

THEK RESEARCH INSTITUTE

RRAM

PAPER I

Real-Record Attenuation Method

arquitectura FGET-THEK-VRR-NFF y desarrollo de las leyes de atenuación
de Moncayo Theurer

*De la exploración de patrones instrumentales a la evolución estructural de
ecuaciones explícitas*

Marcelo Moncayo Theurer, M.Sc. (TUM)

THEK Research Institute · Agosto de 2026

Serie THEK-RRAM de dos papers.

Paper I: desarrollo de las primeras cuatro leyes de atenuación.

Paper II: evolución y Ley de Segunda Generación.

Resumen

Este trabajo presenta el núcleo metodológico y matemático del THEK Real-Record Attenuation Method (THEK-RRAM), desarrollado por Marcelo Moncayo Theurer como continuación de una línea de investigación iniciada con la contrastación de leyes de atenuación históricas frente a registros sísmicos reales.

Este Paper se concentra en la construcción de las primeras cuatro formulaciones: cómo la evidencia instrumental, la Curva de Máximas Aceleraciones Registradas (CMAR) y la arquitectura actualmente formalizada como FGET-THEK-VRR-NFF condujeron a ecuaciones explícitas de primera generación. La terminología FGET, THEK-VRR y NFF corresponde a la formalización actual del proceso [25–28].

THEK-RRAM parte de registros instrumentales y utiliza magnitud M , distancia epicentral D y aceleración máxima del suelo a como variables operativas de amplia disponibilidad.

La CMAR —Curva de Máximas Aceleraciones Registradas— actúa como referencia empírica superior; sin embargo, la ecuación de diseño buscada por Moncayo Theurer no pretende reproducir el máximo absoluto, sino situarse deliberadamente por debajo de él, en una zona aproximada del 75–80 % de la CMAR, con el propósito de que el producto matemático del trabajo esté de acuerdo con el criterio de valor extremo pero esté equilibrado.

El paper reconstruye la primera generación de leyes, que combina magnitud y distancia, y presenta sus cuatro expresiones: Curva Original, Variante 1, Variante 2 y Original Rebajada. El objetivo es dejar trazabilidad suficiente del desarrollo: eventos de base, registros instrumentales, construcción de las envolventes CMAR, identificación del patrón funcional y derivación progresiva de las ecuaciones.

Los detalles operativos de implementación pueden ser discutidos con el autor para aplicaciones específicas.

Palabras clave: THEK-RRAM; FGET; THEK-VRR; NFF; leyes de atenuación; ground-motion model; PGA; CMAR; magnitud; distancia; ecuaciones empíricas; evolución de fórmulas.

1. Introducción: del diagnóstico a la construcción de una nueva relación

Se compararon trece leyes de atenuación históricas con registros de eventos instrumentados de magnitudes aproximadas 5, 6, 7 y 9 y se encontraron discrepancias importantes en la representación de la rama superior de aceleraciones (CMAR), especialmente para los eventos de mayor magnitud [29,30,34,35].

La pregunta es, una vez identificado el problema, ¿cómo puede construirse una relación matemática nueva a partir de la evidencia?

En el desarrollo de GMM, la práctica internacional ha evolucionado desde relaciones relativamente simples de magnitud y distancia hacia modelos que incorporan numerosos términos de fuente, trayectoria y sitio, junto con modelos de variabilidad y mixed effects [1–12,38–44].

Esa evolución ha incrementado la capacidad descriptiva, pero también la complejidad paramétrica y la dependencia de metadatos. Revisiones recientes señalan que el número creciente de parámetros puede introducir correlaciones, trade-offs y riesgo de sobreajuste, de modo que la parsimonia y la interpretabilidad siguen siendo objetivos legítimos y son propósitos de este trabajo [45].

En paralelo, esta formulación se enmarca en una investigación más amplia orientada al desarrollo de una metodología de diseño de estructuras basada en energía [32,33]. Para ese propósito resulta valioso conservar una ley de atenuación compacta y operativa. Esta línea de investigación se vincula además con trabajos previos del autor sobre caracterización y recurrencia sísmica en Ecuador [36,37]. Asimismo, el descubrimiento de ecuaciones a partir de datos mediante algoritmos genéticos y enfoques physics-informed está siendo más exigido con el tiempo [13–18,24].

THEK-RRAM se sitúa en ese espacio. El proceso debe poder generar alternativas, reducir el espacio de variables y términos, organizar las

dependencias de manera anidada y, finalmente, volver a abrir la ecuación terminada cuando nueva evidencia muestra un defecto. En su formalización actual, esas funciones se identifican como FGET, VRR y NFF [25–28].

2. Objetivo y alcance del Paper I

El objetivo es documentar la arquitectura metodológica de THEK-RRAM y reconstruir matemáticamente la transición desde las observaciones instrumentales hasta las cuatro leyes de primera generación.

El paper se concentra en cuatro aspectos: (i) la base real de terremotos y registros que sustentó el desarrollo; (ii) el papel de la CMAR como envolvente de máximos; (iii) la función de FGET, THEK-VRR y NFF en la identificación, reducción y anidamiento de patrones; y (iv) la genealogía matemática de la Curva Original, Variante 1, Variante 2 y Original Rebajada.

La evolución hacia la Segunda Generación se desarrolla en un trabajo separado.

3. Base empírica y principio de información mínima

THEK-RRAM utiliza como variables operativas básicas la magnitud sísmica M , la distancia epicentral D (km) y la aceleración máxima del suelo a (Gal).

La elección del insumo sísmico responde a una decisión metodológica: maximizar la cantidad de registros disponibles. En esta etapa de desarrollo, el autor privilegia una base instrumental amplia y homogénea, de modo que el procedimiento matemático opere sobre la mayor cantidad posible de observaciones reales.

