RESPUESTA DE SITIO EN DEPÓSITOS DE FLUJO DE LODOS SOBRE SAPROLITO DEL BATOLITO ANTIOQUEÑO

SITE RESPONSE OF MUDFLOW DEPOSITS OVER SAPROLITE OF THE ANTIOQUIA BATHOLITH

Oscar Darío Moreno Borja

Gerente de Proyectos, DIADICA Proyectos e Ingeniería S.A.S., Medellín, Colombia

oscar@diadicaing.com

Resumen

Se estudia la respuesta de un flujo de lodos sobre saprolito del Batolito Antioqueño (Guarne, perfil E por $\bar{N}$) con 480 análisis no lineales por elementos finitos: 20 perfiles estocásticos, 4 registros escalados a roca C, dos componentes y tres intensidades. Entre 0,5 y 1 s, banda de pórticos de 5 a 10 pisos, la amplificación mediana alcanza el cociente normativo S_E/S_C y el 64 % de las realizaciones lo supera (IC95 51–75 %). De cinco sustitutos de IA, el de árboles que parte de la solución lineal de la ecuación de onda redujo el error al cambiar la intensidad; en perfiles no vistos la física no cambió el error de forma distinguible. En una prueba añadida después, solo la red que recibió el límite de baja deformación en la pérdida lo reprodujo. La entrada no es una familia normativa y los resultados son paramétricos.

Palabras clave: *respuesta de sitio no lineal, flujo de lodos, elementos finitos, sustitutos de IA, ecuación de onda, NSR-10, Batolito Antioqueño, interacción suelo-estructura.*

Abstract

The response of a mudflow deposit over saprolite of the Antioquia Batholith (Guarne, Colombia; site class E by $\bar{N}$) is studied with 480 nonlinear finite element analyses: twenty stochastic profiles, four recorded motions scaled to class C rock, two components and three intensities. Between 0.5 and 1 s, the range of 5 to 10 story frames, the median amplification reaches the code ratio S_E/S_C and 64 % of the realizations exceed it (95 % CI 51–75 %). Of five AI surrogates, the tree model built on the linear wave-equation solution reduced the error when the intensity changed; on unseen profiles the physics did not change the error distinguishably. In a test added afterwards, only the network that received the small-strain limit in its loss reproduced it. The input motions are not a code-compliant suite and the results are parametric.

Keywords: *nonlinear site response, mudflow, finite elements, AI surrogates, wave equation, NSR-10, Antioquia Batholith, soil-structure interaction.*

1. INTRODUCCIÓN

Sobre el Batolito Antioqueño, cuerpo de tonalita y granodiorita, los perfiles cambian mucho de un sitio a otro: hay roca meteorizada y saprolito someros, suelos residuales de espesor variable y depósitos de vertiente. Según el espesor y el grado de meteorización, la clasificación de A.2.4 de la NSR-10 (AIS, 2010) da desde perfiles C hasta E, de modo que la unidad geológica no tiene un tipo de perfil propio. Este trabajo estudia uno de esos escenarios: un flujo de lodos de matriz fina sobre saprolito limo-arenoso, con la roca a 30 m. En el Valle de Aburrá y el oriente cercano estos depósitos se caracterizan casi siempre con SPT, sin velocidad de onda medida, y en el caso de referencia el criterio de $\bar{N}$ los clasifica como perfil E. Los coeficientes F_a y F_v de la norma resumen en dos números, que dependen solo del tipo de perfil y del nivel de amenaza, una respuesta que en estos depósitos es no lineal y depende del espesor del flujo, del contraste con el saprolito y de la intensidad de la entrada (Kramer, 1996). El espectro que resulta es plano hasta T_C y no reconoce que el depósito tiene un periodo propio.

El análisis no lineal de respuesta de sitio resuelve ese problema caso por caso, pero su costo limita el número de perfiles que se pueden analizar, y con pocos perfiles no se pueden reportar percentiles con su intervalo. Los modelos sustitutos entrenados con una campaña de análisis permiten extender los resultados a perfiles nuevos en fracciones de segundo. La física del problema puede entrar en esos modelos de tres formas (Karniadakis et al., 2021): en los datos, en la estructura del modelo o en la función de pérdida, como en las redes informadas por la física de Raissi et al. (2019). Cuál de las tres aporta en un problema de ingeniería concreto es una pregunta empírica; este trabajo la examina con 15 perfiles de entrenamiento.

Este trabajo tiene tres objetivos. El primero es cuantificar la respuesta del depósito con 480 análisis no lineales por elementos finitos sobre una población de perfiles que representa la incertidumbre del sitio, y compararla con el cociente que la norma asigna entre el espectro del perfil E y el de la roca de base. El segundo es medir, con un protocolo de prueba fijado en el código antes de correr la campaña de 480 casos (numeral 3.6), si un sustituto con la ecuación de onda en su estructura o en su pérdida predice la amplificación mejor que uno puramente estadístico. El tercero es traducir los resultados a criterios que un ingeniero pueda aplicar con la NSR-10, incluida la interacción suelo-estructura de un pórtico de referencia.

2. SITIO Y PARÁMETROS NORMATIVOS

El caso de referencia se ubica en Guarne (código 05318 del Apéndice A-4), de amenaza intermedia con $A_a = 0{,}15$ y $A_v = 0{,}20$. Con los SPT de un estudio geotécnico de práctica en Bello, inédito, sobre depósitos de vertiente finos de la misma unidad (cuatro sondeos y 53 ensayos; $\bar{N}$ de 8,8, 9,8, 11,2 y 11,6), el perfil es tipo E por A.2.4.5.3, con $F_a = 2{,}1$ y $F_v = 3{,}2$. La roca meteorizada de base no tiene velocidad medida y se asimila a perfil C, como dispone A.2.4.5.4 para roca muy meteorizada sin V_s medida ($F_a = 1{,}2$, $F_v = 1{,}6$), con $V_{s,r} = 700$ m/s y $\rho_r = 2{,}3$ t/m³ supuestas y la base del modelo a 30 m. La clase E es la del escenario estudiado con la información de SPT y no la del Batolito; con el V_{s30} que da la correlación de la ecuación (2), los perfiles de la propia población quedarían entre D y E (numeral 5.1). Se adopta como hipótesis, sin verificación en el sitio, que el depósito es estable y sin efectos de ladera: los coeficientes F_a y F_v no tienen en cuenta esos efectos (A.2.4.5.7), y A.2.4.1.1 excluye las definiciones de perfil cuando el depósito puede no ser estable. El espectro objetivo en roca tiene meseta de 0,450 g hasta $T_C = 0{,}853$ s; el de superficie del perfil E tiene meseta de 0,788 g hasta $T_C = 0{,}975$ s. Como la columna amplifica desde roca C, la referencia normativa para la amplificación del sitio es el cociente S_E/S_C, que vale 1,75 hasta 0,853 s, crece linealmente hasta 2,0 en 0,975 s y se mantiene en 2,0 hasta 3,84 s (T_L del perfil C).

3. MÉTODO

El método tiene cinco piezas que se encadenan: una población de perfiles que representa la incertidumbre del sitio, un modelo de elementos finitos verificado contra la solución analítica, una entrada sísmica definida en roca, unos modelos sustitutos que aprenden de la campaña y un procedimiento de interacción suelo-estructura que usa sus resultados.

3.1 Perfiles estocásticos

Los perfiles tienen $H = 30$ m en $n_c = 15$ capas de 2 m: un horizonte de flujo de lodos de espesor t_f sobre saprolito, con nivel freático aleatorio. Las variables primitivas por capa son N_{60}, la relación de vacíos e y el índice de plasticidad IP, con las marginales de la Tabla 1, ajustadas a tres estudios geotécnicos de práctica en Bello, inéditos, sobre saprolito del Batolito y depósitos de vertiente; ninguno tiene V_s medida ni ensayos dinámicos. Su dependencia se genera con una cópula gaussiana: la correlación entre variables R_s (transformada de Spearman a Pearson por la corrección de Nataf; Liu y Der Kiureghian, 1986) se combina con una correlación espacial exponencial entre capas,

$$R = R_s \otimes \exp(-2|z_i - z_j|/\delta_v), \quad u = \Phi(L\xi), \quad R = L\,L^{T} \tag{1}$$

con $\delta_v = 5$ m, ξ un vector normal estándar y Φ la distribución normal; cada u se lleva a su marginal por la inversa de la distribución. El peso unitario sale de la relación de fases con G_s y el grado de saturación. Las propiedades mecánicas se derivan de N_{60} con correlaciones cuyo error se declara:

$$V_s = 97{,}0\, N_{60}^{0{,}314}\, \varepsilon_{sys}\, \varepsilon_{capa},$$
$$\ln \varepsilon_{sys} \sim N(0;\, 0{,}20^2), \quad \ln \varepsilon_{capa} \sim N(0;\, 0{,}224^2) \tag{2}$$

$$s_u = 4{,}5\, N_{60}\, \varepsilon_{su}, \quad \ln \varepsilon_{su} \sim N(0;\, 0{,}35^2) \tag{3}$$

$$\varphi' = \arctan[N_{60}/(12{,}2 + 20{,}3\, \sigma'_v/p_a)]^{0{,}34}\, \varepsilon_\varphi,$$
$$\ln \varepsilon_\varphi \sim N(0;\, 0{,}13^2) \tag{4}$$

que son las de Imai y Tonouchi (1982), Stroud (1974) y Kulhawy y Mayne (1990). El error de V_s se parte en un término sistemático por perfil y otro por capa, porque la correlación no se equivoca de forma independiente en cada capa del mismo sitio. Con cada perfil se calculan los parámetros de clasificación y el periodo elástico:

$$V_{s30} = H \,/\, \Sigma(h_i/V_{s,i}), \quad \bar{N} = H \,/\, \Sigma(h_i/N_i),$$
$$T_0 = 4H/V_{s30} \tag{5}$$

De una población de 2000 perfiles (semilla 20260924), con T_0 de mediana 0,63 s y percentiles 5 y 95 de 0,44 y 0,90 s, se tomaron 20: los tres de control de la verificación, en los percentiles 5, 50 y 95 de T_0 de la población (0,44, 0,63 y 0,90 s), y los 17 primeros de la muestra. En los 20 perfiles T_0 tiene mediana de 0,62 s y va de 0,42 a 0,90 s (0,44 a 0,76 s entre los percentiles 5 y 95 de la muestra). Los percentiles de la campaña se calculan sobre estos 20 perfiles y no sobre la población.

Tabla 1. Variables primitivas de la población de perfiles.

