



SeSDA

Sequential Seismic Degradation Analysis

Método de diseño estructural para secuencias sísmicas y vida útil mediante la

Ductility Degradation Law (DuDeL)

M.Sc(TUM). Marcelo Moncayo Theurer

THEK Research Institute

Método completo

SeSDA — Sequential Seismic Degradation Analysis

Ley interna

DuDeL — Ductility Degradation Law

Criterio inicial de aceptación

Capacidad residual al final de la vida útil ≥ 55 % de la capacidad original

Resumen

El diseño sísmico convencional evalúa generalmente la respuesta estructural frente a eventos sísmicos individuales. Sin embargo, una estructura real puede experimentar durante su vida útil múltiples terremotos, incluyendo secuencias de sismo principal y réplicas fuertes, así como eventos independientes de diferentes magnitudes.

Después de cada evento, la estructura puede conservar deformaciones residuales y presentar pérdida parcial de rigidez, resistencia y capacidad de disipación, por lo que asumir que cada nuevo terremoto actúa sobre una estructura intacta puede no representar adecuadamente su condición física.

Este trabajo propone SeSDA — Sequential Seismic Degradation Analysis, un método de diseño y comprobación estructural que considera explícitamente una secuencia de terremotos durante una vida útil establecida. SeSDA conserva el estado degradado de la estructura después de cada evento y lo utiliza como condición inicial del análisis posterior.

Como componente central del método se propone DuDeL — Ductility Degradation Law, una fórmula que transforma la ductilidad alcanzada en una reducción explícita de la capacidad de cedencia σ_y .

$$N_f(\mu) = 34.63 \left(\frac{15 - \mu}{\mu - 1} \right)^{2.6}, \quad 1 < \mu < 15$$

Donde:

N_f = número equivalente de incursiones que conducirían al agotamiento para una ductilidad μ ;

μ = ductilidad alcanzada;

μ_u = ductilidad última de referencia.

$$\sigma_{y,i} = \sigma_{y,i-1} - \frac{\sigma_{y,0}}{N_f(\mu_i)} \quad (1)$$

Donde:

$\sigma_{y,i}$ = capacidad de cedencia residual después de la incursión o evento i ;

$\sigma_{y,i-1}$ = capacidad residual inmediatamente anterior;

$\sigma_{y,0}$ = capacidad inicial de cedencia;

$N_f(\mu_i)$ = número equivalente de incursiones asociado a la ductilidad μ_i ;

μ_i = ductilidad de la incursión i ;

i = índice de incursión o evento.

El procedimiento permite realizar análisis dinámicos inelásticos sucesivos mediante 2PIM-hPIM, Newmark u otros métodos de integración, actualizando

la capacidad estructural después de cada evento. Para aplicaciones de vida útil se propone integrar SeSDA con SERRA [1–6] para la caracterización de amenaza y con registros sísmicos reales o acelerogramas sintéticos generados mediante THEK-SER [7].

$$\frac{\sigma_{y,final}}{\sigma_{y,0}} \geq 0.55 \quad (2)$$

Donde:

$\sigma_{y,final}$ = capacidad de cedencia residual al final de la secuencia;

$\sigma_{y,0}$ = capacidad inicial de cedencia;

fracción mínima de capacidad residual propuesta como criterio de aceptación = 0.55

La contribución principal del trabajo es establecer un procedimiento para el diseño estructural basado en la reducción de capacidad por fatiga de constantes incursiones dúctiles de la estructura a lo largo del tiempo, un modelo determinista que conecta directamente ductilidad, degradación de capacidad y análisis secuencial de terremotos.

Palabras clave: SeSDA; DuDeL; ductilidad; degradación sísmica; capacidad residual; secuencia sísmica; vida útil; terremotos múltiples; análisis inelástico; SERRA; THEK-SER; 2PIM.