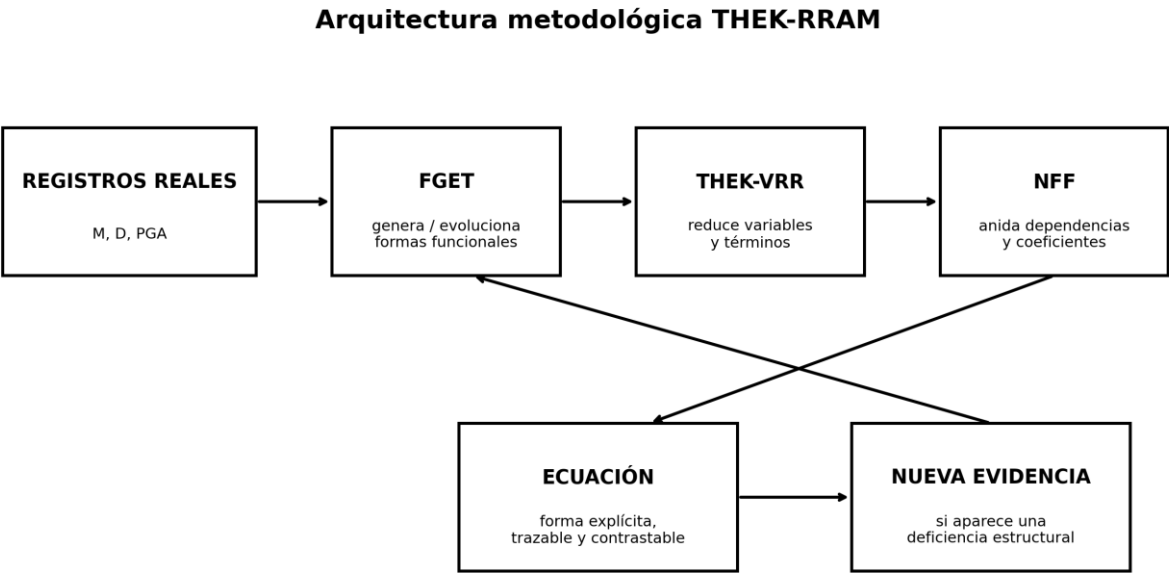
También, el autor busca una formulación de amplia cobertura que pueda comenzar con variables mínimas, porque forma parte de una línea de investigación más amplia que requiere resultados compactos y operativos. En etapas posteriores, estas fórmulas pueden enriquecerse con efectos de sitio, mecanismo de falla o trayectoria, aspectos que permanecen dentro de la línea investigativa futura [4–9,38,39].

Sin embargo, el desarrollo contemporáneo continúa buscando modelos simples, interpretables y extrapolables, precisamente porque una expansión indiscriminada del número de proxies y coeficientes también puede crear problemas de identificación y sobreajuste [45].

THEK-RRAM enfoca esta duda y mantiene la simplicidad.

Símbolo	Variable	Uso en THEK-RRAM
CMAR	Curva de Máximas Aceleraciones Registradas	Curva superior o envolvente construida a partir de máximos observados.
CPAR	Curva Promedio de Aceleraciones Registradas	Curva central, calculada con propósitos comparativos

4. Arquitectura integrada THEK-RRAM



La ecuación terminada puede volver al ciclo cuando nuevos registros revelan una limitación.

Figura 1. Arquitectura conceptual de THEK-RRAM. Puede haber varios ciclos de FGET-VRR-NFF [25-28].

La arquitectura puede expresarse así: FGET abre el espacio de soluciones y permite pensar la fórmula como una estructura evolutiva; VRR toma los datos, genera variables, las jerarquiza y reduce; NFF organiza las relaciones supervivientes mediante anidamiento recursivo de coeficientes. La salida es una ecuación explícita, comprensible y ajustada a los datos reales. Si registros posteriores revelan una deficiencia en la fórmula encontrada, la ecuación puede volver a ser objeto del proceso FGET-VRR-NFF para producir una formulación más refinada.

Por primera vez, en THEK se utiliza FGET-VRR-NFF para anidar niveles sucesivos de precisión matemática en el desarrollo de estas leyes.

4.1 FGET: la fórmula como estructura evolutiva

Formula Genomics and Evolution Theory (FGET) formaliza la idea de que una ecuación posee una organización interna —un “genoma” de operadores, términos y relaciones— que puede ser reconstruida, comparada y modificada [25].

Aplicado a ingeniería, lo importante no es adoptar literalmente toda la ontología filosófica de FGET, sino su consecuencia operacional: la forma funcional es una variable del problema.

Una ecuación que ajusta una base de datos puede dejar de ser adecuada cuando el patrón observado cambia o cuando se incorpora un dominio que antes no estaba representado.

Esta idea tiene paralelos con symbolic regression y con la identificación de ecuaciones gobernantes a partir de datos. Schmidt y Lipson mostraron que es posible destilar leyes matemáticas explícitas mediante búsqueda de expresiones [14]; Brunton, Proctor y Kutz desarrollaron SINDy para identificar estructuras dinámicas dispersas [15]; Udrescu y Tegmark propusieron Al Feynman para descubrir fórmulas interpretables [16]. En ingeniería sísmica, Tavakoli y Pezeshk emplearon un algoritmo genético híbrido para estimar GMPE y permitieron cambios en la forma funcional [13]; Chen et al. desarrollaron un physics symbolic learner sobre NGA-West2 [17], y Liu et al. combinaron symbolic regression con random-effects regression [18]. Estos trabajos siguen caminos paralelos a la arquitectura THEK, pero no iguales.

4.2 THEK-VRR: reducción del espacio de variables y términos

THEK-VRR (Variable Reduction & Ranking) cumple una función que debe distinguirse de un simple filtrado de registros. En la interpretación metodológica actual de THEK Research Institute, VRR reduce el espacio paramétrico: identifica variables, términos o combinaciones cuya contribución es insuficiente respecto del objetivo, y conserva los elementos que modifican de manera relevante y estable la capacidad descriptiva de la ecuación.