Variable	Flujo de lodos	Saprolito
N_{60}, lognormal	mediana 7; σ_{ln} 0,40	mediana 12; σ_{ln} 0,45
e, lognormal	mediana 1,00; σ_{ln} 0,22	mediana 0,85; σ_{ln} 0,20
IP (%), normal	21 ± 4	9 ± 4
G_s, uniforme	2,65–2,90	2,60–2,72
Correlación (N_{60}, e, IP)	ρ(N,e) = −0,50; ρ(N,IP) = −0,30; ρ(e,IP) = 0,35	
t_f (m), uniforme	5–25	
Nivel freático	70 % de los perfiles; z_w lognormal, mediana 8 m, 3–25 m	

3.2 Formulación

La columna resuelve la propagación vertical de ondas de corte,

$$\rho\, \partial^2 u/\partial t^2 = \partial \tau/\partial z, \quad \tau = G(\gamma)\cdot\gamma, \quad \gamma = \partial u/\partial z \tag{6}$$

donde $G(\gamma)$ es el módulo secante que da el modelo constitutivo en cada capa. Si G no depende de γ y el amortiguamiento es viscoso, la ecuación (6) tiene solución cerrada en frecuencia. Para el perfil estratificado, las amplitudes de las ondas ascendente A y descendente B se propagan de una capa a la siguiente con

$$A_{m+1} = \tfrac{1}{2}A_m(1 + \alpha_m)e^{ik_m h_m} + \tfrac{1}{2}B_m(1 - \alpha_m)e^{-ik_m h_m} \tag{7}$$
$$B_{m+1} = \tfrac{1}{2}A_m(1 - \alpha_m)e^{ik_m h_m} + \tfrac{1}{2}B_m(1 + \alpha_m)e^{-ik_m h_m} \tag{8}$$

con $k_m = \omega/V_{s,m}^*$, $\alpha_m = \rho_m V_{s,m}^*/(\rho_{m+1} V_{s,m+1}^*)$, $V_s^* = V_s(1 + 2i\xi)^{1/2}$ y $A_1 = B_1 = 1$ en la superficie libre (Kramer, 1996). En la solución lineal, $\xi(\omega)$ es el amortiguamiento de Rayleigh de la columna (numeral 3.3), de modo que las dos soluciones tienen el mismo amortiguamiento. La función de transferencia entre superficie y afloramiento en roca es $H(\omega) = 1/A_{n+1}$. La amplificación se mide sobre el espectro de respuesta con 5 % de amortiguamiento,

$$AF(T) = S_a[\ddot{u}_{sup}](T) \,/\, S_a[\ddot{u}_{aflor}](T),$$
$$AF_{lin}(T) = S_a[\mathcal{F}^{-1}(H\cdot\mathcal{F}\ddot{u}_{aflor})](T) \,/\, S_a[\ddot{u}_{aflor}](T) \tag{9}$$

AF_{lin} cuesta milisegundos por caso; AF no lineal cuesta en promedio 1180 s por caso en un núcleo. Esa diferencia de seis órdenes de magnitud es la que justifica un sustituto que parta de AF_{lin}.

3.3 Columna de suelo en OpenSees

Cada perfil se modela en OpenSees (McKenna et al., 2010) como una columna de elementos stdBrick de 1 × 1 m en planta, con los cuatro nodos de cada nivel ligados en las tres direcciones para reproducir corte simple. La base tiene la frontera absorbente de Lysmer y Kuhlemeyer (1969) y la

excitación es la fuerza equivalente del afloramiento,

$$F(t) = \rho_r V_{s,r} A \cdot v_{aflor}(t), \quad \rho_r V_{s,r} A = 2{,}3 \times 700 \times 1 = 1610 \text{ kN·s/m} \qquad (10)$$

con la velocidad del registro en afloramiento. El tamaño de elemento cumple $h \le V_{s,min}/200$, que da ocho elementos por longitud de onda a 25 Hz; el paso de integración es la cuarta parte del de muestreo (0,00125 s) y el amortiguamiento de Rayleigh es de 1 % en f_1 y $5f_1$, con $f_1 = \bar{V}_s/4H$, $\bar{V}_s$ la media aritmética de V_s de las capas, y el término de rigidez sobre la rigidez comprometida. El peso propio se aplica como fuerza de cuerpo, $-\rho g$ o $-(\rho - 1)g$ bajo el nivel freático, y la ventana de cada registro se extiende hasta que $|v_{fin}|/\text{PGV} \le 0{,}5$ %.

Los modelos constitutivos se asignan por horizonte con la Tabla 2. El flujo de lodos se trata en esfuerzos totales con MultiYieldSurfaceClay (Gu et al., 2009), con la cohesión elegida para que en corte simple la resistencia sea s_u; el saprolito se trata en esfuerzos efectivos con PressureDependMultiYield02 (Yang et al., 2003), sin generación de presión de poros (elemento de una fase), es decir, en condición drenada, con el módulo referido a la presión media:

$$c = s_u/\sqrt{1{,}5}, \quad G_{max} = \rho V_s^2, \quad G_r = G_{max}(p_a/p'_m)^{0,5}, \quad p'_m = \sigma'_v(1 + 2K_0)/3, \quad K_0 = \nu/(1 - \nu) \qquad (11)$$

La Figura 1 compara la curva de corte del flujo con la de Darendeli (2001) para tres capas de la población. Con $\nu = 0{,}49$, a $\gamma = 10^{-3}$, la curva del modelo va de 30 % más blanda a 2 % más rígida (mediana 9 % más blanda en 134 capas); queda más blanda donde s_u/G_{max} es menor que el γ_r de Darendeli. Con $\nu = 0{,}35$, el de la campaña de 480 casos, el desviador geostático la rigidiza en las capas profundas (Tabla 3). En la campaña el saprolito quedó con $\tau \approx 2$ sen $\varphi \cdot p'_m$, entre 12 y 22 % por encima de la referencia $\tau_f = \sigma'_v \tan\varphi'$ (percentiles 5 y 95 de las 166 capas, estimado con la tabla de calibración de la variante); su efecto se evaluó con una variante calibrada a esa referencia (numeral 4.1).

Tabla 2. Parámetros de los modelos constitutivos. La variante del numeral 4.1 usa el saprolito de la familia con el flujo de la campaña de 480 casos ($\nu = 0{,}35$).

Parámetro	Flujo (MYS-Clay)	Saprolito (PDMY02)
Análisis	esfuerzos totales	esfuerzos efectivos
Módulo de referencia	$G_{max} = \rho V_s^2$	G_r, ecuación (11)
ν	0,35 en la campaña de 480 casos; 0,49 en la familia (numeral 4.6)	0,35
Resistencia	$c = s_u/\sqrt{1{,}5}$	Campaña: φ' de la ecuación (4) como ángulo de entrada (τ entre 12 y 22 % sobre $\sigma'_v \tan\varphi'$). Familia y variante del 4.1: ángulo calibrado para $\tau(10\ \%) = \sigma'_v \tan\varphi'$
γ_{max} de la superficie exterior	0,10	0,10
Exponente de presión	—	0,5
Ángulo de transformación de fase	—	$\varphi' - 4°$
Contracción c_1, c_3	—	0,067; 0,23
Dilatancia d_1, d_3	—	0,06; 0,27
Superficies de fluencia	20 (defecto)	20

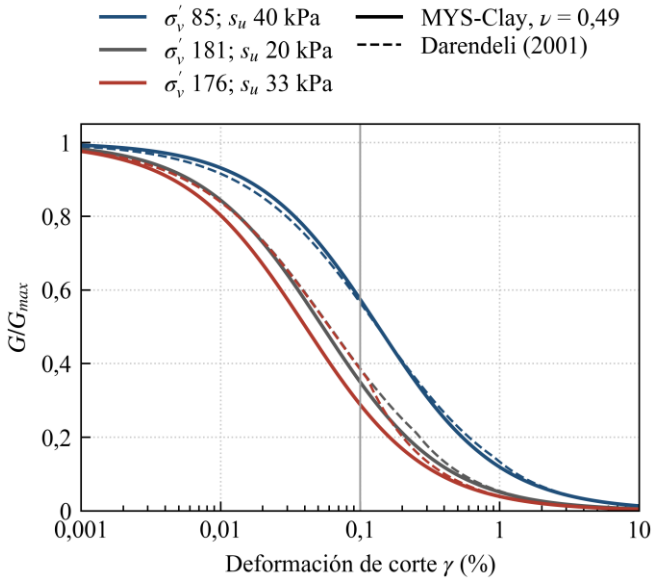


Figura 1. Degradación del módulo de corte del flujo según la curva esqueleto de MultiYieldSurfaceClay con $\nu = 0{,}49$ y

según Darendeli (2001), para las capas de percentil 5, 50 y 95 de la razón entre ambas a $\gamma = 10^{-3}$ (0,1 %, línea vertical). Con $\nu = 0{,}35$ la curva del modelo queda más rígida en las capas profundas (Tabla 3).

3.4 Verificación del modelo

La Tabla 3 resume los controles; la fila de la columna no lineal a 0,01× acota la respuesta en el límite de baja deformación. V1 comprueba que la frontera de Lysmer transmite el afloramiento sin duplicarlo; V2 compara la columna lineal con la solución de las ecuaciones (7) a (9) para el perfil estratificado. En V2 la columna se deforma en corte simple sin cambio de volumen, de modo que su respuesta lineal no depende del ν del flujo. El error de V2 en periodos menores de 0,3 s no baja al reducir el paso de tiempo (con dt/16 queda en 3,4 % en las dos bandas). Con $h = V_{s,min}/400$ baja a 1,0 % entre 0,1 y 0,3 s, pero sube a 4,3 % entre 0,05 y 0,1 s y duplica el costo. Los resultados de periodo corto llevan la cota medida con la discretización de la campaña: 2,8 % entre 0,1 y 0,3 s y 3,4 % entre 0,05 y 0,1 s.

Tabla 3. Verificación del modelo de columna 3D.

Control	Resultado
V1, semiespacio (|H|, error en S_a, PGA)	0,981–1,006; 1,2 %; 0,996
V2, T ≥ 0,3 s (ruido blanco, p50)	≤ 0,9 %
V2, 0,1–0,3 s / 0,05–0,1 s	hasta 2,8 % / 3,4 %
V2, registro CQUET ×0,1, columna lineal frente a la analítica: error máximo en 25 periodos, perfil de T_0 mediano / perfil de T_0 máximo (percentil 95 de la población) (NS y EW)	1,6 % / 2,0 % (≤ 0,6 % para T ≥ 0,3 s)
Columna no lineal a 0,01× frente a la columna lineal, $\lvert\Delta S_a\rvert/S_a$ en 25 periodos, 3 perfiles × 2 componentes de CQUET (mediana / p95 / máximo)	0,07 % / 0,9 % / 2,6 %
Flujo con $\nu = 0{,}35$ (campaña de 480 casos), curva de corte frente a Darendeli en un elemento con estado K_0	11 a 19 % más rígida entre $4\cdot10^{-4}$ y 10^{-3} con $\sigma'_v = 87{,}5$ kPa y 25 a 30 % con 262,5 kPa; con $\nu = 0{,}49$, dentro de ±8 % entre 10^{-4} y 10^{-2}
Peso propio, σ_z/σ'_v	1,000
Flujo, $\tau(10\ \%)/s_u$	0,99

3.5 Entrada sísmica

El espectro objetivo en roca es el de la NSR-10 (A.2.6) para perfil C,

$$S_a = 2{,}5\, A_a F_a I \text{ para } T \le T_C,$$
$$S_a = 1{,}2\, A_v F_v I / T \text{ para } T_C < T \le T_L,$$
$$T_C = 0{,}48\, A_v F_v / (A_a F_a) \qquad (12)$$

con $A_a = 0{,}15$, $A_v = 0{,}20$, I = 1,0 (grupo de uso I), $F_a = 1{,}2$ y $F_v = 1{,}6$; el de superficie del perfil E usa $F_a = 2{,}1$ y $F_v = 3{,}2$. Se usaron cuatro registros de la Red Nacional de Acelerógrafos del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2026): CQUET y CVIL1 del sismo de Quetame (2008) y CANSE de los sismos de Risaralda y Calima (1995). Se procesaron con corrección de línea base, ventana coseno y filtro Butterworth de fase cero entre 0,1 y 25 Hz, y cada uno se escaló con un factor único

$$\ln f = (1/n)\, \Sigma_j \ln[S_{a,obj}(T_j) / S_{a,gm}(T_j)],$$
$$n = 120, \quad 0{,}05 \le T_j \le 1{,}5 \text{ s} \qquad (13)$$

donde $S_{a,gm}$ es la media geométrica de las dos componentes horizontales. Los factores fueron 0,76 (CQUET), 3,46 (Risaralda), 4,47 (CVIL1) y 6,69 (Calima); los dos últimos superan el límite $f \le 4$ adoptado en este trabajo, y todos los resultados se reportan también sin ellos. Cada registro se aplicó a 0,5, 1,0 y 1,5 veces esa escala: 20 perfiles × 4 registros × 2 componentes × 3 niveles = 480 casos. Con ese escalamiento la entrada media no reproduce la forma del objetivo: a 1,0× su media geométrica, promediada en cada banda, queda en 1,45 veces S_C entre 0,05 y 0,2 s, 1,06 entre 0,2 y 0,5 s, 0,55 entre 0,5 y 1 s y 0,21 por encima de 1 s. Por eso la comparación con la norma se hace con AF.

