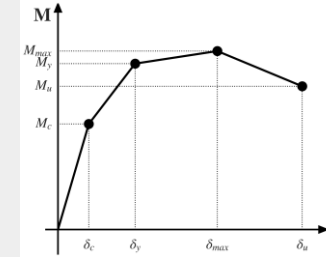
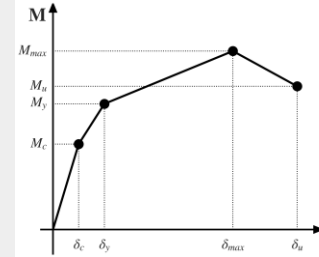
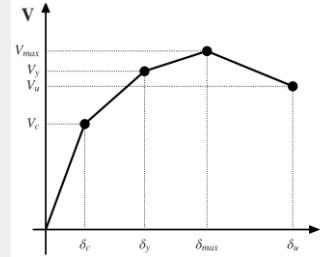


Máxima ductilidad de muros (medida de daño local)

Máxima ductilidad de columnas (medida de daño local)

Máxima ductilidad de vigas (medida de daño local)

Índice de ductilidad (medida de daño global)



Damage Condition	No Damage	Minor Damage	Significant Damage	Severe Damage	Collapse
Ductility ratio	<1	≥1.0 but <2.0	≥2.0 but <3.0	≥3.0 but <4.0	≥4.0
Story drift ratio	<1/300	≥1/300 but <1/150	≥1/150 but <1/100	≥1/100 but <1/75	≥1/75
Acceleration (gal)	<250	≥250 but <500	≥500 but <1000	≥1000 but <1500	≥1500

Límites de estados de daño para concreto armado (Moscoso & Saito, 2021)

Seismic Design Level	Floor Acceleration at the Threshold of Nonstructural Data (g)			
	Slight	Moderate	Extensive	Complete
High-Code	0.30	0.60	1.20	2.40
Moderate-Code	0.25	0.50	1.00	2.00
Low-Code	0.20	0.40	0.80	1.60
Pre-Code	0.20	0.40	0.80	1.60

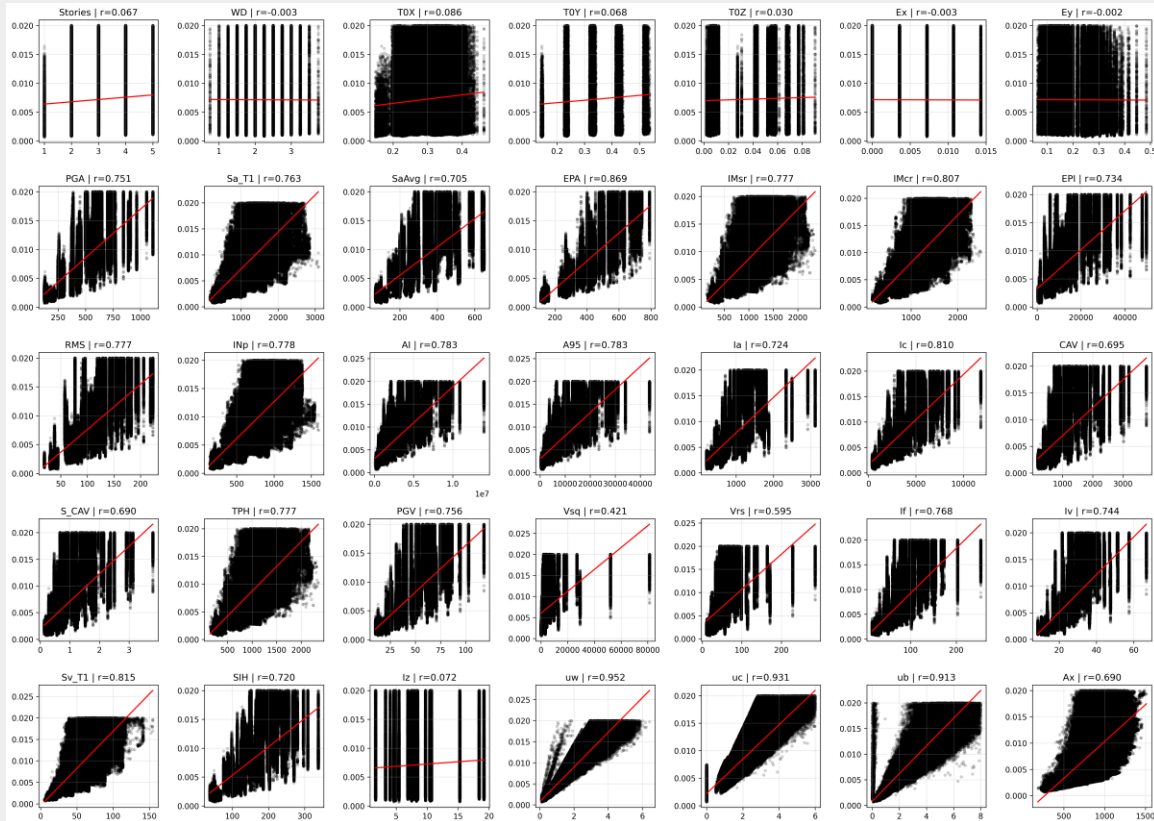
Límites de estado de daño según la aceleración por piso (FEMA, 2020)