En otras aplicaciones de Moncayo Theurer, como THEK-SPOT, la cadena FGET→THEK-VRR→NFF está documentada públicamente y VRR actúa como reducción de variables antes de la construcción final [27].

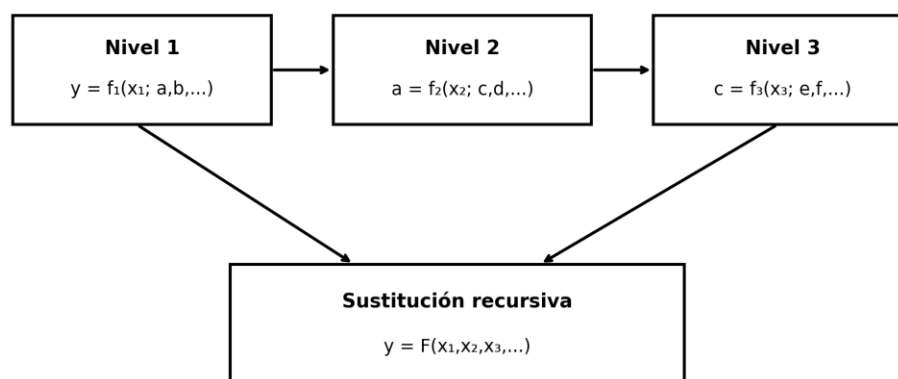
La teoría general de selección de variables, LASSO, criterios de información y model selection proporciona un marco académico compatible con esta preocupación por parsimonia [19–23], aunque THEK-VRR posee su propia lógica de selección.

$$G_j = J_{\text{ref}} - J(+x_j)$$

Donde: G_j = ganancia asociada a incorporar la variable o término x_j ; J_{ref} = función de error del modelo de referencia; $J(+x_j)$ = función de error después de incorporar x_j .

4.3 NFF: anidamiento recursivo y trazabilidad de coeficientes

NFF: anidamiento recursivo de coeficientes



Cada nivel explica cómo una nueva variable modifica los coeficientes del nivel anterior.

Figura 2. Esquema conceptual del Nested Formula Framework [26].

NFF es el componente operacional que permite construir una relación multivariable [26]. La sustitución recursiva reconstruye finalmente una función multivariable, pero mantiene la genealogía de cada coeficiente.

La ventaja metodológica que Moncayo Theurer busca es la trazabilidad del desarrollo.

Esta idea podría considerarse paralela a los mixed-effects models; estos descomponen la variabilidad entre eventos y dentro de los eventos mediante efectos aleatorios y son fundamentales para los GMM probabilísticos [10–12].

NFF responde a otra pregunta: cómo construir progresivamente una estructura funcional explícita. Ambos enfoques pueden coexistir; la combinación reciente de symbolic learning con random effects es complementaria [18].

5. CMAR como referencia superior y el criterio de equilibrio

La CMAR —Curva de Máximas Aceleraciones Registradas— representa la envolvente (envelope) de los valores máximos de aceleración observados para cada sismo [29,30,34,35]. No es una curva promedio. Su función es construir una referencia empírica superior, basada en registros reales, contra la cual pueden compararse tanto las relaciones históricas como las nuevas formulaciones.

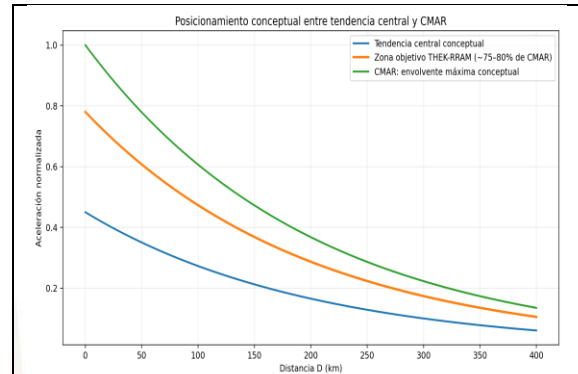


Figura 3. Representación conceptual —no probabilística— de la CMAR como envolvente de máximos, mientras que la ecuación THEK-RRAM se sitúa deliberadamente por debajo de ella y por encima de la CPAR.

El principio metodológico del trabajo es construir una ecuación que permanezca suficientemente cerca de la rama superior para evitar subestimaciones severas, pero sin perseguir cada máximo aislado.

$$a_{\text{THEK}}(D, M) \approx (0.75 - 0.80) \cdot a_{\text{CMAR}}(D, M)$$

Donde:

a_{THEK} = nivel de aceleración representado por la ecuación buscada;

a_{CMAR} = aceleración de la envolvente CMAR para la misma combinación de magnitud y distancia.

La búsqueda corresponde a una demanda balanceada: superior a la tendencia central e inferior al máximo absoluto. Su justificación ingenieril es equilibrar seguridad y economía.

En THEK-RRAM, el objetivo de esta etapa no es reproducir el máximo absoluto, sino establecer una demanda superior balanceada respecto de la envolvente CMAR.

5.1 Base instrumental que condujo a las primeras formulaciones

El desarrollo trabajó con terremotos instrumentados que representaban cuatro niveles de magnitud y que disponían de un número importante de

registros acelerográficos: Chino Hills, California, Mw 5.4 (413 registros); Northridge, California, Mw 6.4 (aproximadamente 310 registros en la base de trabajo); Miyagi, Japón, Mw 7.1 (136 registros en el artículo publicado); y Tohoku, Japón, Mw 9.0 (500 registros). Esta secuencia permitió observar el comportamiento aceleración-distancia desde magnitudes moderadas hasta un gran terremoto [29,30,34,35].

Para cada evento se representaron los valores máximos de aceleración registrados por las estaciones en función de la distancia epicentral. Sobre cada grupo de datos se identificó la CMAR, entendida como la envolvente de los máximos observados. Esta operación fue decisiva: en lugar de utilizar únicamente una tendencia promedio, el análisis siguió la rama superior de demanda que aparecía efectivamente en los registros.