Para acercar la entrada a una familia normativa se construyó además una familia de registros ajustados espectralmente a S_C, con semillas intraplaca del Centro Sismológico Nacional de Chile (Barrientos y CSN Team, 2018) y el algoritmo de ondículas de Montejo y Suarez (2013), en su implementación REQPY (versión 0.4.1). La Tabla 4 resume los criterios de selección y control y su resultado. Con 4 registros de 3 eventos la demanda se lee por el máximo, por

analogía con A.2.7.1(a); un estudio de sitio, por A.2.10.2.4(b), usaría la media (el numeral 4.6 da las dos). Como el V_{s30} de las estaciones, tomado de la base SIBER-RISK (Castro et al., 2022), no tiene origen declarado, la familia se trata como condicionada (numeral 6). La condición tiene dos partes: el origen del V_{s30}, que no se ha podido verificar, y la fuente, porque los tres eventos son intraplaca de profundidad intermedia y la fuente cortical no está representada (A.2.7.1(a) pide mecanismos similares a los de diseño). Por debajo de $T_{0,A} = 0{,}18$ s (ecuación A.2.6-6) el objetivo sigue la rama A.2.6-7. A.2.6.1.3 permite esa rama en el análisis dinámico del Capítulo A.5, para modos de la edificación distintos del fundamental. La norma no trata el objetivo de la entrada de un análisis de respuesta de sitio; usarla aquí es un criterio de este trabajo que el numeral no cubre. Con H = 30 m y V_{s30} entre 133 y 283 m/s el periodo del depósito va de 0,42 a 0,90 s, de modo que todo periodo menor que $T_{0,A}$ corresponde a modos superiores del depósito, y la estructura del caso de interacción (numeral 4.4) tiene $T_1 = 0{,}34$ s con base fija. La meseta de A.2.6-3 llevada hasta $T \to 0$ daría $S_a(0) = 0{,}45$ g, frente a la aceleración efectiva $A_aF_a = 0{,}18$ g. La rama vale solo para la entrada; la demanda de diseño en superficie conserva la meseta.

Tabla 4. Familia de registros ajustados espectralmente: criterios y resultado.

Criterio	Resultado
Semillas leídas / elegibles por forma (media de $f \cdot S_{a,gm}/S_{obj}$ entre 0,5 y 2 en tres ramas)	173 / 33
Tolerancia del ajuste: 0,9–1,3 S_{obj} en 0,05–1,5 s, media ≥ 1 (S_{obj} con la rama A.2.6-7 bajo $T_{0,A} = 0{,}18$ s)	48 componentes intentadas, todas cumplen
D5-95 dentro de ±25 %; t_5, t_{50}, t_{95} de Husid ≤ 25 % de D5-95	10 semillas cumplen
$\lvert v_{fin}\rvert$/PGV ≤ 1 % (control de la familia; la campaña usa 0,5 %, numeral 3.3)	0 % después del cierre; pulso ≤ $9 \cdot 10^{-4}$ PGA
Señal/ruido ≥ 3 en 0,05–1,5 s	10 de 10 (mínimo 31)
Sitio: roca o $V_{s30} \geq 500$ m/s	5 de 9 estaciones elegibles (560–1000 m/s; 560–822 m/s en las de la familia; origen no declarado)
Familia: 2 por evento, menor σ de forma	T19A-2020, A23F-2024, T19A-2024, A12P-2026
Aceptación de familia (A.2.7.1 (c)) para T entre 0,42 y 0,94 s, el rango de periodos del depósito en lugar del periodo de la estructura que fija el literal: media ≥ S_{obj} en 0,2T–1,5T (0,084–1,41 s), con la rama A.2.6-7 por debajo de $T_{0,A}$ (A.2.6.1.3); cada registro ≥ 0,8 S_{obj} en 0,8T–1,2T (0,34–1,13 s); componentes combinadas por media geométrica (la SRSS del literal (d) rige el análisis 3D de la estructura)	$f_{fam} = 1{,}0176$; media 1,0000 en los periodos del ajuste y 0,981 en 400 periodos (0,66 s), por lo que (i) no se cumple en malla fina; mínimo individual 0,916 en los periodos del ajuste y 0,898 en 400 periodos, de modo que (ii) se cumple en las dos mallas. Contra la meseta de A.2.6-3 la media baja a 0,68 en 0,084 s y llega a 0,98 desde T = 0,85 s

3.6 Modelos sustitutos

Los sustitutos predicen ln AF en $n_T = 25$ periodos entre 0,05 y 3 s a partir de los 13 descriptores de la Tabla 5, que salen del perfil y del registro sin correr el modelo no lineal. Se compararon cinco modelos que ubican la física de la ecuación de onda en lugares distintos (Tabla 6), siguiendo la distinción de Karniadakis et al. (2021) entre física en los datos, en la estructura del modelo y en la función de pérdida.

Tabla 5. Descriptores de entrada de los sustitutos.

Grupo	Descriptores
Perfil	V_{s30}, T_0, $\bar{N}$, t_f, z_w, $V_{s,min}$, V_s media del flujo, V_s media del saprolito, contraste de impedancia en la base, s_u media del flujo
Intensidad (en logaritmo)	PGA, PGV y $S_a(T_0)$ del afloramiento
Base física (solo modelos con base)	$\ln AF_{lin}(T_j)$, j = 1…25, de la ecuación (9)

La red densa tiene dos capas ocultas de 64 neuronas con activación tanh. Con z la entrada normalizada,

$$g_\theta(z) = W_3 \tanh(W_2 \tanh(W_1 z + b_1) + b_2) + b_3, \quad z = [(x - \mu)/\sigma \,;\, \ln AF_{lin}] \tag{14}$$

donde $\ln AF_{lin}$ entra solo en los modelos con base (38 entradas; 13 en NN). La física en la estructura consiste en que el modelo no aprende AF desde

cero sino la corrección no lineal sobre la solución de la ecuación de onda:

$$\ln A\hat{F}(x) = \ln AF_{\text{lin}}(x) + g_\theta(z) \tag{15}$$

XGBoost-res usa la misma idea con árboles: $\ln \hat{AF} = \ln AF_{\text{lin}} + \Sigma_k f_k([x, \ln AF_{\text{lin}}])$, con 400 árboles de profundidad 4, tasa 0,05 y submuestreo de 0,8 (Chen y Guestrin, 2016). NN-física agrega la física en la pérdida:

$$\mathscr{L} = \mathscr{L}_{\text{datos}} + \lambda_1 \mathscr{L}_{\text{lin}} + \lambda_2 \mathscr{L}_{\text{abl}} + \lambda_w \|\theta\|^2 \tag{16}$$

$$\mathscr{L}_{\text{datos}} = (1/N\, n_T)\, \Sigma_i\, \Sigma_j\, [\ln A\hat{F}_{ij} - \ln AF_{ij}]^2 \tag{17}$$

$$\mathscr{L}_{\text{lin}} = (1/N\, n_T)\, \Sigma_i\, \Sigma_j\, [\ln A\hat{F}_j(x_i^{(0,02)}) - \ln AF_{\text{lin},ij}]^2 \tag{18}$$

$$\mathscr{L}_{\text{abl}} = (1/N\, n_c)\, \Sigma_i\, \Sigma_{T_j \le 0,2\ \text{s}}\, [\max(0, \partial \ln A\hat{F}_{ij}/\partial \ln I)]^2 \tag{19}$$

En la ecuación (18), $x^{(0,02)}$ es el mismo vector con las tres medidas de intensidad multiplicadas por 0,02: al bajar la intensidad la predicción debe tender a la solución lineal, que es el límite de baja deformación de la ecuación (6). En la ecuación (19), $\partial/\partial \ln$ I es la derivada direccional que mueve a la vez ln PGA, ln PGV y $\ln S_a(T_0)$, calculada por diferenciación automática, y $n_c = 9$ son los periodos hasta 0,2 s: en periodos cortos el ablandamiento solo puede reducir la amplificación, así que se penaliza la parte positiva de la derivada. Se usó $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ y $\lambda_w = 10^{-4}$, con el optimizador Adam (Kingma y Ba, 2015; tasa $3 \cdot 10^{-3}$, $\beta_1 = 0,9$, $\beta_2 = 0,999$) durante 3000 épocas con el conjunto completo. NN y NN-base se entrenan con el mismo λ_w, las mismas épocas y el mismo optimizador, y solo con $\mathscr{L}_{\text{datos}}$.

Tabla 6. Modelos sustitutos comparados.

Modelo	Física en la estructura	Física en la pérdida	Algoritmo
XGBoost	no	no	árboles
XGBoost-res	sí, ec. (15)	no	árboles
NN	no	no	red densa
NN-base	sí, ec. (15)	no	red densa
NN-física	sí, ec. (15)	sí, ec. (16)–(19)	red densa

El protocolo de prueba (particiones por perfil y pruebas en intensidad) quedó fijado en el código el 25 de septiembre, según la fecha de los archivos, después de una campaña preliminar y antes de correr la de 480 casos. Las curvas de aprendizaje (3, 6, 10 y 15 perfiles de entrenamiento, 5 de prueba, una semilla por partición) usan un protocolo adoptado ese mismo día y distinto del registrado al planear la campaña (4, 8, 16 y 32 perfiles con 8 de prueba). Se usan cinco particiones por perfil, con 15 perfiles de entrenamiento y 5 de prueba en cada una, y cuatro pruebas (Tabla 9, numeral 4.3). Para cada modelo M y partición s se calcula el error y, para cada par de modelos, la diferencia pareada con su intervalo:

$$\text{RMSE}_{s,M} = [(1/N_s n_T)\, \Sigma_i\, \Sigma_j\, (\ln A\hat{F}_{ij} - \ln AF_{ij})^2]^{1/2},$$
$$\Delta_s = \text{RMSE}_{s,A} - \text{RMSE}_{s,B} \tag{20}$$

$$\text{IC95} = \bar{\Delta} \pm t_{0,975;\,4}\, s_\Delta/\sqrt{5}, \quad t_{0,975;\,4} = 2,776 \tag{21}$$

El criterio es que la física en la pérdida aporta si el IC95 de NN-física − NN-base queda por debajo de cero en las dos extrapolaciones; la estructura aporta si lo hace NN-base − NN o XGBoost-res − XGBoost. Como los conjuntos de entrenamiento se solapan, el intervalo de la ecuación (21) es optimista (Nadeau y Bengio, 2003); por eso solo se leen como resultados las diferencias del mismo signo en las cinco particiones. Las particiones son permutaciones independientes: los perfiles 10, 14, 16 y 1941 no quedan en prueba en ninguna, y 1941 es el de T_0 más largo (0,90 s). Los cuatro registros están en entrenamiento y en prueba, así que la generalización a un registro nuevo no se evaluó.