Estado de daño	No Daño	Daño Menor	Daño Significativo	Daño Severo	Colapso
Máxima distorsión (SD)	< 0.0010	≥ 0.0010 y < 0.0030	≥ 0.0030 y < 0.0065	≥ 0.0065 y < 0.0154	≥ 0.0154
Máxima ductilidad de muros (uw)	< 1.0	≥ 1.0 y < 2.23	≥ 2.23 y < 2.69	≥ 2.69 y < 3.08	≥ 3.08

Límites de estados de daño para una edificación de albañilería confinada (Zavala, Diaz, Flores y Cardenas, 2019)

5. Análisis de Sensibilidad

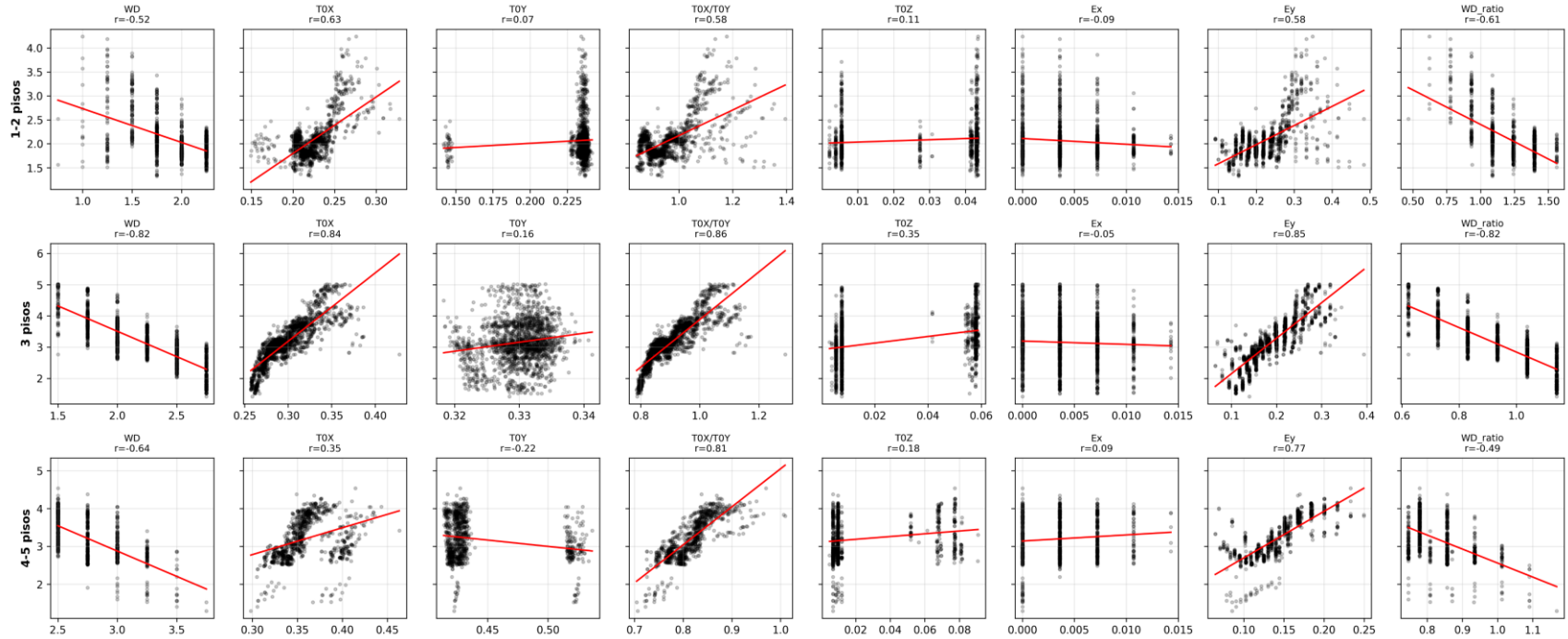