Al comparar las envolventes de los cuatro niveles de magnitud, se observó que el descenso con la distancia podía representarse de forma compacta mediante funciones exponenciales.

El problema se transformó entonces en reconocer qué proporción de la estructura se repetía entre eventos y qué parte cambiaba con la magnitud.

En la terminología actual del método, FGET identifica y abre las familias funcionales candidatas; THEK-VRR reduce las alternativas y conserva las relaciones que aportan información útil; y NFF organiza las dependencias supervivientes de forma anidada. El resultado de este proceso fue una familia de ecuaciones explícitas en la que la magnitud controla el nivel de aceleración y la distancia controla su atenuación espacial.

Antes de comparar los registros reales con las relaciones históricas, se consideraron las trece leyes de atenuación utilizadas en el estudio de Miyagi. Sus expresiones, reproducidas del trabajo de Moncayo Theurer et al. (2016) [29], se resumen a continuación.

Tabla 1. Trece leyes de atenuación históricas evaluadas y sus expresiones matemáticas [29].

Ley de atenuación	Ecuación
Donovan 1 (D1)	$a_h = 1320e^{0.580M}(R + 25)^{-1.520}$
Donovan 2 (D2)	$a_h = 1080e^{0.500M}(R + 25)^{-1.320}$

Donovan 3 (D3)	$\ln(a_h) = 6.98 + 0.50M - 1.25 \ln(R + 25)$
McGuire (MG)	$a_h = 472.3e^{0.640M}(R + 25)^{-1.301}$
Gómez, Ordaz y Tena (GOT1)	$\ln(a_h) = 2.308 + 0.780M - 0.844 \ln(R) - 0.004R$
Gómez, Ordaz y Tena (GOT2)	$\ln(a_h) = 1.237 + 1.519M - 0.0313M^2 - 0.844 \ln(R) - 0.004R$
Ordaz, Jara y Singh (OJS)	$\log_{10}(a_h) = 1.760 + 0.30M - \log_{10}(R) - 0.00310R$
Singh (Si)	$\log_{10}(a_h) = -0.148 + 0.623M - \log_{10}(R) - 0.00320R$
Grases 1 (G1)	$\ln(a_h) = 3.75 + 0.470M - \log_{10}(R) - 0.00320R$
Grases 2 (G2)	$\ln(a_h) = 3.75 + 0.470M - 0.570[\ln(R + 10) + 0.670]$
Aguiar 1 (Ag.1)	$\ln(a_h) = 6.35 + 0.99M - 1.76 \ln(R + 40) - 0.6$
Aguiar 2 (Ag.2)	$\ln(a_h) = 6.35 + 0.99M - 1.76 \ln(R + 40) + 0.6$
Sarangoni (Sa)	$\ln(a_h) = 8.54 + 0.570M - 1.73 \ln(R + 60)$

Donde: a_h es la aceleración horizontal máxima (cm/s² o Gal), M es la magnitud del sismo y R es la distancia epicentral en km. Las ecuaciones se conservan según la notación del artículo fuente [29].

5.2 Insumo para la determinación de las leyes

La Figura 4 reúne las curvas históricas aceleración-distancia de los eventos que sirvieron como base de la primera etapa del desarrollo. En cada panel se observa la distribución de aceleraciones registradas en función de la distancia epicentral, lo que permite apreciar cómo cambia la aceleración en los diferentes casos y constituye el insumo para arrancar el método FGET, VRR y NFF.

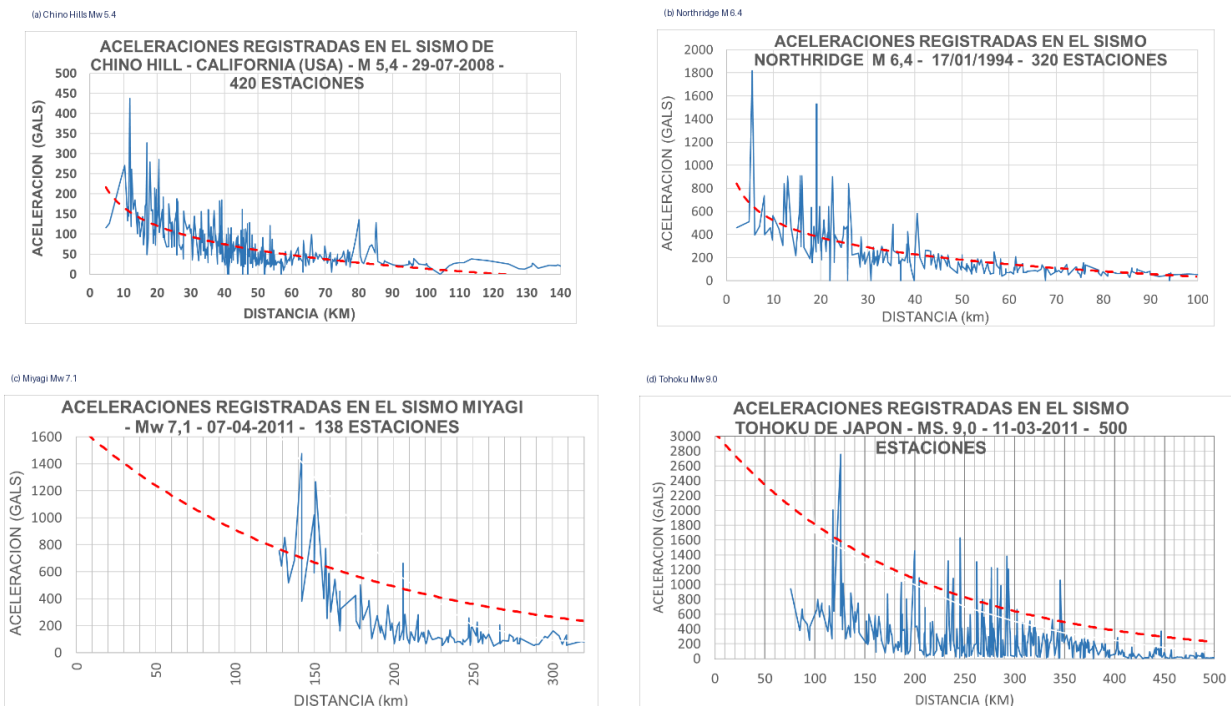


Figura 4. Datos históricos de los sismos base utilizados en el desarrollo del método: Chino Hills (Mw 5.4), Northridge (Mw 6.4), Miyagi (Mw 7.1) y Tohoku (Mw 9.0).