1. Introducción

Una estructura no necesariamente experimenta un único terremoto durante su existencia. Puede ser sometida a un sismo principal seguido pocas horas o días después por réplicas importantes, o experimentar diferentes terremotos durante varias décadas de servicio.

La mayoría de los métodos de diseño estructural sismorresistente se concentran en darle a la estructura una capacidad para resistir el embate de un solo terremoto; se estudia la aceleración probable de ese terremoto y se le otorga capacidad al edificio de solventar esas cargas con un nivel de seguridad. Esta hipótesis no es real.

El procedimiento que se presenta en este paper abre la puerta a la posibilidad de diseñar una estructura sometiéndola a varios o decenas o centenas de sismos y observar cuán intacta queda la capacidad de la estructura al final.

Después de un terremoto capaz de producir incursiones inelásticas, la estructura puede conservar únicamente una fracción de la capacidad disponible antes del evento. Por tanto, el segundo terremoto debería actuar sobre una estructura cuyo estado mecánico depende de lo que la estructura experimentó en el pasado.

La problemática de terremotos sucesivos ha sido estudiada previamente. Shokrabadi, Burton y Stewart [8] analizaron estructuras sometidas a secuencias mainshock–aftershock, mientras que Park–Ang [9,10] e Ibarra–Medina–Krawinkler [11] desarrollaron modelos de daño y deterioro acumulativo. Una revisión del estado del arte de Rashid y Nishio (2024) [12] sintetiza la evaluación de estructuras bajo secuencias mainshock–aftershock y confirma la relevancia del daño previo en el desempeño ante eventos posteriores.

Los modelos de Clough (1966) [13] y Takeda et al. (1970) [14] constituyen antecedentes fundamentales para la representación histerética degradante. La contribución de este trabajo se sitúa en una formulación explícita que transforma la ductilidad alcanzada en reducción de capacidad residual transferible al siguiente evento.

2. Problema físico

Considérese inicialmente un sistema equivalente de un grado de libertad sometido a excitación sísmica.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

Donde:

m = masa equivalente;

u = desplazamiento relativo;

$\dot{u}$ = velocidad relativa;

$\ddot{u}$ = aceleración relativa;

c = coeficiente de amortiguamiento;

$f_s(u, \dot{u})$ = fuerza resistente no lineal;

$\ddot{u}_g(t)$ = aceleración del terreno en función del tiempo t ;

t = tiempo.

$$\mu = \frac{u_{\max}}{u_y} \quad (4)$$

Donde:

μ = ductilidad;

$u_{\max}$ = desplazamiento máximo alcanzado;

u_y = desplazamiento de cedencia.

La pregunta central de SeSDA es: ¿qué capacidad resistente debe asignarse a la estructura cuando ocurre el siguiente terremoto?

3. DuDeL – Ductility Degradation Law

DuDeL introduce N_f . N_f representa el número equivalente de incursiones de una determinada ductilidad que conducirían al agotamiento de la capacidad considerada por el modelo.

$$N_f(\mu) = 34.63 \left(\frac{15 - \mu}{\mu - 1} \right)^{2.6} \quad (5)$$

Donde:

N_f = número equivalente de incursiones que conducirían al agotamiento para una ductilidad μ ;

μ = ductilidad alcanzada;

μ_{ult} = ductilidad última de referencia;

4. Degradación de la capacidad de cedencia, modelo DuDeL

El daño relativo asociado a una incursión i se define mediante $1/N_f(\mu_i)$, y la reducción correspondiente de capacidad se aplica sobre la capacidad inicial $\sigma_{y,0}$. El valor $\sigma_{y,i-1}$ representa la capacidad residual existente inmediatamente antes de la nueva incursión o evento.

$$\Delta D_i = \frac{1}{N_f(\mu_i)} \quad (6)$$

Donde:

ΔD_i = incremento de daño relativo asociado a la incursión i;

$N_f(\mu_i)$ = número equivalente de incursiones asociado a μ_i ;

μ_i = ductilidad de la incursión i;

i = índice de incursión.