CORRELACIÓN LINEAL RESPECTO A SD



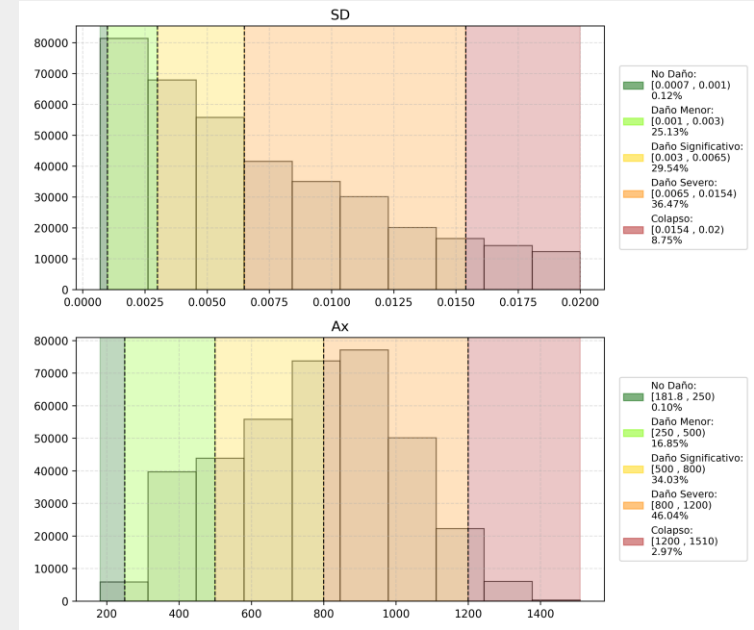
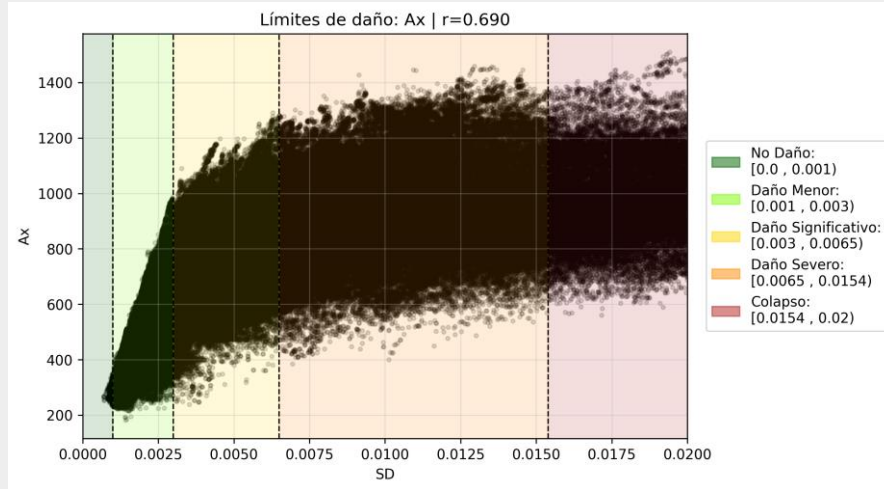
uw	0.952
uc	0.931
ub	0.913
EPA	0.869
Sv_T1	0.815
Ic	0.810
IMCr	0.807
AI	0.783
A95	0.783
INp	0.778
TPH	0.777
IMsr	0.777
RMS	0.777
IF	0.768
Sa_T1	0.763
PGV	0.756
PGA	0.751
Iv	0.744
EPI	0.734
Ia	0.724
SIH	0.720
SaAvg	0.705
CAV	0.695
AX	0.690
S_CAV	0.690
Vrs	0.595
Vsq	0.421
TOX	0.086
Iz	0.072
TOY	0.068
Stories	0.067
TOZ	0.030
Ey	-0.002
WD	-0.003
Ex	-0.003