3.7 Interacción suelo-estructura

Se usa un pórtico de concreto de tres pisos (h = 9 m, masa m = 450 t, $T_{\text{fijo}} = 0,047 \cdot h^{0,9} = 0,34$ s por A.4.2) sobre losa superficial rígida de 2B × 2L = 10 × 15 m, sacudida en la dirección corta. La interacción se resuelve por subestructuras. Las rigideces estáticas de traslación y cabeceo son las de Gazetas (1991),

$$K_x = [2GL/(2-\nu)](2 + 2,5\chi^{0,85}), \quad \chi = A_b/(4L^2) \tag{22}$$

$$K_\theta = [G/(1-\nu)]\, I_b^{0,75}(L/B)^{0,25}(2,4 + 0,5B/L) \tag{23}$$

con el módulo promediado hasta 2B = 10 m bajo la losa y degradado con la deformación que da cada análisis de OpenSees,

$$G/G_{max} = 1/(1 + \gamma_{ef}/\gamma_r),$$
$$\gamma_{ef} = 0{,}65\ \gamma_{max}, \quad \gamma_r = \tau_{max}/G_{max} \tag{24}$$

con $\tau_{max} = s_u$ en el flujo y $\sigma'_v \tan\varphi'$ en el saprolito. El periodo con interacción y el cortante en la base son (Stewart et al., 1999)

$$T_{SSI} = T_{fijo}[1 + k/K_x + k\,h_{ef}^2/K_\theta]^{1/2},$$
$$k = 4\pi^2 m/T_{fijo}^2, \quad V = m\,g\,S_a(T_{SSI}) \tag{25}$$

con $h_{ef} = 0{,}7h$. V se compara con el cortante elástico de la norma para perfil E (A.4.3, antes de dividir por R; I = 1,0 y M = 450 t), 3476 kN.

3.8 Tratamiento estadístico

Los resultados se reportan como percentiles de los casos. Como los casos se agrupan en 20 perfiles y no son independientes, los intervalos se calculan remuestreando perfiles (Efron y Tibshirani, 1993) con B = 2000 repeticiones. La fracción de realizaciones que superan la norma en una banda de periodos es

$$p = (1/N)\ \Sigma_i\ 1[\max_{T\,\in\,\text{banda}} AF_i(T) / (S_E/S_C)(T) > 1] \tag{26}$$

y la convergencia de los percentiles con el número de perfiles se mide con el mismo remuestreo sobre subconjuntos de 5, 10, 15 y 20 perfiles.

En la familia ajustada (numeral 4.6) hay un valor por perfil y los perfiles son independientes, de modo que la fracción de perfiles con demanda sobre S_E es una proporción binomial con n = 20 y su IC95 es el de Wilson; el remuestreo por perfiles se usa en la campaña de 480 casos, donde los casos se agrupan. El criterio de entrada, sellado el 24 de septiembre antes de correr la campaña, fijó como banda del periodo del depósito el intervalo de 0,42 a 0,94 s. Las bandas de reporte (0,05–0,2, 0,2–0,5, 0,5–1 y 1–3 s) se definieron después, en el posproceso y con los resultados a la vista. En la banda preespecificada el 65 % de las realizaciones supera el cociente normativo (IC95 52–76 %), frente al 64 % (51–75 %) de la banda de 0,5 a 1 s, con percentil 84 de 1,44 en ambas. La correspondencia de esa banda con pórticos de 5 a 10 pisos es una lectura posterior.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Respuesta del depósito

A 1,0×, la deformación máxima en la columna tiene mediana de 0,92 % y percentil 95 de 8,7 %, concentrada en el flujo. La Figura 2 muestra que el depósito reduce el movimiento en periodos cortos (mediana de AF entre 0,69 y 0,95 para T < 0,2 s) y lo amplifica entre 0,6 y 1,5 s, con máximo de 1,81 hacia 0,77–0,91 s. La solución lineal pone el máximo en 2,8 cerca de 0,65 s; la no linealidad lo reduce en un tercio y lo desplaza hacia periodos más largos. En la curva mediana el pico no lineal cae entre 0,77 y 0,91 s, entre 1,2 y 1,5 veces el T_0 mediano (0,62 s); perfil por perfil la razón es mayor, como se ve más abajo.

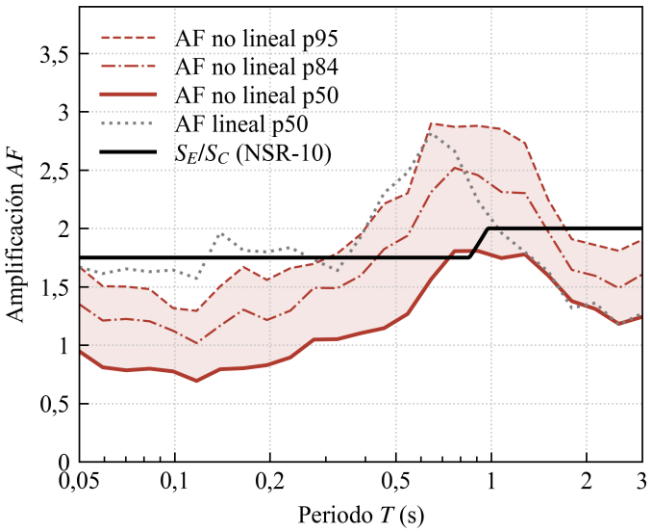


Figura 2. Amplificación del sitio en los 480 casos (percentiles 50, 84 y 95; en gris la mediana lineal) frente al cociente normativo S_E/S_C.

Con el saprolito calibrado a $\sigma'_v \cdot \tan\varphi'$, 24 casos de control (perfiles de percentil 5, 50 y 95, cuatro registros, dos componentes, 1,0×) cambian S_a en una mediana de $|\Delta \ln S_a| = 0{,}028$ entre 0,1 y 1,5 s (percentil 90: 0,041; sesgo medio −0,022). Queda por debajo del umbral de 0,05 fijado antes de correr la variante para conservar la campaña; el sesgo medio indica que la calibración usada da valores de S_a 2 % mayores.

La Figura 3 separa los tres niveles. Al crecer la intensidad el pico baja y se corre hacia periodos más largos: la mediana de AF llega a 2,11 en 0,77 s a 0,5×, a 1,77 a 1,0× y a 1,58 en 1,28 s a 1,5×. En periodos cortos la mediana baja de 0,95–1,21 a 0,54–0,75. La deformación sigue el mismo orden: la mediana de γ_{max} en la columna es 0,22, 0,92 y 2,7 % y el percentil 95 es 2,4, 8,7 y 13,5 % en los tres niveles, con el máximo entre 4 y 10 m de profundidad, dentro del flujo, donde el percentil 95 por capa llega a 3,1 % a 1,0× y a 6,9 % a 1,5×.

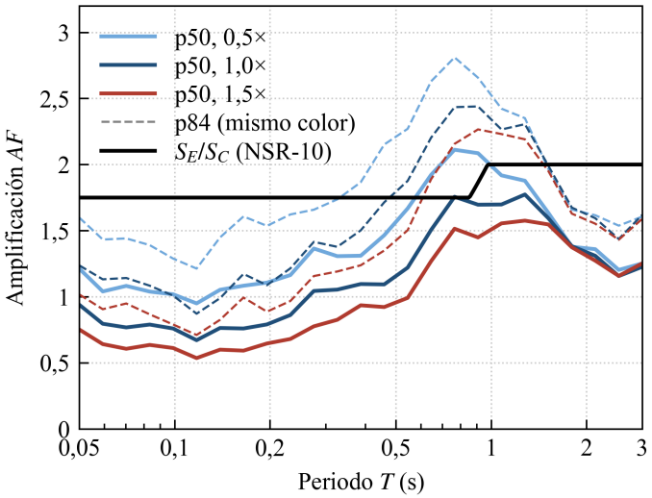


Figura 3. Amplificación por nivel de intensidad (160 casos por nivel; continuo p50, discontinuo p84) frente a S_E/S_C.

Perfil por perfil (Figura 4), el periodo del pico de la media geométrica de AF a 1,0× va de 1,08 a 2,53 veces T_0, con mediana de 1,52 y percentiles 10 y 90 de 1,19 y 2,08. El espesor del flujo ordena la respuesta: en 6 de los 7 perfiles con más de 18 m de flujo el pico cae en 1,28 s casi sin importar T_0, y la amplificación máxima baja al aumentar el espesor (correlación de Pearson −0,68), porque el flujo concentra la deformación. Los picos se agrupan en 0,77, 0,91, 1,08 y 1,28 s (uno en 0,46 s) por la discretización de 25 periodos.

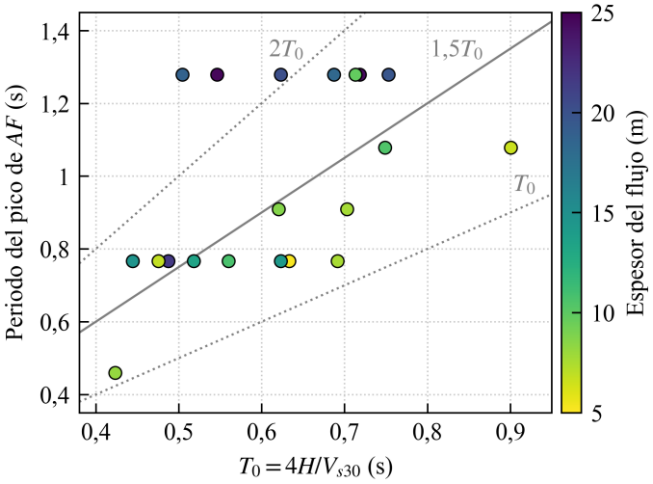


Figura 4. Periodo del pico de amplificación frente a T_0 en los 20 perfiles (1,0×); el color indica el espesor del flujo.

4.2 Comparación con la NSR-10

La Tabla 7 compara AF con S_E/S_C por banda de periodos. Las fracciones se refieren a realizaciones que superan el cociente en algún periodo de la banda, con IC95 por remuestreo de perfiles (numeral 3.8). En la Tabla 7 los tres niveles de intensidad van juntos; la Tabla 8 los separa. La mediana alcanza la norma en 0,77 s y el 64 % de las realizaciones la supera entre 0,5 y 1 s. Sin los dos registros con f > 4, esa fracción es 65 % [55; 73] y el percentil 95 llega a 1,77 veces el cociente, de modo que el resultado no lo producen los registros más escalados.

Tabla 7. AF frente a S_E/S_C (480 casos). Fracción de casos que superan el cociente en la banda, con IC95 por perfil; máximo en la banda de las curvas de percentil 50, 84 y 95 de AF divididas por S_E/S_C.