$$\Delta \sigma_{y,i} = \frac{\sigma_{y,0}}{N_f(\mu_i)} \quad (7)$$

Donde:

$\Delta \sigma_{y,i}$ = reducción de capacidad de cedencia producida por la incursión i;

$\sigma_{y,0}$ = capacidad inicial de cedencia;

$N_f(\mu_i)$ = número equivalente de incursiones asociado a μ_i ;

μ_i = ductilidad de la incursión i.

$$\sigma_{y,i} = \sigma_{y,i-1} - \frac{\sigma_{y,0}}{N_f(\mu_i)} \quad (8)$$

Donde:

$\sigma_{y,i}$ = capacidad residual después de la incursión i;

$\sigma_{y,i-1}$ = capacidad residual antes de la incursión i;

$\sigma_{y,0}$ = capacidad inicial;

$N_f(\mu_i)$ = número equivalente de incursiones asociado a μ_i .

$$\sigma_{y,i} = \sigma_{y,i-1} - \frac{\sigma_{y,0}}{34.63} \left(\frac{\mu_i - 1}{15 - \mu_i} \right)^{2.6} \quad (9)$$

Donde:

$\sigma_{y,i}$ = capacidad residual después de la incursión i;

$\sigma_{y,i-1}$ = capacidad residual anterior;

$\sigma_{y,0}$ = capacidad inicial;

μ_i = ductilidad de la incursión i;

μ_{ult} = ductilidad última de referencia.

Fórmula de DuDeL definitiva

$$\sigma_{y,n} = \sigma_{y,0} \left[1 - \frac{1}{34.63} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\mu_i - 1}{15 - \mu_i} \right)^{2.6} \right], \quad \sigma_{y,n} \geq 0 \quad (10)$$

Donde:

$\sigma_{y,n}$ = capacidad residual después de n incursiones;

$\sigma_{y,0}$ = capacidad inicial;

n = número total de incursiones consideradas;

i = índice de cada incursión;

μ_i = ductilidad de la incursión i;

la condición $\sigma_{y,n} \geq 0$ impide capacidades negativas.

5. Interpretación física inicial de DuDeL

La expresión genera poca degradación para ductilidades moderadas y una aceleración pronunciada de la pérdida de capacidad al aproximarse a la ductilidad última.

La región próxima a $\mu \approx 12$ representa una condición de degradación extrema.

Tabla 1. Pérdida de capacidad de cedencia por incursión según la ductilidad μ .

Ductilidad μ	Pérdida de $\sigma_{y,0}$ por incursión
4	$\approx 0.10 \%$
5	$\approx 0.27 \%$
6	$\approx 0.63 \%$
8	$\approx 2.9 \%$
10	$\approx 13.3 \%$
12	$\approx 84.7 \%$
14	agotamiento

6. SeSDA – Sequential Seismic Degradation Analysis

SeSDA utiliza DuDeL como mecanismo de transferencia del estado estructural entre análisis dinámicos sucesivos. La estructura conserva así memoria matemática de los terremotos anteriores.

$$\text{Sismo}_1 \rightarrow \mu_1 \rightarrow \text{DuDeL} \rightarrow \sigma_{y,1} \rightarrow \text{Sismo}_2 \rightarrow \mu_2 \rightarrow \text{DuDeL} \rightarrow \sigma_{y,2} \rightarrow \dots \quad (11)$$

Donde:

Sismo1 y Sismo2 = eventos sísmicos sucesivos;

μ_1 y μ_2 = ductilidades obtenidas en cada evento;

DuDeL = Ductility Degradation Law;

$\sigma_{y,1}$ y $\sigma_{y,2}$ = capacidades de cedencia residuales después del primer y segundo evento, respectivamente.

También puede haber cambios en la capacidad en medio de un mismo terremoto si se aplica DuDeL en cada incursión plástica.