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CONDICIONADO: SISMO FIJO Y PARA TRES GRUPOS DE PISOS

Sensibilidad estructural condicionada
 Sismo: 10_TW_ChiChi1999_90 | SF: 1.0 | Output: Iduc



LÍMITES DE ESTADOS DE DAÑO PARA MÁXIMA ACELERACIÓN



Estado de daño	No Daño	Daño Menor	Daño Significativo	Daño Severo	Colapso
Máxima aceleración de piso (cm/s ²)	< 250	≥ 250 y < 500	≥ 500 y < 800	≥ 800 y < 1200	≥ 1200

ÍNDICE DE DUCTILIDAD

Se propuso un índice de daño basado en una regresión lineal que integra las máximas ductilidades de muros, columnas y vigas con la máxima distorsión:

$$SD = aUw + bUc + cUb + d$$

Con la restricción de considerar $d = 0$ para garantizar que el índice de daño no dependa de un aporte externo a los muros, columnas y vigas. Luego se normaliza los coeficientes para que sumen 1:

$$I_{duc} = 0.799Uw - 0.017Uc + 0.218Ub$$

$R^2 : 0.9135$

Como las 3 variables están altamente correlacionadas, una regresión normal devuelve coeficientes muy sensibles.

Ridge Regressor: $I_{duc} = 0.766Uw + 0.005Uc + 0.229Ub$
 $R^2 : 0.9134$

Lasso Regressor: $I_{duc} = 0.781Uw + 0.219Ub$
 $R^2 : 0.9134$

$$uc \sim uw + ub \quad (R^2 \approx 0.93)$$

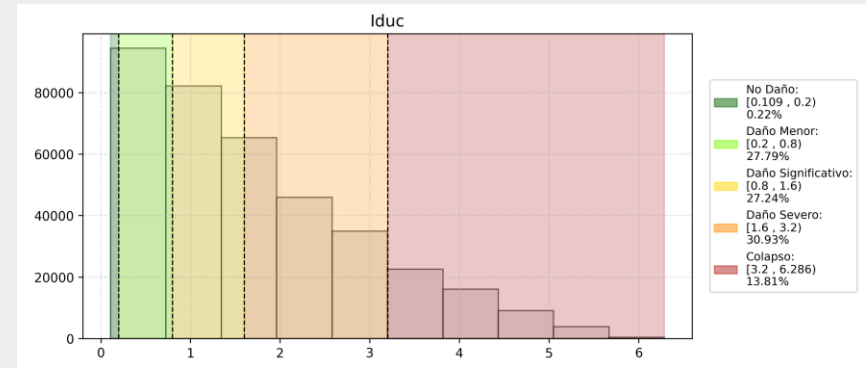
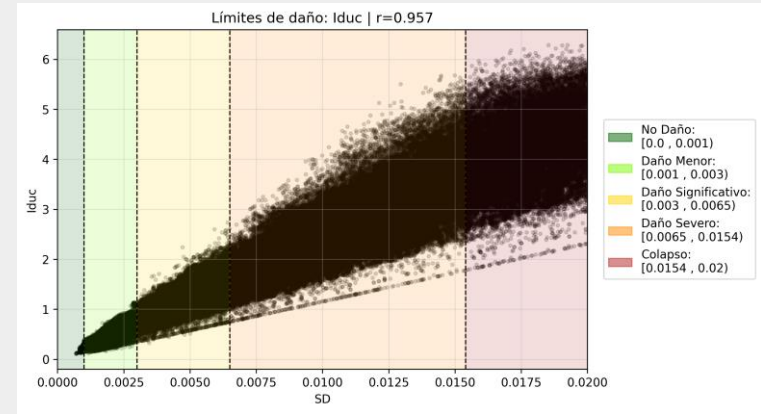
$$uw \sim uc + ub \quad (R^2 \approx 0.92)$$

$$ub \sim uw + uc \quad (R^2 \approx 0.87)$$

uc se puede reconstruir mejor con uw y ub → es la más redundante.

ub aporta más información única.