5.3 Importante error relativo

La Figura 5 muestra el error que presenta un valor calculado por las fórmulas de leyes de atenuación históricas frente al comportamiento real observado para un sismo fuerte de referencia, aportando evidencia sobre la necesidad de actualización de las relaciones de atenuación. Como se puede observar, la mayoría de las leyes de atenuación probadas presentan errores relativos superiores al 80 % con respecto a las aceleraciones reales del sismo. Las leyes que descienden por debajo de ese nivel de error para el sismo Mw 7.1 son Gómez/Ordaz/Tena 2 (GOT2), Grases 2 y Aguiar 2 en parte del rango analizado.

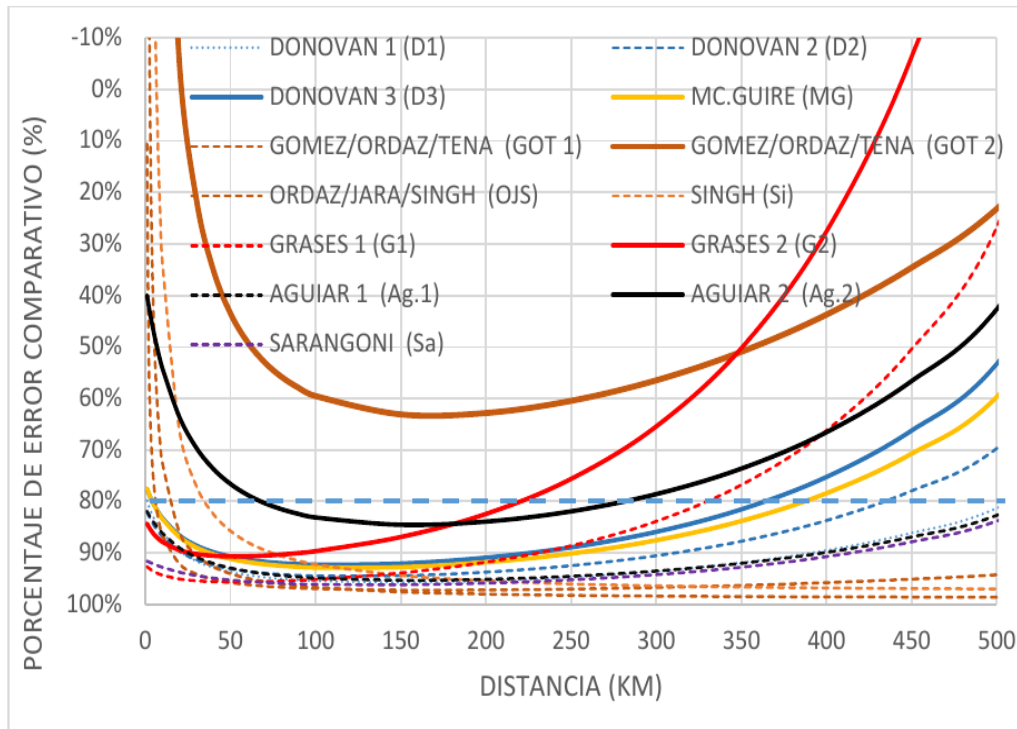


Figura 5. Error relativo de las formulaciones evaluadas para el caso del sismo de Miyagi (Mw 7.1).

5.4 Eficiencia en el cálculo de las leyes históricas

La Figura 6 muestra la diferencia que existe entre los valores máximos reales de un sismo Mw 7.1 frente a las aceleraciones calculadas con las leyes históricas, lo que acentuaba en ese momento la necesidad de actualizarlas.

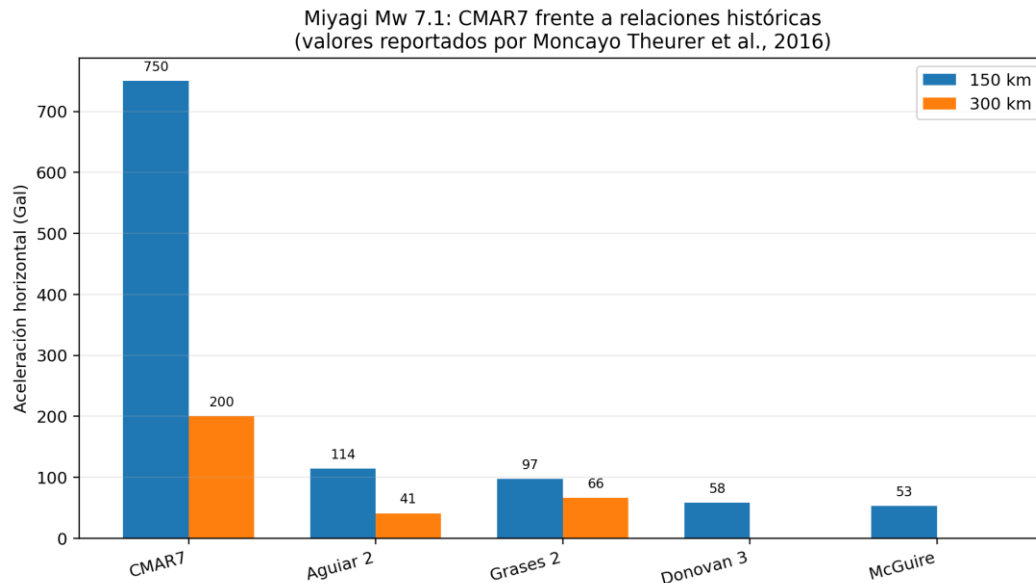


Figura 6. Comparación de la CMAR7 de Miyagi frente a las aceleraciones predichas por las leyes históricas a 150 km y 300 km.