7. Dos modalidades de aplicación de DuDeL

SeSDA permite aplicar DuDeL al final de cada terremoto o dentro del propio análisis dinámico, cada vez que se identifica una plastificación o incursión relevante. La segunda modalidad permite que la capacidad se degrade durante el mismo registro.

- Modo A: DuDeL al final de cada sismo para transferir capacidad residual al evento siguiente.
- Modo B: DuDeL dentro del mismo sismo, aplicada a incursiones/plastificaciones relevantes.

8. Integración numérica mediante 2PIM-hPIM

La implementación inicialmente propuesta utiliza 2PIM-hPIM como procedimiento de integración dinámica inelástica. El mismo concepto puede implementarse utilizando Newmark u otros integradores no lineales, lo cual separa la hipótesis física de SeSDA del algoritmo concreto de integración.

$$2PIM_1 \rightarrow DuDeL \rightarrow 2PIM_2 \rightarrow DuDeL \rightarrow 2PIM_3 \rightarrow \dots \quad (12)$$

Donde:

2PIM1, 2PIM2 y 2PIM3 = corridas dinámicas inelásticas sucesivas mediante 2PIM-hPIM;
DuDeL = ley aplicada entre corridas para actualizar la capacidad residual.

9. SeSDA aplicado a secuencias sismo-réplica

Una primera aplicación natural consiste en estudiar secuencias cortas de sismo principal y réplicas. La capacidad residual del primer evento se utiliza explícitamente como condición del segundo, y así sucesivamente. Hosseinpour y Abdelnaby (2017) [15] mostraron que la consideración del daño de eventos previos modifica significativamente la fragilidad de marcos de hormigón armado sometidos a múltiples terremotos.

$$M7 \rightarrow \sigma_{y,1} \rightarrow M6.5 \rightarrow \sigma_{y,2} \rightarrow M6 \rightarrow \sigma_{y,3} \quad (13)$$

Donde:

M7, M6.5 y M6 = eventos sísmicos representativos de magnitudes 7, 6.5 y 6;
 $\sigma_{y,1}$, $\sigma_{y,2}$ y $\sigma_{y,3}$ = capacidades residuales después de cada evento.

10. SeSDA aplicado a la vida útil completa

La segunda aplicación extiende el concepto desde horas o días hasta décadas. En vez de verificar exclusivamente un terremoto de diseño, SeSDA plantea determinar los terremotos relevantes que razonablemente pueden afectar a la estructura durante la vida útil y aplicarlos secuencialmente. Turchetti et al. (2023) [16] estudiaron explícitamente la acumulación de daño en una estructura sometida a múltiples terremotos durante su vida útil, proporcionando un antecedente directo para la evaluación acumulativa multievento.

$$T_L = 50 \text{ años} \quad (14)$$

Donde:

T_L = vida útil de diseño; 50 años = duración adoptada en el ejemplo conceptual.

$$M8 \rightarrow M7 \rightarrow M6 \rightarrow M5 \rightarrow M7 \rightarrow M8 \quad (15)$$

Cada evento debe representarse mediante una excitación compatible con magnitud, distancia, fuente, suelo, duración y contenido frecuencial.

11. Integración con SERRA

Se propone utilizar SERRA [1–6] — Seismic Energy Release and Risk Assessment — como componente de caracterización sísmica regional. Para una vida útil T_L , SERRA y/o el análisis probabilístico o determinista complementario deben permitir establecer escenarios de ocurrencia por clases de magnitud.

$$N_{M4}, \quad N_{M5}, \quad N_{M6}, \quad N_{M7}, \quad N_{M8} \quad (16)$$

Donde:

N_{M4} , N_{M5} , N_{M6} , N_{M7} y N_{M8} = número de eventos esperados de magnitud 4, 5, 6, 7 y 8, respectivamente, durante la vida útil considerada.

12. Selección o generación de acelerogramas

Una magnitud sísmica no constituye por sí sola una historia temporal de aceleraciones. Para cada escenario deben seleccionarse registros reales compatibles o generarse registros sintéticos representativos.