Banda (s)	Fracción que supera	p50	p84	p95
0,05–0,2	10 % [5; 16]	0,54	0,77	0,95
0,2–0,5	22 % [13; 31]	0,65	1,04	1,26
0,5–1	64 % [51; 75]	1,03	1,44	1,66
1–3	40 % [26; 55]	0,89	1,16	1,43

La Figura 5 lleva la misma comparación a espectros: $S_C \cdot AF$ es el espectro de superficie que resultaría si la entrada en roca tuviera la forma de S_C y el sitio amplificara como en la campaña. La mediana queda por debajo de S_E en todos los periodos salvo 0,77 s, donde llega a 0,81 g contra 0,79 g; el percentil 84 lo supera entre 0,46 y 1,3 s y llega a 1,13 g en 0,77 s, 44 % por encima de la meseta de la norma. La excedencia está donde el cociente normativo es plano (1,75) mientras el

depósito tiene su pico. El eje superior traduce el periodo al número de pisos de un pórtico de concreto con $T_a = 0{,}047 \cdot h^{0,9}$ y 3 m por piso: la banda de 0,5 a 1 s corresponde a edificios de 5 a 10 pisos.

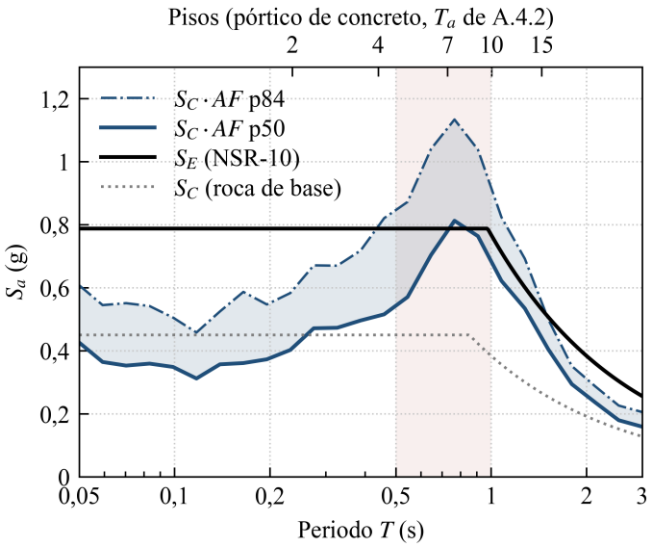


Figura 5. Espectro de superficie implícito $S_C \cdot AF$ (percentiles 50 y 84) frente al espectro S_E de la NSR-10. Sombreada, la banda de 0,5 a 1 s.

Esta lectura supone que AF se traslada a una entrada con la forma de S_C, y la entrada de la campaña no tiene esa forma: a 1,0× vale 1,45 S_C entre 0,05 y 0,2 s y 0,55 S_C entre 0,5 y 1 s. Como la amplificación baja al subir la intensidad, las dos bandas se leen por nivel en la Tabla 8. Entre 0,5 y 1 s la entrada más cercana a la de diseño es la de 1,5× (0,82 S_C): la mediana baja a 0,87 del cociente, pero el percentil 84 sigue en 1,23 y el 95 en 1,40. Entre 0,05 y 0,2 s la entrada de diseño queda entre los niveles 0,5× (0,73 S_C) y 1,0× (1,45 S_C); interpolando en el logaritmo de la entrada, el percentil 84 vale 0,82 y el 95, 1,00 del cociente. A 0,5×, con una entrada menor que la de diseño, el percentil 95 llega a 1,10.

Tabla 8. Máximo en la banda de las curvas de percentil de $AF/(S_E/S_C)$, por nivel de intensidad (160 casos por nivel), y entrada del nivel en la banda (media geométrica de las entradas sobre S_C, promediada en la banda). La fila de diseño interpola en ln(entrada) entre los dos niveles que la encierran.

Banda (s)	Nivel	Entrada / S_C	p50	p84	p95
0,05–0,2	0,5×	0,73	0,69	0,92	1,10
	diseño	1,00	0,62	0,82	1,00
	1,0×	1,45	0,54	0,71	0,88
	1,5×	2,18	0,43	0,58	0,73
0,5–1	0,5×	0,27	1,21	1,61	1,81
	1,0×	0,55	1,00	1,39	1,61
	1,5×	0,82	0,87	1,23	1,40

4.3 Modelos sustitutos

Todos los sustitutos reducen el error de la solución lineal sola, de 0,69 a entre 0,26 y 0,30 en ln AF para perfiles no vistos (XGBoost 0,263; XGBoost-res 0,258; NN 0,290; NN-base 0,300; NN-física 0,290). En términos de factor, la solución lineal se equivoca por un factor típico de 2,0 y los sustitutos por 1,29 a 1,35. La Tabla 9 da el error de los seis estimadores en las cuatro pruebas. La Figura 6 muestra las diferencias pareadas. El criterio fijado para la física en la pérdida no se cumple: NN-física − NN-base da −0,028 [−0,064; +0,008] hacia 0,5× y +0,011 [−0,023; +0,045] hacia 1,5×.

Tabla 9. RMSE en ln AF por prueba (media de 5 particiones; niveles de entrenamiento → prueba).

Prueba	XGB	XGB-res	NN	NN-base	NN-física	Lineal
Perfiles no vistos (todos)	0,263	0,258	0,290	0,300	0,290	0,694
Extrapolación 1,0–1,5× → 0,5×	0,314	0,308	0,330	0,276	0,248	0,433
Extrapolación 0,5–1,0× → 1,5×	0,354	0,324	0,359	0,343	0,354	0,880
Interpolación 0,5; 1,5× → 1,0×	0,344	0,303	0,355	0,314	0,306	0,695

Por RMSE medio, el menor error de cada prueba lo tiene un modelo con base física (XGBoost-res en tres y NN-física hacia 0,5×), pero ese orden no es un resultado por sí solo. En perfiles no vistos XGBoost-res y XGBoost no se distinguen (−0,005 [−0,019; +0,009]), y hacia 0,5× la red con base tampoco se distingue de la red sin ella (NN-base − NN = −0,054 [−0,144; +0,036]). Las diferencias que se sostienen al 95 % están en la Figura 6 y en el párrafo siguiente.

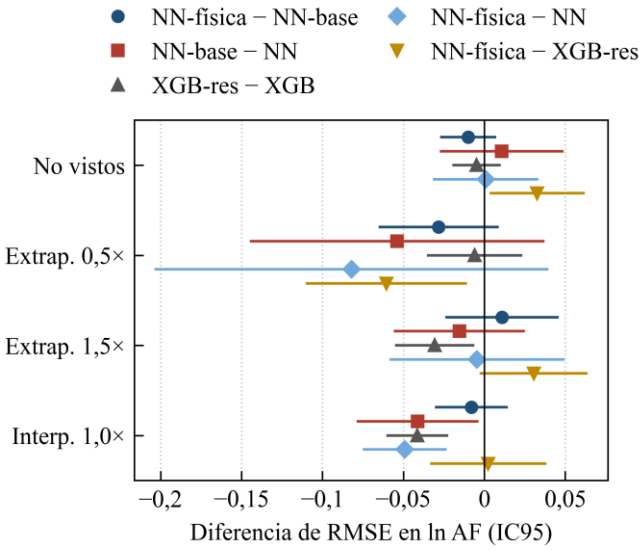


Figura 6. Diferencias pareadas de RMSE en ln AF con IC95 (5 particiones por perfil): las cinco comparaciones en las cuatro pruebas, 20 intervalos. Valores negativos favorecen al primer modelo.

La física en la estructura aporta en una sola dirección: cuando cambia la intensidad de la entrada. La solución lineal de la ecuación de onda como base del sustituto, ecuación (15), reduce el error en la interpolación a 1,0× (XGBoost-res − XGBoost = −0,041 [−0,060; −0,023], menor en las cinco particiones; NN-base − NN = −0,041 [−0,078; −0,005], en una sola prueba) y en la extrapolación a 1,5× con XGBoost (−0,031 [−0,054; −0,007], menor en las cinco particiones). En esa misma interpolación NN-física − NN vale −0,049 [−0,074; −0,024], y casi todo viene de la base: la pérdida agrega −0,008 [−0,030; +0,014]. En perfiles no vistos, que es la generalización que interesa para un sitio nuevo, ninguna de las comparaciones entre modelos con y sin física excluye el cero: XGBoost-res − XGBoost = −0,005 [−0,019; +0,009], NN-base − NN = +0,011 [−0,027; +0,048] y NN-física − NN-base = −0,010 [−0,027; +0,007]. La única diferencia distinguible en esa prueba es entre familias de modelo: NN-física queda por encima de XGBoost-res en +0,033 [+0,004; +0,061]. La reducción frente a la solución lineal sola, de 0,69 a entre 0,26 y 0,30, la dan los datos de la campaña con cualquiera de los cinco sustitutos. En el error contra el MEF en los niveles de la campaña, los términos de la pérdida, ecuación (16), no produjeron una mejora distinguible con 15 perfiles de entrenamiento: los intervalos van de −0,064 a +0,045 según la prueba, con semiamplitudes de 0,02 a 0,04. Con el RMSE en esos niveles no se puede afirmar que aporten ni que no aporten; la prueba del final de este numeral mide lo que el RMSE no ve. Hacia 0,5×, NN-física es el mejor de los cinco modelos (−0,061 [−0,110; −0,012] frente a XGBoost-res; una sola prueba, no cumple la regla de lectura), pero esa ventaja no se puede atribuir a la pérdida porque frente a NN-base el intervalo cruza cero. Con 20 intervalos es de esperar cerca de un falso positivo al 95 %, de modo que solo se leen como resultados los que se repiten en más de una prueba y en todas las particiones.

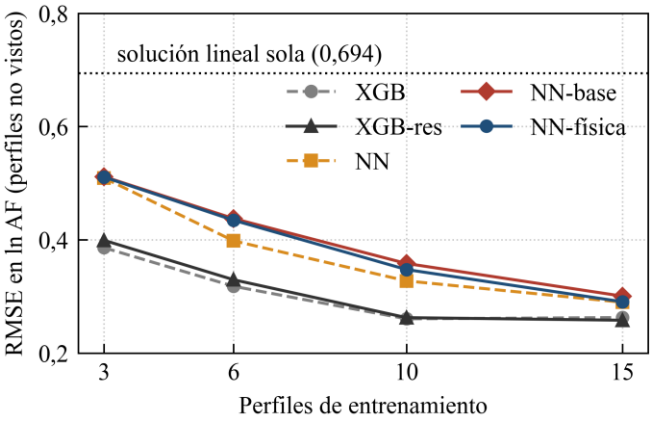


Figura 7. RMSE en ln AF sobre perfiles no vistos frente al número de perfiles de entrenamiento (media de 5 particiones).

Las curvas de aprendizaje (Figura 7) muestran que el error de las redes sigue bajando al pasar de 10 a 15 perfiles (NN-física de 0,347 a 0,290), mientras que el de XGBoost-res casi se estabiliza (0,262 a 0,258). Con pocos perfiles el árbol sobre el residuo es la opción más eficiente; con más perfiles la comparación entre modelos podría cambiar, y es ahí donde los términos de la pérdida tendrían margen para aportar.