6. Construcción de las leyes de primera generación

A partir de las curvas empíricas construidas por clases de magnitud, Moncayo Theurer observó que una forma exponencial permitiría representar de manera compacta el comportamiento de aceleración con distancia.

En la primera generación se adoptó una tasa espacial fija y se hizo depender el nivel de aceleración principalmente de la magnitud. El resultado puede escribirse en una forma general:

$$a_{1G} = A \cdot e^{BM} \cdot e^{-0.005D}$$

Donde:

a_{1G} = aceleración predicha por una ley de primera generación, en Gal;

A = coeficiente de escala de la ley;

B = coeficiente de sensibilidad a la magnitud; M = magnitud sísmica;

D = distancia epicentral en km;

Una GMPE expresada en logaritmos puede transformarse algebraicamente en una forma exponencial de la variable predicha.

La particularidad de las leyes de Moncayo Theurer está en su parametrización específica, en el modo de obtenerla a partir de las curvas reales y en la genealogía metodológica que conduce a sus coeficientes.

Tabla 2. Leyes de atenuación de primera generación de Moncayo Theurer.

Ley	Expresión	A	B	Rasgo
Curva Original (CO)	$a_{CO} = 36 \cdot e^{0.52M} \cdot e^{-0.005D}$	36	0.52	Formulación base de primera generación.
Variante 1 (V1)	$a_{V1} = 12 \cdot e^{0.65M} \cdot e^{-0.005D}$	12	0.65	Mayor sensibilidad exponencial a M.
Variante 2 (V2)	$a_{V2} = 60 \cdot e^{0.45M} \cdot e^{-0.005D}$	60	0.45	Mayor escala A y menor exponente de M.
Original Rebajada	$a_{Reb} = 18 \cdot e^{0.52M} \cdot e^{-0.005D}$	18	0.52	Reducción del 50 % del factor A respecto de CO.

6.1 Curva Original

$$a_{CO} = 36 \cdot e^{0.52M} \cdot e^{-0.005D}$$

Donde:

a_{CO} = aceleración de la Curva Original en Gal;

M = magnitud;

D = distancia epicentral en km.

Esta expresión conserva una tasa de atenuación espacial constante -0.005 km^{-1} para todas las magnitudes y aumenta exponencialmente con M.

6.2 Variante 1

$$a_{V1} = 12 \cdot e^{0.65M} \cdot e^{-0.005D}$$

Donde:

a_{V1} = aceleración de la Variante 1 en Gal;

M = magnitud;

D = distancia epicentral en km.

Respecto de C0, V1 disminuye el factor de escala y aumenta la sensibilidad de la amplitud a M.

6.3 Variante 2

$$a_{V2} = 60 \cdot e^{0.45M} \cdot e^{-0.005D}$$

Donde:

a_{V2} = aceleración de la Variante 2 en Gal;

M = magnitud;

D = distancia epicentral en km.

V2 aumenta el factor de escala y reduce la sensibilidad exponencial directa a la magnitud.

6.4 Original Rebajada

$$a_{\text{Reb}} = 18 \cdot e^{0.52M} \cdot e^{-0.005D}$$

Donde:

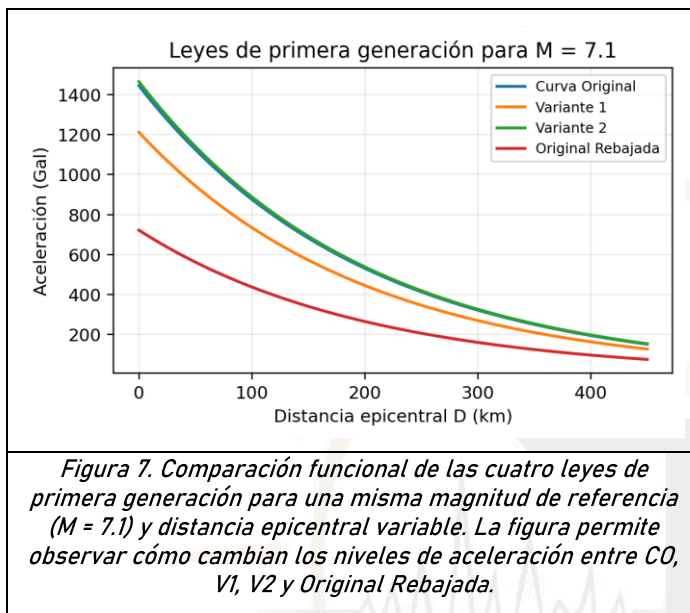
a_{Reb} = aceleración de la Original Rebajada en Gal;

M = magnitud;

D = distancia epicentral en km.

La Curva Original Rebajada conserva la misma dependencia entre magnitud y distancia de la Curva Original. Fue planteada para diseñadores que quieren reducir la severidad matemática de las fórmulas de atenuación.

7. Validación posterior de las leyes: síntesis de la tesis de Ramón Casquete y Zamora (2023)



La familia de leyes de Moncayo Theurer fue sometida posteriormente a una validación académica independiente en el trabajo de titulación “Eficiencia de las leyes de atenuación frente a sismos reales”, desarrollado en la Universidad de Guayaquil por Adriana Lissette Ramón Casquete e Ingrid Zamora en 2023 [31].

El estudio amplió de forma importante el dominio de contraste: seleccionó 50 sismos de control, distribuidos en diferentes rangos de magnitud y con un mínimo de aproximadamente 20 registros por evento, y evaluó 18 formulaciones: 13 leyes históricas y las cinco ecuaciones de la familia Moncayo Theurer.