Se propone THEK-SER [7] como opción para la reconstrucción/generación de acelerogramas compatibles con las características espectrales seleccionadas.

$$\text{SERRA} \rightarrow \text{escenarios sísmicos} \rightarrow \text{THEK – SER/registros reales} \rightarrow a_g(t) \quad (17)$$

13. Arquitectura integral de SeSDA

El método completo integra caracterización de amenaza, selección o síntesis de movimientos, análisis dinámico inelástico, lectura de ductilidad, degradación mediante DuDeL y transferencia del estado residual al siguiente evento.

$$T_L \rightarrow \text{SERRA} \rightarrow \{E_1, E_2, \dots, E_n\} \quad (18)$$

Donde:

T_L = vida útil de diseño;

$E_1, E_2, \dots, E_n$ = eventos sísmicos que integran la secuencia de diseño;

n = número total de eventos considerados.

$$E_i \rightarrow a_{g,i}(t) \rightarrow (2\text{PIM} - \text{hPIM}) \rightarrow \mu_i \rightarrow \text{DuDeL} \rightarrow \sigma_{y,i} \rightarrow E_{i+1} \quad (19)$$

Donde:

E_i = evento sísmico i ;

$a_{g,i}(t)$ = acelerograma del evento i ;

2PIM-hPIM = procedimiento de integración dinámica;

μ_i = ductilidad obtenida en el evento i ;

DuDeL = ley de degradación;

$\sigma_{y,i}$ = capacidad residual después del evento i ;

E_{i+1} = evento siguiente.

$$\text{SERRA} + \text{THEK} - \text{SER} + 2\text{PIM} - \text{hPIM} + \text{DuDeL} = \text{SeSDA} \quad (20)$$

Donde:

SERRA = caracterización de amenaza;

THEK-SER = generación/reconstrucción de acelerogramas;

2PIM-hPIM = integración dinámica inelástica;

DuDeL = ley de degradación;

SeSDA = Sequential Seismic Degradation Analysis.

14. Criterio de diseño por capacidad residual

Se propone que la estructura no sea evaluada exclusivamente por la condición de no colapso durante un determinado terremoto. Se introduce adicionalmente una condición de capacidad residual al término de toda la vida útil.

$$\frac{\sigma_{y,final}}{\sigma_{y,0}} \geq R_{min} \quad (21)$$

Donde:

$\sigma_{y,final}$ = capacidad residual al final de la secuencia;

$\sigma_{y,0}$ = capacidad inicial;

R_{min} = fracción mínima de capacidad residual exigida.

$$R_{min} = 0.55 \quad (22)$$

Donde:

R_{min} = fracción mínima de capacidad residual propuesta como criterio inicial de aceptación;

0.55 = 55 % de la capacidad original.

Si $\sigma_{y,final} < 0.55 \cdot \sigma_{y,0}$, la estructura NO CUMPLE con SeSDA y debe rediseñarse hasta satisfacer el requisito.

15. Procedimiento de diseño

El procedimiento SeSDA se ejecuta de forma iterativa hasta completar la secuencia sísmica de diseño y verificar la capacidad residual final.

1. Definir la vida útil T_L .
2. Determinar la amenaza sísmica mediante SERRA y/o métodos complementarios.
3. Establecer el conjunto de eventos probables $E=\{E_1, E_2, \dots, E_n\}$.
4. Asignar a cada evento un acelerograma real o sintético mediante THEK-SER.
5. Definir el sistema estructural equivalente; primera implementación: SDOF.
6. Definir $\sigma_{y,0}$.
7. Aplicar el primer acelerograma mediante 2PIM-hPIM.
8. Obtener μ_1 .
9. Aplicar DuDeL y obtener $N_f(\mu_1)$.
10. Actualizar $\sigma_{y,1}$.
11. Aplicar el siguiente terremoto usando la capacidad residual anterior.
12. Repetir hasta completar la secuencia.
13. Calcular $R_{res} = \sigma_{y,n} / \sigma_{y,0}$.
14. Verificar $R_{res} \geq 0.55$.
15. Si no cumple, rediseñar y repetir SeSDA.