El RMSE mide el error en los tres niveles de la campaña. No mide cómo se comporta el sustituto fuera de ellos, que es donde se usa cuando la intensidad de interés no coincide con la de entrenamiento. Después de la ablación se agregaron dos pruebas de consistencia física, fijadas en el código antes de correrlas sobre la campaña y aplicadas a los mismos perfiles de prueba con las mismas cinco particiones, entrenando con los tres niveles. La primera mide el límite de baja deformación. Con la intensidad de cada caso de prueba multiplicada por 0,01 (γ del orden de 10^{-5}) la respuesta exacta es la solución

lineal de la ecuación de onda con el mismo amortiguamiento de Rayleigh de la columna (1 % en f_1 y $5f_1$). La columna no lineal a 0,01× reproduce la columna lineal con error mediano de 0,07 % y percentil 95 de 0,9 % en los 25 periodos, y la columna lineal con 0,9 % para $T \geq 0{,}3$ s y hasta 3,4 % en periodos cortos (Tabla 3):

$$e_{\text{lin}}^2 = (1/N\,n_T)\,\Sigma_{i,j}\,[\ln \hat{AF}_{ij}(0{,}01I) - \ln AF_{\text{lin},ij}]^2 \qquad (27)$$

El factor 0,01 solo lleva la entrada al régimen lineal; para e_{lin} no se fijó umbral de aceptación y el valor se lee por comparación entre modelos (0,019 en ln AF equivale a 1,9 % en AF). La prueba evalúa el mismo principio que impone $\mathscr{L}_{\text{lin}}$, en perfiles que la red no vio y a una intensidad distinta de la de colocación (0,02); así se comprueba si el principio se cumple fuera de los casos de entrenamiento. La segunda barre la intensidad entre 0,25 y 2,0 veces la del caso (f_k = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0) y cuenta la fracción de tramos en que la amplificación crece con la intensidad en periodos cortos, con la suma sobre los $M = N\,n_k\,n_c$ tramos de $T_j \leq 0{,}2$ s:

$$p_{\text{abl}} = (1/M)\,\Sigma_{i,k,j}\,1[\Delta\ln \hat{AF}_{ij}/\Delta\ln f_k > 0{,}02] \qquad (28)$$

Tabla 10. Consistencia física de los sustitutos en los perfiles de prueba (media e IC95 de 5 particiones). e_{lin}: error frente a la solución lineal exacta a 0,01 veces la intensidad; factor = $\exp(e_{\text{lin}})$; p_{abl}: fracción de tramos con AF creciente en $T \leq 0{,}2$ s entre 0,25 y 2,0×. La fila del MEF usa los dos tramos entre 0,5 y 1,5× y no es directamente comparable.

Modelo	e_{lin}	Factor	p_{abl}
XGB	0,385 [0,357; 0,414]	1,47	29,8 %
XGB-res	0,321 [0,295; 0,346]	1,38	7,9 %
NN	0,351 [0,328; 0,374]	1,42	0,30 %
NN-base	0,342 [0,254; 0,430]	1,41	0,02 %
NN-física	0,019 [0,006; 0,032]	1,02	0,14 %
MEF 0,5–1,5×	—	—	2,1 %

En el límite de baja deformación la diferencia es de un orden de magnitud. NN-física reproduce la solución lineal con e_{lin} = 0,019, un factor de 1,02, y en cada una de las cinco particiones queda entre 0,011 y 0,037; los otros cuatro modelos quedan entre 0,32 y 0,39, un factor de 1,38 a 1,47. La comparación con NN-base aísla los términos de la pérdida, porque las dos redes tienen la misma base, la misma arquitectura y el mismo entrenamiento; de los dos términos, el que actúa sobre el límite lineal es $\mathscr{L}_{\text{lin}}$. NN-física − NN-base = −0,323 [−0,403; −0,243]. La comparación no es simétrica: solo NN-física recibió en el entrenamiento la información de que AF tiende a AF_{lin} cuando la intensidad baja, y los otros cuatro modelos nunca vieron intensidades menores que 0,5×. La diferencia mide el efecto de dar esa información por la pérdida. Comparar la física en la pérdida con la física en los datos exigiría dar a los demás modelos pseudo-casos a 0,02×, y eso no se hizo. El RMSE no lo muestra porque ninguno de los tres niveles de la campaña está en el régimen lineal. La base física sola no alcanza: XGBoost-res y NN-base conservan a intensidad casi nula una corrección no lineal que ahí no existe, porque nada en su entrenamiento les indica que debe desaparecer. Sin esa información, un sustituto entrenado con esta campaña se equivoca en un factor típico de 1,4 en el límite lineal; con ella, la red reproduce ese límite y conserva el error de la Tabla 9 entre 0,5 y 1,5×. Entre esos dos extremos no se comparó con el MEF.

En el ablandamiento, el MEF muestra crecimiento de AF con la intensidad en el 2,1 % de los tramos entre 0,5 y 1,5×. XGBoost lo predice en el 29,8 % y XGBoost-res en el 7,9 %; las tres redes quedan por debajo de 0,3 %, con o sin el término $\mathscr{L}_{\text{abl}}$ (NN-física − NN-base = +0,001 [−0,001; +0,003]); la fila del MEF se calcula en otro rango. En estos datos la continuidad de la red basta para respetar el ablandamiento, y ese término de la pérdida no agrega nada medible.

4.4 Interacción suelo-estructura

En los 160 casos a 1,0× el $G/G_{\max}$ medio bajo la losa tiene mediana de 0,64 y el periodo pasa de 0,34 s a 0,38 s (percentiles 5 y 95: 0,36 y 0,41 s). El cortante con interacción tiene mediana de 1836 kN y percentil 95 de 2949 kN, 0,53 y 0,85 veces el normativo; lo superan 2 de los 160 análisis. Sin interacción, con el mismo espectro de superficie, la mediana sería 2069 kN: la interacción sola reduce el cortante 11 %, y el resto de la diferencia con la norma viene de la respuesta de sitio en periodos cortos, con una entrada de 1,06 S_C entre 0,2 y 0,5 s, cercana a la de diseño. Todas las cifras de interacción usan la resistencia del saprolito $\sigma'_v \tan\varphi'$; con la formulación anterior la mediana del cortante cambia en menos de 1 kN y la de $G/G_{\max}$ sube a 0,65.

El signo de ese 11 % depende de la entrada. Con la de la campaña, que cae entre 0,3 y 0,5 s, alargar el periodo reduce la demanda. Con una entrada de la forma de S_C, plana hasta 0,853 s, la mediana de $S_C \cdot AF$ crece de 0,48 g en T_{fijo} = 0,34 s a 0,49 g en T_{SSI} = 0,38 s, y el mismo alargamiento aumentaría el cortante cerca de 3 %. Caso por caso, aun con la entrada de la campaña, el cociente entre el cortante con y sin interacción va de 0,59 a 1,13 (percentiles 5 y 95; mediana 0,91), con T_{SSI}/T_{fijo} entre 1,06 y 1,22 y G/G_{max} bajo la losa entre 0,49 y 0,79. La interacción aumenta el cortante en el 22 % de los casos, en más de 5 % en el 11 % de ellos, y en el percentil 95 lo hace en 13 %.

4.5 Tamaño de la muestra

La mediana de S_a en superficie en T = 0,65 s (periodo de la malla más cercano a 0,6 s) se estabiliza en 0,35 g desde 5 perfiles. El percentil 95 cambia menos de 4 % desde 10 perfiles y con 20 vale 0,82 g con IC95 de ±0,09 g (±11 %). Las fracciones de excedencia tienen intervalos de ±5 a ±15 puntos (Tabla 7) y no deben reportarse sin ellos.

4.6 Familia ajustada al espectro

Con la familia de 4 registros ajustados a S_C (numeral 3.5, Tabla 4) se corrieron los 20 perfiles a 1,0×, en las dos componentes (160 análisis). La entrada media vale 1,03 S_C entre 0,2 y 1 s, en el nivel de diseño. Entre 0,05 y 0,2 s vale 1,02 veces el objetivo con que se ajustó, que usa la rama ascendente de A.2.6-7 por debajo de $T_{0,A}$ = 0,18 s, y 0,78 veces la meseta de A.2.6-3 que se usa en el resto del artículo; la deformación máxima en la columna tiene mediana de 4,0 % y percentil 95 de 16 %. Con cuatro registros, la demanda de cada perfil se puede leer de dos formas, a partir de la media geométrica de las dos componentes de cada registro: por analogía con A.2.7.1(a), que rige el análisis de la estructura con menos de siete registros, es el máximo de los cuatro; según A.2.10.2.4(b), que rige el estudio de sitio, es su media. La Tabla 11 usa el máximo y la compara con S_E.

Tabla 11. Familia ajustada a S_C (condicionada; flujo con ν = 0,49 y saprolito calibrado, Tabla 2), 20 perfiles a 1,0×: máximo en la banda de las curvas de percentil de la demanda sobre S_E (demanda por perfil = máximo de los cuatro registros, por analogía con A.2.7.1(a); con la media de A.2.10.2.4(b), ver texto), fracción de perfiles con demanda sobre S_E (n = 20; IC95 de Wilson) y p84 de $AF/(S_E/S_C)$.

Banda (s)	p50	p84	p95	Perfiles > S_E	AF p84
0,05–0,2	0,60	0,89	1,03	10 % [3; 30]	0,79
0,2–0,5	0,75	1,01	1,22	25 % [11; 47]	0,94
0,5–1	0,95	1,24	1,49	50 % [30; 70]	1,16
1–3	0,73	1,03	1,33	20 % [8; 42]	0,96

Entre 0,5 y 1 s la demanda de la familia supera S_E en 10 de los 20 perfiles (50 %, IC95 30–70 %; n efectivo = 20, un valor por perfil, porque la demanda de cada perfil es el máximo de los cuatro registros), con percentiles 84 y 95 de 1,24 y 1,49 veces S_E. Con la media aritmética de los cuatro registros, el p50, p84 y p95 valen 0,87, 1,20 y 1,32 veces S_E y los perfiles sobre S_E siguen siendo 10 de 20. Caso por caso, el percentil 84 de $AF/(S_E/S_C)$ vale 1,16 y la mediana 0,85. La comparación con la Tabla 8 no es directa, porque la familia cambió a la vez la entrada y el material: en estos 160 análisis el flujo tiene ν = 0,49 y el saprolito está calibrado a $\sigma'_v \tan \varphi'$ (Tabla 2). La entrada de la familia vale 1,03 S_C en esta banda, por encima de la del nivel 1,5× (0,82 S_C). Si se prolonga en el logaritmo de la entrada la tendencia de la Tabla 8, la campaña daría 1,15 en el percentil 84 y 0,80 en la mediana, valores cercanos a los de la familia; la prolongación sale del rango de la campaña (t = 1,57). Entre 0,2 y 0,5 s, donde las entradas medias de las dos campañas coinciden (1,03 y 1,06 S_C), los percentiles difieren entre −7 y +7 %, y diferencias de ese orden no se pueden asignar a la entrada ni al material. El cambio del saprolito, medido con la variante del numeral 4.1, mueve el máximo de AF en esta banda 2 %; el efecto de ν del flujo solo se midió en ensayos de un elemento (Tabla 3). Por debajo de 0,2 s el percentil 95 de la demanda queda en 1,03 veces S_E, pero con una entrada que en esa banda está un 22 % por debajo de la meseta, de modo que no se compara con el 1,00 interpolado en el numeral 4.2. En una malla de 400 periodos la media de la familia queda hasta 1,9 % por debajo del objetivo (0,981 en 0,66 s), de modo que la demanda de la Tabla 11 está del lado bajo. Con escalamiento proporcional, que no incluye la no linealidad del depósito, el factor que cierra esa diferencia (1,0194) llevaría el percentil 84 de 1,24 a 1,27 veces S_E, el 95 de 1,49 a 1,52 y los perfiles sobre S_E de 10 a 11 de 20. La corrida con ese factor está pendiente.