Elemento	Contribución
Muros	78.1%
Vigas	21.9%
Columnas	0.0%



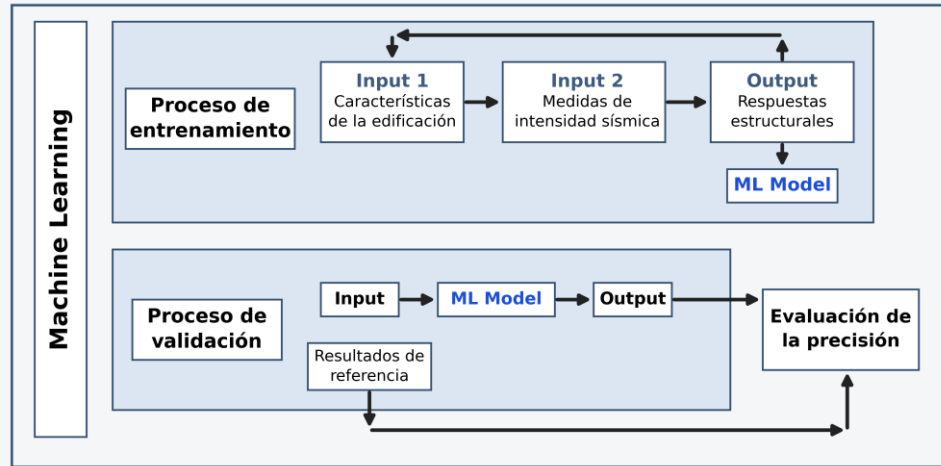
Estado de daño	No Daño	Daño Menor	Daño Significativo	Daño Severo	Colapso
Índice de ductilidad (Iduc)	< 0.2	≥ 0.2 y < 0.8	≥ 0.8 y < 1.6	≥ 1.6 y < 3.2	≥ 3.2

6. Machine Learning

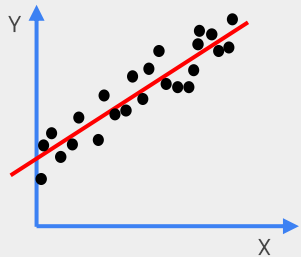
DEPURACIÓN DE PARÁMETROS SIN INFLUENCIA EN LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

Stories	Número de pisos
WD	Densidad de muros en X
WD_ratio	Ratio de WD respecto a la norma
TOX	Periodo fundamental en X
TOY	Periodo fundamental en Y
TOX/TOY	Relación de periodos
TOZ	Periodo fundamental en Z
M1	Configuración de muro 1
M2	Configuración de muro 2
M3	Configuración de muro 3
M4	Configuración de muro 4
M5	Configuración de muro 5
M6	Configuración de muro 6
M7	Configuración de muro 7
M8	Configuración de muro 8
M9	Configuración de muro 9
M10	Configuración de muro 10
M11	Configuración de muro 11
M12	Configuración de muro 12
Ex	Ratio de excentricidad en X
Ey	Ratio de excentricidad en Y

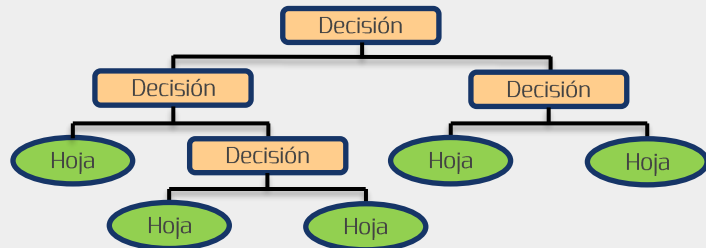
PGA	Peak Ground Acceleration
Sa_T1	Aceleración espectral en T1
SaAvg	Aceleración espectral promedio
EPA	Effective Peak Acceleration
IMsr	SR Power-law form IM
IMcr	CR Power-law form IM
EPI	Earthquake Power Index
RMS	Root Mean Square Acc.
INp	Bojórquez & Iervolino IM
AI	Arias Intensity
A95	Sarma & Yang IM
Ia	Riddell & Garcia Acceleration IM
Ic	Characteristic Intensity
CAV	Cumulative Absolute Velocity
S_CAV	Standardized Cumulative Velocity
TPH	Two-parameter hazard IM
PGV	Peak Ground Velocity
Vsq	Squared Velocity
Vrs	Root Squared Velocity
If	Fajfar et al. IM
Iv	Riddell & Garcia Velocity IM
Sv_T1	Velocidad espectral en T1
SIH	Housner Spectrum Intensity
Iz	Peak Ground Displacement