16. Diferencia respecto de modelos clásicos

SeSDA trata de dar un enfoque complementario a los modelos existentes. Takeda [14] y Clough [13] son antecedentes de degradación histerética, IMK [11] incorpora deterioro explícito de resistencia y rigidez, y Park–Ang [9,10] reconoce el carácter acumulativo del daño. DuDeL introduce una relación directa $\mu \rightarrow N_f \rightarrow \Delta\sigma_y$ y SeSDA extiende esa relación al transporte de capacidad entre eventos sucesivos [17,18].

17. Relación con modelos de degradación existentes

DuDeL adopta como variable principal la ductilidad μ y no requiere, en su formulación inicial, integrar la energía histerética total como parámetro de control. Esta simplicidad favorece su integración con métodos dinámicos en los que la ductilidad máxima sea una salida natural del cálculo.

18. Naturaleza paramétrica de DuDeL

La formulación debe entenderse como una familia paramétrica. Los valores $\mu_{ult} = 15$, $p = 2.6$ y $C = 34.63$ corresponden a la calibración propuesta y pueden modificarse posteriormente sin cambiar la estructura conceptual de la ley.

$$N_f(\mu) = C \left(\frac{\mu_u - \mu}{\mu - 1} \right)^p \quad (23)$$

Donde:

$N_f(\mu)$ = número equivalente de incursiones asociado a la ductilidad μ ;

C = coeficiente de calibración;

μ_{ult} = ductilidad última de referencia;

μ = ductilidad alcanzada;

p = exponente que controla la velocidad de degradación.

$$C = N_r \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_u - \mu_r} \right)^p \quad (24)$$

Donde:

C = coeficiente de calibración;

N_r = número de incursiones del punto de referencia;

μ_r = ductilidad del punto de referencia;

μ_{ult} = ductilidad última de referencia;

p = exponente de degradación.

19. Capacidad residual durante una secuencia

La capacidad residual normalizada $R_\sigma = \sigma_y / \sigma_{y,0}$ permite representar gráficamente el deterioro estructural durante toda la vida de diseño y cuantificar qué porcentaje de capacidad consume cada evento.

$$R_{\sigma,i} = \frac{\sigma_{y,i}}{\sigma_{y,0}} \quad (25)$$

Donde:

$R_{\sigma,i}$ = relación de capacidad residual después del evento i;

$\sigma_{y,i}$ = capacidad residual después del evento i;

$\sigma_{y,0}$ = capacidad inicial.

20. Orden de los eventos

SeSDA permite analizar distintas permutaciones de una misma población de terremotos. El orden temporal puede resultar crítico porque cada evento actúa sobre una capacidad residual diferente.

21. Criterios futuros de desempeño

El valor $R_{min} = 0.55$ representa la primera condición de aceptación propuesta. En trabajos futuros podrían definirse umbrales diferentes según importancia, tipología estructural y objetivo de desempeño.

$$R_{res} \geq 0.55 \quad (26)$$

22. Potencial de diseño de vida útil

El objetivo final de SeSDA es modificar la pregunta tradicional “¿resiste el edificio el terremoto de diseño?” por “¿puede atravesar la totalidad de su vida sísmica prevista conservando al final una capacidad residual aceptable?”

$$\mathcal{S}(T_L) \rightarrow \sigma_{y,\text{final}} \geq R_{\min} \cdot \sigma_{y,0} \quad (27)$$

Donde:

$\mathcal{S}(T_L)$ = secuencia sísmica correspondiente a la vida útil T_L ;

$\sigma_{y,\text{final}}$ = capacidad residual al finalizar la secuencia;

$R_{\min}$ = fracción mínima exigida;

$\sigma_{y,0}$ = capacidad inicial.