Con la regla del máximo, el cortante del pórtico de 3 pisos con interacción tiene mediana de 2357 kN y percentil 95 de 3817 kN (0,68 y 1,10 veces el normativo) y supera el normativo en 3 de los 20 perfiles; con base fija lo supera en 1. Con la media de los cuatro registros, el percentil 95 es 3493 kN y lo superan 2 perfiles. Caso por caso (160 análisis), la mediana es 2170 kN, el percentil 95 3676 kN y lo superan 14 análisis, todos de esos 3 perfiles. Las impedancias usan $\nu = 0{,}35$ en las dos campañas. Con el $\nu = 0{,}49$ del flujo en la familia, K_x y K_θ suben 9 y 27 %, el periodo con interacción baja 1,6 % y el cortante cambia entre −3 y +2 % (percentiles 5 y 95, caso por caso); los 14 análisis sobre el normativo siguen siendo 14. Como el V_{s30} de las estaciones no tiene origen declarado y la familia no representa la fuente cortical, estos resultados se presentan como condicionados (numeral 6).

5. APLICACIÓN A LA PRÁCTICA Y RELACIÓN CON LA NSR-10

En la práctica actual, para un edificio sobre estos depósitos el ingeniero clasifica el perfil por $\bar{N}$ (A.2.4.5.3), toma el espectro del perfil E (A.2.6), escoge el método de análisis (A.3.4.2) y, si incluye la interacción suelo-estructura, reduce el cortante con el Apéndice A-2 dentro de los límites del Capítulo A.7. Cada paso supone algo sobre el sitio que este estudio permite revisar con números. El estudio no reemplaza ninguno de esos pasos: dice cuándo el paso de la norma basta, cuándo hay que pasar al estudio sísmico particular de sitio que la misma norma prevé (A.2.10) y con qué parámetros se hace. La Tabla 12 resume esa relación; los numerales 5.1 a 5.4 la desarrollan.

Tabla 12. Pasos de la NSR-10 para un edificio sobre el depósito estudiado, qué supone cada uno y qué aporta este estudio.

Numeral	Qué supone o exige	Qué muestra este estudio
A.2.4.5.3	Clasificación por V_s, $\bar{N}$ o s_u; si hay V_s, prevalece	Por $\bar{N}$ el perfil es E; si se midiera un V_{s30} igual al de la población, 12 de los 20 perfiles serían D (S_D/S_C = 1,25) y 11 de esos 12 lo superan en su pico
A.2.6	F_a y F_v por clase; meseta hasta T_C	Con E, el p84 supera la norma 44 % entre 0,5 y 1 s; bajo 0,2 s, a la entrada de diseño, p84 0,82 y p95 1,00 del cociente
A.2.10.1.3	Estudio de sitio si A.2.4 no representa el sitio	No lo representa si T cae entre 0,8 y 2,05 T_0 del perfil (p84 > 1)
A.2.10.2.4 (b), (d)	Media de las respuestas, con la incertidumbre del suelo de ser el caso; detalle entre $T_{mín}$ y 1,4 $T_{máx}$	Con la media, 1,02 del cociente entre 0,5 y 1 s; con el p84, 1,44. Pico en 1,2–2,1 T_0 (p10–p90)
A.3.4.2.2 (e)	Interacción obligatoria en D, E o F con $T > 2\,T_C$	2 T_C = 1,95 s (E): la banda crítica de 0,5 a 1 s queda por fuera
Apéndice A-2	$G/G_0 = 0{,}64$ para $A_a = 0{,}15$; con S_E la interacción solo reduce	G/G_{max} de 0,49 a 0,79 (mediana 0,64); V_{SSI}/V_{fijo} de 0,59 a 1,13; con la familia (condicionada), V_{SSI} supera el normativo en 3 de 20 perfiles (regla del máximo; 14 de 160 análisis)
A.7.3.4, A.7.3.5	Diseñar para el aumento si lo hay; usar los valores extremos de los parámetros	El aumento aparece con el espectro de sitio; el rango de G/G_{max} da los extremos

5.1 Clasificación del perfil y espectro (A.2.4 y A.2.6)

La norma asigna un espectro por clase, con F_a y F_v que dependen solo de la clase y de A_a y A_v. En estos depósitos la respuesta la controla el periodo propio del depósito ablandado, entre 1,2 y 2,1 veces T_0 (percentiles 10 y 90; mediana 1,5), que ni $\bar{N}$ ni V_{s30} ubican. La Tabla 13 da la consecuencia por periodo de la estructura con el perfil E que resulta de $\bar{N}$.

Tabla 13. Resultado frente al espectro del perfil E y consecuencia para el diseño, por periodo de la estructura (pórticos de concreto, 3 m por piso; número de pisos estimado con T_a (A.4.2.2), y el periodo analítico puede ser mayor). La fila de menos de 0,2 s se lee a la entrada de diseño (Tabla 8); las demás, con los tres niveles.

T (s)	Pisos	$AF/(S_E/S_C)$ p50 / p84	Lectura para el diseño (paramétrica)
< 0,2	1	0,62 / 0,82	S_E cubre el p84; el p95 llega a 1,00; la amplificación no pide estudio de sitio
0,2–0,5	2–4	0,65 / 1,04	S_E cubre la mediana; revisar si T_{SSI} pasa de 0,5 s

T (s)	Pisos	AF/(S_E/S_C) p50 / p84	Lectura para el diseño (paramétrica)
0,5–1	5–10	1,03 / 1,44	S_E no cubre la dispersión del sitio, aun a 1,5× (p84 1,23); estudio de sitio (A.2.10) con reporte del p84, porque con la media queda en S_E
> 1	> 10	0,89 / 1,16	S_E cubre la mediana; el p84 lo supera hasta 1,3 s

El V_{s30} de los perfiles sale de la correlación de la ecuación (2) y por eso no habilita el criterio de $\bar{v}_s$. Pero si una medición en el sitio diera esos valores (133 a 283 m/s), 12 de los 20 perfiles quedarían como perfil D, que por A.2.4.5.3 prevalece sobre la clasificación por $\bar{N}$. Para Guarne el espectro D tiene F_a = 1,5 y F_v = 2,0, el mismo T_C que la roca C, y su cociente S_D/S_C vale 1,25 en todos los periodos hasta 3,8 s, contra 1,75 a 2,0 del perfil E. En 11 de esos 12 perfiles la media geométrica de AF a 1,0× supera 1,25 en su pico; en los 12, el pico tiene mediana de 1,78 (1,42 veces S_D/S_C) y máximo de 2,52 (2,01 veces). Si se reclasifica con V_s sin estudio de sitio, el espectro baja en la banda donde el depósito amplifica: S_D/S_E vale 0,71 entre 0,5 y 0,853 s y 0,625 desde 0,975 s, una caída de 29 a 38 %. El uso correcto de V_s en estos depósitos es calcular T_0 con la ecuación (5) y decidir con él si hace falta el estudio de sitio.

5.2 Estudio sísmico particular de sitio (A.2.10)

A.2.10.1.3 permite el estudio de sitio cuando los efectos de A.2.4 no representan la situación del lugar, y la Figura 5 y la Tabla 13 dicen cuándo pasa eso en estos depósitos: el percentil 84 de la campaña supera el cociente normativo entre 0,46 y 1,3 s. Perfil por perfil, con el periodo normalizado por el T_0 de cada uno, lo supera entre 0,8 y 2,05 veces T_0, y la mediana entre 1,1 y 1,6 veces. El método de la sección 3 cubre lo que pide A.2.10.2.4: respuesta por propagación de onda soportada en el perfil geotécnico (a), curva de transferencia que considera, de ser el caso, la incertidumbre de las propiedades del suelo (b) y estudio detallado de la zona entre el menor de los periodos fundamentales en las dos direcciones en planta y 1,4 veces el mayor (d), que en estos depósitos es la zona del pico. El espectro en roca es el de A.2.6 con A_a y A_v de Guarne, como permite A.2.10.2.2; los coeficientes del perfil C son un supuesto de este trabajo (numeral 2), y el mínimo de diseño sigue siendo el del perfil B (A.2.10.2.4 (f)).

A.2.10.2.4 (b) y (c) diseñan con la media de las respuestas. Entre 0,5 y 1 s el máximo de la curva media de AF vale 1,02 del cociente; el de la curva mediana, 1,03, y el de la curva del percentil 84, 1,44 (Tabla 7). Un estudio de sitio hecho como pide la norma da en esa banda un espectro prácticamente igual a S_E, y la dispersión del sitio queda por fuera. Por eso este estudio recomienda reportar además el percentil 84 con su intervalo, y fijar el número de perfiles con la precisión que se requiera (con 20, ±11 % en el percentil 95 en este depósito; numeral 4.5).

5.3 Interacción suelo-estructura (A.7 y Apéndice A-2)

A.3.4.2.2 (e) exige análisis dinámico elástico con interacción suelo-estructura (Capítulo A.7) en perfiles D, E o F cuando el periodo pasa de 2 T_C; con el perfil E de Guarne eso es 1,95 s, de modo que para los edificios de 5 a 10 pisos ese literal no la exige y lo que controla es el efecto de sitio. Si se incluye con el método de la fuerza horizontal equivalente, el Apéndice A-2, que aplica cuando la estructura se analiza empotrada en la base (A-2.1.1), calcula el periodo efectivo con la misma forma de la ecuación (25) (ecuación A-2-3) y reduce el cortante con las ecuaciones A-2-1 y A-2-2:

$$\tilde{V} = V - \Delta V \tag{29}$$

$$\Delta V = [S_a(T) - S_a(\tilde{T})(0{,}05/\beta_{ef})^{0{,}4}]\, g\, M \tag{30}$$

donde $\tilde{T}$ es el periodo efectivo, β_{ef} el amortiguamiento efectivo del sistema, que A-2 limita a $0{,}05 \le \beta_{ef} \le 0{,}20$, y el cortante reducido no puede bajar de 0,7 V ni, por A.7.3.4, del que da la fuerza horizontal equivalente con $T = C_u T_a$. Si T y $\tilde{T}$ quedan en la meseta del espectro, $S_a(\tilde{T}) = S_a(T)$ y la ecuación (30) se reduce a:

$$\Delta V = S_a(T)\, g\, M\, [1 - (0{,}05/\beta_{ef})^{0{,}4}] \ge 0 \tag{31}$$

Con el espectro E, que no crece con el periodo, y $\beta_{ef} \ge 0{,}05$, el procedimiento no puede dar un

aumento del cortante. A.7.3.4 obliga a diseñar para el aumento cuando lo hay, pero con el espectro de la norma ese caso nunca aparece. Con el espectro de sitio sí: el cortante con interacción superó al de base fija en el 22 % de los casos, y en el percentil 95 lo hizo en 13 % (numeral 4.4), porque el alargamiento de T_{fijo} a T_{SSI} (1,06 a 1,22 veces) acerca la estructura al pico del depósito. Con la familia ajustada al espectro, a la intensidad de diseño, el cortante con interacción supera el normativo del perfil E en 3 de los 20 perfiles con la regla del máximo (numeral 4.6). Si el edificio se diseña con el espectro D por reclasificación, en los 12 perfiles que serían D el percentil 95 del cortante con interacción (3057 kN) supera en 23 % el de la norma para ese perfil (2483 kN), y lo superan 24 de sus 96 análisis.