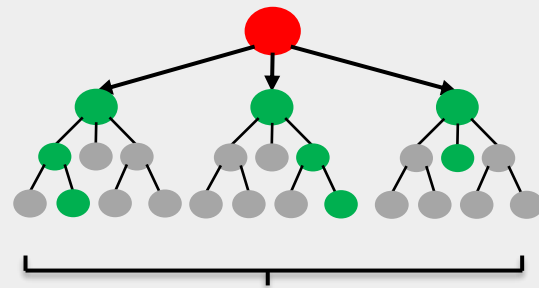
MÉTODOS DE MACHINE LEARNING



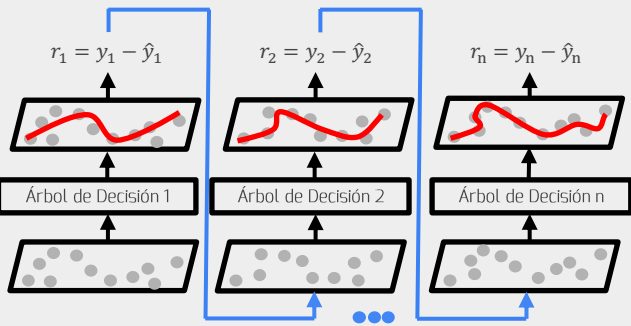
Regresión Lineal



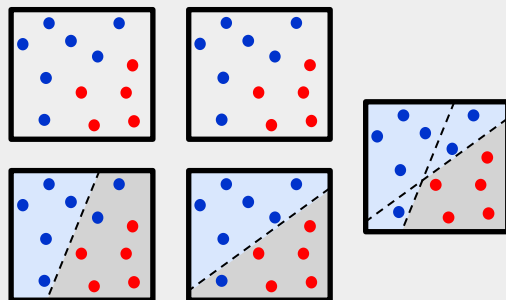
Árbol de decisión



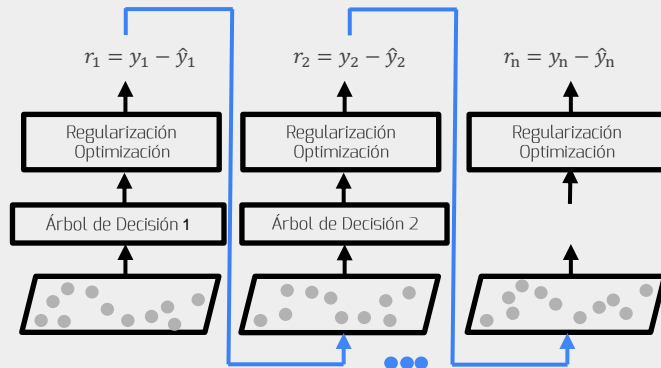
Bosque Aleatorio



Gradient Boosting



AdaBoost

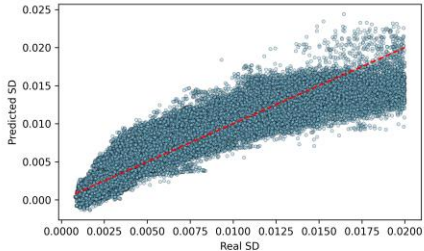


XGBoost

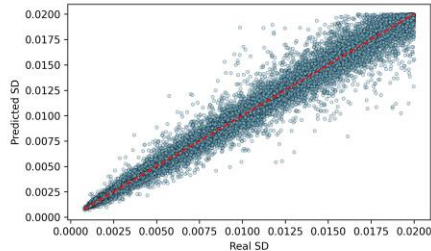
RESULTADOS DE LOS MÉTODOS DE MACHINE LEARNING