23. Discusión

Los conceptos de daño acumulado, modelos histeréticos degradantes y análisis mainshock–aftershock poseen antecedentes extensos. La contribución específica propuesta por Moncayo Theurer es **DuDeL** como transformación explícita $\mu \rightarrow N_f(\mu) \rightarrow \Delta\sigma_y$ y su integración dentro de **SeSDA** para transportar la capacidad residual entre eventos sucesivos.

Hasta la revisión bibliográfica realizada, no se identificó una formulación publicada con la misma estructura funcional. Los trabajos de Hosseinpour y Abdelnaby (2017) [15], Turchetti et al. (2023) [16] y Rashid y Nishio (2024) [12] respaldan el problema general de daño acumulado y secuencias sísmicas, sin reproducir la formulación funcional específica propuesta para DuDeL.

Como contexto complementario de la línea de investigación de Moncayo Theurer, se incluyen trabajos relacionados con leyes de atenuación, evolución y reducción de fórmulas, estimación del período estructural, interacción suelo-estructura y metodologías de evaluación del riesgo sísmico y urbano [19–29]. Estas referencias se incorporan como antecedentes y desarrollos metodológicos vinculados al ecosistema THEK, sin presentarse como sustento directo de la formulación específica de DuDeL o SeSDA.

24. Conclusiones

1. SeSDA — Sequential Seismic Degradation Analysis — se propone como una metodología de diseño y comprobación estructural orientada a secuencias de terremotos y a la evaluación sísmica durante la vida útil completa de una estructura.
2. DuDeL — Ductility Degradation Law — constituye el núcleo de degradación y permite conservar explícitamente la memoria de daño entre terremotos. La implementación THEK propuesta integra SERRA + THEK-SER + 2PIM-hPIM + DuDeL.
3. Como criterio inicial de aceptación se propone $\sigma_{\sigma_{y,final}} \geq 0.55 \cdot \sigma_{\sigma_{y,0}}$. Si esta condición no se cumple, la estructura debe rediseñarse y volver a ser evaluada mediante SeSDA.

Referencias

- [1] Moncayo Theurer, M. (2026). Seismic Energy Release Risk Assessment (SERRA) — Evaluación del Riesgo por Liberación de Energía Sísmica. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.21989825>
- [2] Moncayo Theurer, M. (2026). Empirical Validation of the Seismic Energy Release Method SERRA / MEL. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20588267>
- [3] Moncayo Theurer, M. (2016). Enfoque de energía sísmica liberada: comportamiento sísmico de Ecuador. Alternativas, 17(3), 224–230.
- [4] Moncayo Theurer, M., Vargas Jiménez, J., Moncayo Velasco, G., & Barzola Zambrano, I. (2017). Análisis sobre la recurrencia de terremotos severos en Ecuador. PRISMA Tecnológico, 8(1), 12–17. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/1526>
- [5] Moncayo Theurer, M., Velasco, G., Mora, C., Montenegro, M., & Córdova, J. (2017). Terremotos mayores a 6.5 en Ecuador desde 1900 hasta 1970. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 21(2), 55–64. <https://www.redalyc.org/journal/467/46753192005/html/>
- [6] Moncayo, M. (2000). Seismic zonation of Guayaquil. Earthquake Spectra, 16(Supplement 1), 59.