La tesis comparó las predicciones con aceleraciones registradas y con la CMAR de cada evento, y utilizó porcentajes de error y una matriz de decisión para ordenar el desempeño.

El resultado general fue favorable a la validez operativa de las formulaciones de Moncayo Theurer.

La tesis mostró que no existe una única formulación dominante en todo el rango de magnitudes. Para eventos entre M_w 4 y 6, la Ley de Segunda

Generación y GOT2 alcanzaron un empate técnico en el primer lugar de la evaluación global.

Para magnitudes a partir de Mw 7, GOT2 y la Variante 1 presentaron el mejor desempeño agregado según la matriz de decisión.

La Ley de atenuación de Segunda Generación mostró buena eficiencia en sismos grandes: por ejemplo, en Pedernales Mw 7.8 y Chile Mw 8.8 presentó errores respecto de PGA del orden de 3 % y 8 %, respectivamente [31].

La Curva Original es una formulación simple y efectiva que reproduce bien la demanda elevada próxima al epicentro y constituye la base matemática de la primera generación.

La Ley de Segunda Generación conserva esa filosofía, pero corrige una limitación estructural de las primeras ecuaciones: la utilización de una tasa de atenuación espacial fija.

Cinco casos estudiados en detalle ilustran esa conclusión: en California Mw 4.7 la Segunda Generación alcanzó aproximadamente 2 % de error respecto de PGA; en Alaska Mw 6.1 obtuvo alrededor de 22 % frente a 29 % de GOT2; en Pedernales, Ecuador, Mw 7.8 la Segunda Generación se aproximó al PGA con un error cercano al 3 %, mientras GOT2 mostró buen desempeño respecto de CMAR; y en Chile Mw 8.8 la Variante 2 presentó aproximadamente 7 % de error respecto de CMAR y la Segunda Generación alrededor de 8 % respecto de PGA [31].

El valor principal de esa tesis es que proporciona evidencia independiente posterior al desarrollo de las cuatro leyes de primera generación. La validación respalda que la familia propuesta posee capacidad predictiva competitiva frente a sismos reales y que, en determinados rangos, la Variante 1 y la Variante 2 alcanzan resultados favorables frente a formulaciones históricas.

8. Conclusiones

1. THEK-RRAM de primera generación se desarrolló a partir de registros instrumentales reales de cuatro niveles de magnitud, representados por Chino Hills Mw 5.4, Northridge Mw 6.4, Miyagi Mw 7.1 y Tohoku Mw 9.0.
2. La CMAR constituye la envolvente de las máximas aceleraciones registradas para cada evento y funciona como referencia empírica superior del desarrollo; no corresponde a una curva promedio.
3. La secuencia actualmente formalizada como FGET-VRR-NFF permite describir el paso desde la observación de patrones aceleración-distancia hasta una estructura explícita de primera generación, sin exigir la publicación de todo el know-how operativo empleado en las iteraciones internas.
4. La tesis de Ramón Casquete y Zamora (2023), basada en 50 sismos de control, aporta una validación posterior independiente y muestra que las formulaciones de Moncayo Theurer permanecen competitivas en distintos rangos de magnitud, con resultados particularmente favorables para Variante 1, Variante 2 y, en el estudio completo, la Segunda Generación.

Nota para aplicación del método

Para información sobre la reproducción completa, los criterios internos y la implementación, escribir al correo research@hithek.com.

Referencias

- [1] Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, 58(5), 1583–1606.
- [2] McGuire, R. K. (1974). Seismic structural response risk analysis, incorporating peak response regressions on earthquake magnitude and distance. MIT Research Report R74-51.
- [3] McGuire, R. K. (2004). Seismic Hazard and Risk Analysis. Earthquake Engineering Research Institute, MNO-10.
- [4] Bozorgnia, Y., Abrahamson, N. A., Al Atik, L., Ancheta, T. D., Atkinson, G. M., Baker, J. W., et al. (2014). NGA-West2 Research Project. Earthquake Spectra, 30(3), 973–987. <https://doi.org/10.1193/072113EQS209M>

- [5] Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057–1085. <https://doi.org/10.1193/070113EQS184M>
- [6] Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2014). NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1087–1115. <https://doi.org/10.1193/062913EQS175M>
- [7] Abrahamson, N. A., Silva, W. J., & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1025–1055. <https://doi.org/10.1193/070913EQS198M>
- [8] Chiou, B. S.-J., & Youngs, R. R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1117–1153. <https://doi.org/10.1193/072813EQS219M>
- [9] Idriss, I. M. (2014). An NGA-West2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1155–1177. <https://doi.org/10.1193/070613EQS195M>
- [10] Abrahamson, N. A., & Youngs, R. R. (1992). A stable algorithm for regression analyses using the random effects model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(1), 505–510. <https://doi.org/10.1785/BSSA0820010505>
- [11] Al Atik, L., Abrahamson, N. A., Bommer, J. J., Scherbaum, F., Cotton, F., & Kuehn, N. M. (2010). The variability of ground-motion prediction models and its components. *Seismological Research Letters*, 81(5), 794–801. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.5.794>
- [12] Strasser, F. O., Abrahamson, N. A., & Bommer, J. J. (2009). Sigma: Issues, insights, and challenges. *Seismological Research Letters*, 80(1), 40–56. <https://doi.org/10.1785/GSSRL.80.1.40>
- [13] Tavakoli, B., & Pezeshk, S. (2007). A new approach to estimate a mixed model-based ground motion prediction equation. *Earthquake Spectra*, 23(3), 665–684. <https://doi.org/10.1193/1.2755934>
- [14] Schmidt, M., & Lipson, H. (2009). Distilling free-form natural laws from experimental data. *Science*, 324(5923), 81–85. <https://doi.org/10.1126/science.1165893>
- [15] Brunton, S. L., Proctor, J. L., & Kutz, J. N. (2016). Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(15), 3932–3937. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517384113>
- [16] Udrescu, S.-M., & Tegmark, M. (2020). AI Feynman: A physics-inspired method for symbolic regression. *Science Advances*, 6(16), eaay2631. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay2631>