OUTPUT: SD

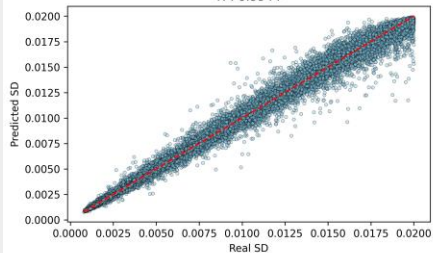
Linear Regression
R²: 0.8497



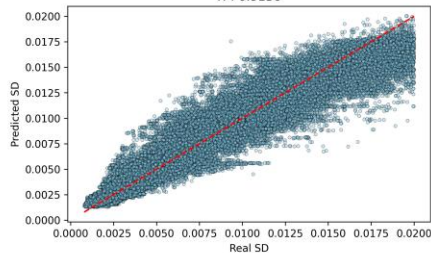
Decision Tree
R²: 0.9901



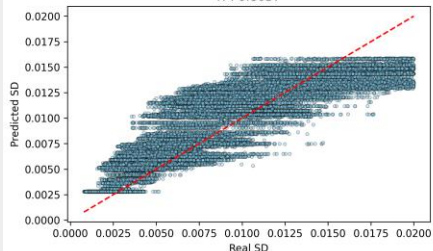
Random Forest
R²: 0.9944



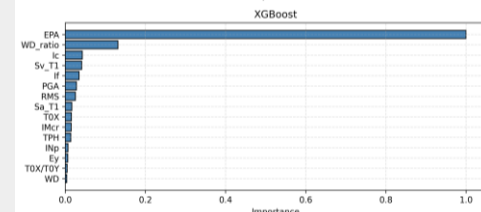
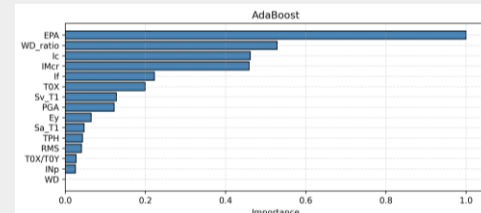
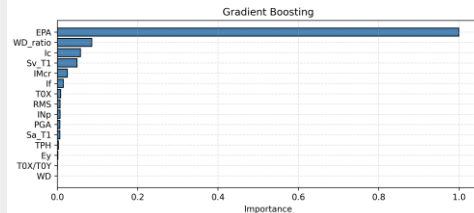
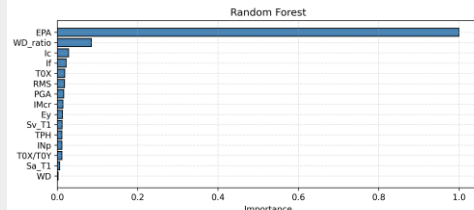
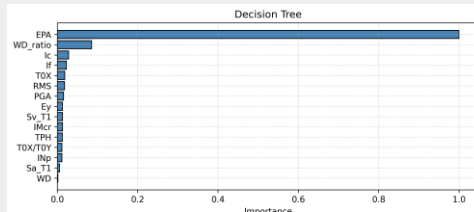
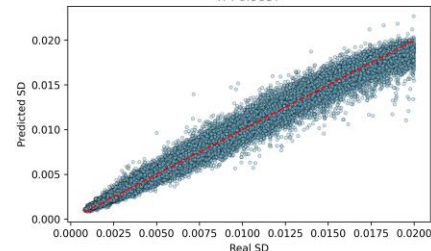
Gradient Boosting
R²: 0.9136



AdaBoost
R²: 0.8037



XGBoost
R²: 0.9837



RECUPERACIÓN ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL POST-SÍSMICA DE COMPLEJOS EDUCATIVOS BASADA EN EL TIEMPO DE INOPERATIVIDAD



VRI UNI
Vicerectorado de Investigación

Investigador Principal:
Dr. Edison Moscoso

Co-Investigadores:
MSc. Fanny Eto
Mg. Jorge Gallardo
Mg. Joseph Jaramillo
Dr. Ing. Miguel Diaz
Mg. Italo Inocente

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
FORMATIVA ESPECIAL
2026 – VRI UNI**

Estudiante Investigador Posgrado:
Ing. Arq. Mario Oblitas (FIC-UNI)
Ing. Zevallos Juan (FIC-UNI)

Estudiante Investigador Pregrado:
Mendoza Edsel (FIC-UNI)
Fustamante Yerson (FIC-UNI)
Retuerto Joseph (FIC-UNI)
Lumbre Darlee (DIC-UNI)



DEPARTAMENTO DE LÍNEAS VITALES –
CISMID – FIC – UNI

Gracias