- [7] Moncayo, M. (2000). Recovery of the seismogram and generation of the semi-synthetic accelerogram for the Bahía de Caráquez earthquake ($M_s = 7.2$). *Earthquake Spectra*, 16(Supplement 1), 60.
- [8] Shokrabadi, M., Burton, H. V., & Stewart, J. P. (2018). Impact of sequential ground motion pairing on mainshock-aftershock structural response and collapse performance assessment. *Journal of Structural Engineering*, 144(10), 04018177. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002170](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002170)
- [9] Park, Y. J., & Ang, A. H.-S. (1985). Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*, 111(4), 722–739. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(722\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722))
- [10] Park, Y. J., Ang, A. H.-S., & Wen, Y. K. (1985). Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings. *Journal of Structural Engineering*, 111(4), 740–757. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(740\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(740))
- [11] Ibarra, L. F., Medina, R. A., & Krawinkler, H. (2005). Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(12), 1489–1511. <https://doi.org/10.1002/eqe.495>
- [12] Rashid, M., & Nishio, M. (2024). Mainshock-aftershock seismic fragility assessment of civil structures: A state-of-the-art review. *Earthquake Engineering and Resilience*, 3(4), 548–573. <https://doi.org/10.1002/eer2.105>
- [13] Clough, R. W. (1966). Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements. Report No. 66-16, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- [14] Takeda, T., Sozen, M. A., & Nielsen, N. N. (1970). Reinforced concrete response to simulated earthquakes. *Journal of the Structural Division*, ASCE, 96(12), 2557–2573. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002765>
- [15] Hosseinpour, F., & Abdelnaby, A. E. (2017). Fragility curves for RC frames under multiple earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 98, 222–234. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.04.013>
- [16] Turchetti, F., Tubaldi, E., Patelli, E., Castaldo, P., & Málaga-Chuquitaype, C. (2023). Damage modelling of a bridge pier subjected to multiple earthquakes: A comparative study. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21, 4541–4564. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01678-y>

- [17] Moncayo Theurer, L. M. (1999). Estudios de espectros inelásticos y factores de reducción para la ciudad de Guayaquil. Tesis de grado, ESPOL.
- [18] Moncayo, M. (2000). Calculation of the energy input and the energy absorption capacity for frames. Individual Studies by Participants to the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, 36, 163–175.
- [19] Moncayo Theurer, M., Velasco, G., Rodríguez, J., & Terán, J. (2016). Análisis comparativo entre 13 leyes de atenuación y los registros de un sismo de magnitud 7.1 ocurrido en Japón. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 20(3), 137–146.
- [20] Moncayo Theurer, M. (2026). FGET — Formula Genomics and Evolution Theory / Teoría Genómica y Evolutiva de las Fórmulas. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20780971>
- [21] Moncayo Theurer, M. (2026). NFF — Nested Formula Framework / Marco de Fórmulas Anidadas. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20781769>
- [22] Moncayo Theurer, M. (2026). RRAM — Real-Record Attenuation Method / Método de Atenuación Basado en Registros Reales. Paper I: FGET-VRR-NFF Architecture and Development of the Attenuation Laws. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.22649683>
- [23] Moncayo Theurer, M. (2026). RRAM — Real-Record Attenuation Method / Método de Atenuación Basado en Registros Reales. Paper II: Structural Evolution and Second-Generation Attenuation Law. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.22650007>
- [24] Moncayo Theurer, M. (2026). THEK-SPOT — Structural Period Estimation Technique / Técnica de Estimación del Período Estructural. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.21896398>
- [25] Moncayo Theurer, M. (2026). VRR — Variable Reduction & Ranking / Reducción y Jerarquización de Variables. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.21897648>
- [26] Moncayo Theurer, M. (2026). Soil Spring Model (SSM): Validated Empirical Correlations for Soil Spring Coefficient Estimation in Clay Soils Derived Through the Nested Formula Framework (NFF). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.21447728>

- [27] Moncayo Theurer, M. (2026). SECA-GM: Severe Earthquake Consequence Assessment – Global Modeling Method. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.22090999>
- [28] Moncayo Theurer, M. (2026). HUIRA — Hybrid Urban Inspection and Risk Assessment. Paper I: Methodological Framework, Evolution and Risk Assessment Architecture. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.22092608>
- [29] Moncayo Theurer, M. (2026). HUIRA — Hybrid Urban Inspection and Risk Assessment. Paper II: Applications, Calculations and Urban Risk Assessment. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.22092927>