- [17] Chen, S., Liu, X., Fu, L., Wang, S., Zhang, B., & Li, X. (2024). Physics symbolic learner for discovering ground-motion models via NGA-West2 database. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 53(1), 138–151. <https://doi.org/10.1002/eqe.4013>
- [18] Liu, X., Chen, S., Li, X., Fu, L., & Cotton, F. (2025). A hybrid symbolic learning approach for Ground-Motion model Development. *Journal of Asian Earth Sciences*, 281, 106498. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2025.106498>
- [19] Tibshirani, R. (1996). Regression shrinkage and selection via the Lasso. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 58(1), 267–288.
- [20] Guyon, I., & Elisseeff, A. (2003). An introduction to variable and feature selection. *Journal of Machine Learning Research*, 3, 1157–1182.
- [21] Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723.
- [22] Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics*, 6(2), 461–464.
- [23] Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference*. Springer.
- [24] Koza, J. R. (1992). *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press.
- [25] Moncayo Theurer, M. (2026). Formula Genomics and Evolution Theory (FGET) — Teoría Genómica y Evolutiva de las Fórmulas. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20780971>
- [26] Moncayo Theurer, M. (2026). Nested Formula Framework (NFF): A Hierarchical Framework for Mathematical Discovery Through Recursive Coefficient Nesting. Zenodo, version 2. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20781769>
- [27] Moncayo Theurer, M. (2026). THEK-SPOT — Structural Period Estimation Technique: Compact Natural-Period Formula for Regular Reinforced-Concrete Frames Derived through THEK-VRR, NFF and FGET. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.21896398>
- [28] 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>
- [29] Moncayo Theurer, M., Velasco, G., Rodríguez, J., & Terán, A. (2016). Análisis comparativo entre 13 leyes de atenuación y los registros de un evento de 7.1 en magnitud Richter ocurrido el 7 de abril de 2011, en las costas de Miyagi, Japón. *Ingeniería—Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 20(3), 137–146.
- [30] Moncayo Theurer, M. (2022). Nuevas leyes de atenuación ajustadas a registros actuales y reales. Documento técnico suministrado por el autor; antecedente directo de THEK-RRAM.

- [31] Ramón Casquete, A. L., & Zamora, I. (2023). Eficiencia de las leyes de atenuación frente a sismos reales. Trabajo de titulación, Universidad de Guayaquil.
- [32] Moncayo Theurer, M. (2026). Seismic Energy Release Risk Assessment (SERRA) — A Physical Energy-Based Framework for Seismic Behavior Characterization, Reactivation Stage Identification, and Seismic Risk Mapping. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20576713>
- [33] Moncayo Theurer, M. (2026). Empirical Validation of the Seismic Energy Release Risk Assessment (SERRA/MEL). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20588267>
- [34] Moncayo Theurer, M. (s.f.). Evaluación de 13 leyes de atenuación con registros de sismos de magnitud igual o menor a 6. Manuscrito técnico no publicado suministrado por el autor.
- [35] Moncayo Theurer, M., Mera Ortiz, W., et al. (s.f.). Comparación de leyes de atenuación con registros sísmicos del Gran Terremoto del Pacífico Oriental del 11 de marzo de 2011, Mw 9.0 en Japón. Manuscrito técnico no publicado suministrado por el autor.
- [36] Moncayo Theurer, M., Velasco, G., Mora, C., Montenegro, M., & Córdova, J. (2017). Terremotos mayores a 6.5 en escala Richter ocurridos en Ecuador desde 1900 hasta 1970. *Ingeniería—Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 21(2).
- [37] 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.
- [38] Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan, E., Silva, W. J., Chiou, B. S.-J., et al. (2014). NGA-West2 database. *Earthquake Spectra*, 30(3), 989–1005. <https://doi.org/10.1193/070913EQS197M>
- [39] Seyhan, E., Stewart, J. P., Ancheta, T. D., Darragh, R. B., & Graves, R. W. (2014). NGA-West2 Site Database. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1007–1024. <https://doi.org/10.1193/062913EQS180M>
- [40] Stewart, J. P., Douglas, J., Javanbarg, M., Bozorgnia, Y., Abrahamson, N. A., Boore, D. M., Campbell, K. W., Delavaud, E., Erdik, M., & Stafford, P. J. (2015). Selection of Ground Motion Prediction Equations for the Global Earthquake Model. *Earthquake Spectra*. <https://doi.org/10.1193/013013EQS017M>
- [41] Cotton, F., Scherbaum, F., Bommer, J. J., & Bungum, H. (2006). Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions. *Journal of Seismology*, 10, 137–156. <https://doi.org/10.1007/s10950-005-9006-7>
- [42] Kaklamanos, J., & Baise, L. G. (2011). Model validations and comparisons of the Next Generation Attenuation of Ground Motions (NGA-West) Project. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(1), 160–175. <https://doi.org/10.1785/0120100038>

- [43] Parker, G. A., Stewart, J. P., Boore, D. M., Atkinson, G. M., & Hassani, B. (2022). NGA-Subduction Global Ground Motion Models with Regional Adjustment Factors. *Earthquake Spectra*, 38(1), 456–493. <https://doi.org/10.1177/87552930211034889>
- [44] Gregor, N., Abrahamson, N. A., Atkinson, G. M., et al. (2014). Comparison of NGA-West2 GMPEs. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1179–1197. <https://doi.org/10.1193/070113EQS186M>
- [45] Paredes Estacio, J. L., & De Risi, R. (2025). Historical evolution of the input parameters of ergodic and non-ergodic ground motion models (GMMs): A review. *Earth-Science Reviews*, 266, 105074. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105074>