La tabla A-2.1-1 da $G/G_0 = 0,64$ para $A_a = 0,15$. La mediana de la campaña bajo la losa es 0,64, de modo que el valor de la tabla es adecuado como valor central, pero el rango entre los percentiles 5 y 95 va de 0,49 a 0,79. A.7.3.5 pide usar los valores máximos y mínimos esperados de los parámetros del suelo y quedarse con los más desfavorables; ese rango es el que corresponde a estos depósitos. En suma, cuando T_{fijo} está por debajo del pico del depósito y T_{SSI} se le acerca, no se debe aplicar la reducción de A-2 sin el espectro de sitio.

5.4 Procedimiento propuesto y uso del sustituto

Para el ingeniero que trabaja en estos depósitos lo anterior se traduce en cuatro pasos compatibles con la NSR-10; el cuarto y la parte del segundo que se refiere al percentil 84 son recomendaciones de este estudio. Primero, medir V_s en el sitio (A.2.10.2.3 (c) admite también correlaciones, pero solo una medición habilita el criterio de $\bar{v}_s$ de A.2.4) y calcular T_0, sin usar ese V_s para bajar la clase del perfil. Segundo, si el periodo de la estructura cae entre 0,8 y 2,05 veces T_0, hacer el estudio de sitio por A.2.10.1.3; la norma diseña con la media (A.2.10.2.4 (b) y (c)), y este estudio recomienda reportar además el percentil 84 con su intervalo. Por debajo de 0,2 s el espectro E cubre el percentil 84. Tercero, en la interacción suelo-estructura, usar G/G_{max} entre 0,49 y 0,79 como valores extremos (A.7.3.5) y no aplicar la reducción de A-2 cuando T_{SSI} se acerca al pico. Cuarto, reportar los percentiles con su intervalo y fijar el número de perfiles con la precisión que se requiera.

La campaña de 480 casos costó del orden de 160 horas-núcleo, que es lo que hace impráctico el paso 2 con la incertidumbre del suelo que pide A.2.10.2.4 (b). Un sustituto entrenado con 15 a 20 perfiles predice AF para un perfil nuevo en fracciones de segundo, con un error típico de factor 1,29 a 1,35 según el modelo frente al factor 2,0 de la solución lineal sola; con el límite de baja deformación impuesto en la pérdida, la misma red reproduce además ese límite (Tabla 10). Esas predicciones son con los registros de la campaña: la generalización a registros nuevos no se evaluó. Con él se podrían propagar miles de perfiles para obtener la media y los percentiles del estudio de sitio, pero antes hay que verificar que el sustituto reproduce los percentiles del MEF y no solo el valor de cada caso: con un error de 0,26 a 0,30 en ln AF, la dispersión predicha es mayor que la del sitio. Esa verificación no se hizo en este trabajo. Las recomendaciones valen para depósitos de flujo de lodos sobre saprolito del Batolito con 30 m hasta la roca C y quedan condicionadas a la confirmación con una familia normativa (numeral 6).

6. LIMITACIONES

El depósito es perfil E por los SPT medidos; la roca de la base del modelo, bajo ese depósito, se asimila a perfil C sin velocidad medida ($V_{s,r} = 700$ m/s supuesta), y la base está a 30 m sin sondeo que confirme la profundidad de la roca. Con la base en roca B el objetivo bajaría por un factor de 1,2 en la meseta común a 1,6 desde 0,853 s (media geométrica de 1,22 entre 0,05 y 1,5 s, con la rama A.2.6-7), la referencia normativa pasaría a S_E/S_B y la amplificación de la columna cambiaría con la impedancia de la base; los resultados quedan atados al supuesto de roca C. Con la solución lineal, que es la más sensible a la impedancia de la base, llevar $V_{s,r}$ a 500 o a 1000 m/s cambia AF entre 0,5 y 1 s por un factor mediano de 0,86 y 1,14 (percentiles 5 y 95 de 0,77–0,95 y 1,04–1,31; 20 perfiles, los cuatro registros de la familia ajustada y sus dos componentes). El efecto del supuesto sobre la amplificación es del orden de 15 %. La profundidad de 30 m corresponde a los 30 m superiores con que la NSR-10 clasifica el perfil y no se varió. Un depósito más profundo tendría un T_0 mayor por la ecuación (5) y desplazaría hacia periodos más largos la banda en que el sitio supera la norma; por eso esa banda se da también normalizada, entre 0,8 y 2,05 T_0 (numeral 5), que es la forma de trasladarla

a otro espesor sin suponer que conserve su posición en segundos.

La entrada no es una familia normativa: los registros reales escalados no reproducen la forma del espectro objetivo y dos de ellos superan f = 4. Una primera aplicación del criterio de ajuste espectral con 173 semillas intraplaca del Centro Sismológico Nacional de Chile dio una familia vacía (7 semillas elegibles, todas rechazadas por los controles de forma de onda), y el criterio se revisó después de esa aplicación, lo que se declara como tal. Con el criterio revisado se obtuvo una familia de 4 registros sintéticos de 3 eventos. Después de un reescalamiento único de 1,0176, la media cumple el criterio (i) de A.2.7.1(c) en los 120 periodos del ajuste, pero no en una malla de 400 periodos, donde baja a 0,981 del objetivo en 0,66 s; el criterio (ii) se cumple, con mínimo individual de 0,898 en la malla fina, y el factor adicional de 1,0194 que cerraría (i) no se aplicó (numeral 4.6). El V_{s30} de sus estaciones (560 a 822 m/s) viene de una base de datos que no declara cómo se obtuvo, de modo que la familia se trata como condicionada y sus resultados como paramétricos. Los tres eventos son intraplaca de profundidad intermedia, así que la fuente cortical del sistema Romeral no queda representada, y la estación T19A aparece en dos de ellos. La campaña de 480 casos y la familia no usan el mismo material: en la familia el flujo tiene $\nu = 0{,}49$ y el saprolito está calibrado a $\sigma'_v \tan\varphi'$. El efecto del saprolito se midió (2 % en el máximo de AF entre 0,5 y 1 s); el de ν no se separó en la respuesta de la columna, y la comparación del numeral 4.6 no separa entrada y material. Separarlos exige un diseño factorial con los dos materiales y las dos entradas, que queda para un trabajo posterior. Por todo esto los resultados del numeral 4.2 son paramétricos, porque la entrada no es una familia normativa. Los del numeral 4.6 quedan condicionados al origen del V_{s30} de las estaciones y a la ausencia de registros de fuente cortical: la confirmación del V_{s30} no basta por sí sola para tratarlos como demanda normativa. Las recomendaciones del numeral 5 dependen de ambos.

En el flujo, MultiYieldSurfaceClay no tiene etapa elástica en la gravedad, y a $\gamma = 10^{-3}$ su curva de corte queda entre 30 % más blanda y 2 % más rígida que la de Darendeli (2001) con $\nu = 0{,}49$ (Figura 1) y, con el $\nu = 0{,}35$ de la campaña de 480 casos, más rígida en las capas profundas (Tabla 3); su efecto sobre la respuesta está por acotar. El saprolito se modeló drenado, sin generación de presión de poros. Los resultados de periodo corto llevan la cota medida de V2 con la discretización de la campaña: 2,8 % entre 0,1 y 0,3 s y 3,4 % entre 0,05 y 0,1 s (numeral 3.4). A 1,0× el flujo moviliza en su capa más exigida una mediana de 97 % de s_u y llega a 0,95 s_u en el 61 % de los casos; con la familia, en el 84 %. La respuesta queda gobernada por s_u, y ni la deformación permanente ni el ablandamiento cíclico del flujo están representados. La deformación pasa de $\gamma_{max} = 10$ %, donde los dos modelos son perfectamente plásticos y quedan fuera de su calibración, en 28 de los 480 casos (13 % a 1,5×) y en 34 de los 160 de la familia (21 %). No se guardaron los modelos entrenados ni sus predicciones por caso; las métricas de los sustitutos se recalcularon desde los valores por partición.

7. CONCLUSIONES

1. En el depósito estudiado la amplificación no lineal se concentra en el periodo del depósito ablandado, que perfil por perfil cae entre 1,2 y 2,1 veces T_0 (percentiles 10 y 90). Entre 0,5 y 1 s la mediana alcanza el cociente S_E/S_C de la NSR-10 y el 64 % de las realizaciones lo supera (IC95 51–75 %); en la banda del periodo del depósito fijada antes de correr la campaña (0,42 a 0,94 s) la fracción es 65 % (IC95 52–76 %). El percentil 84 lo excede en 44 %, y a 1,5×, con una entrada de 0,82 veces S_C en esa banda, sigue 23 % por encima. Para pórticos de 5 a 10 pisos, el espectro del perfil E que asigna A.2.6 a partir de $\bar{N}$ no cubre la dispersión del sitio.

2. Por debajo de 0,2 s, donde están los edificios de un piso, la entrada de la campaña supera la de diseño en los niveles 1,0× y 1,5× (1,45 y 2,18 S_C), y más intensidad reduce la amplificación. Leída a la entrada de diseño, interpolando entre 0,5× y 1,0×, la amplificación queda en 0,82 veces el cociente normativo en el percentil 84 y en 1,00 en el 95; a 0,5×, con 0,73 S_C, el percentil 95 llega a 1,10. En esa banda el espectro E cubre el percentil 84.

3. Medir V_s no resuelve el problema si se usa solo para clasificar. Por A.2.4.5.3 un V_s medido prevalece sobre $\bar{N}$; si la medición diera el V_{s30} de la población, 12 de los 20 perfiles pasarían a D, cuyo cociente $S_D/S_C = 1{,}25$ superan 11 de ellos en su

pico. El V_s sirve para calcular T_0 y ubicar la banda donde el percentil 84 supera la norma, entre 0,8 y 2,05 veces el T_0 de cada perfil, que es donde aplica el estudio de sitio de A.2.10.1.3.

4. Con el espectro E, el Apéndice A-2 solo puede reducir el cortante, porque ese espectro no crece con el periodo y $\beta_{ef} \geq 0{,}05$. Con el espectro de sitio, el alargamiento del periodo aumentó el cortante en el 22 % de los casos, en 13 % en el percentil 95, que es el caso que A.7.3.4 obliga a considerar. El G/G_0 de la tabla A-2.1-1 (0,64) coincide con la mediana de la campaña (0,64), pero el rango de 0,49 a 0,79 es el que A.7.3.5 pide usar.

5. En los sustitutos de IA, la física embebida no mejoró de forma distinguible el error en los niveles de la campaña para perfiles no vistos, y el criterio fijado en el código antes de la campaña para la física en la pérdida no se cumplió. Se distingue fuera de los datos: en una prueba de consistencia física agregada después de la ablación y fijada en el código antes de correrla, el término de baja deformación en la pérdida hace que la red reproduzca la solución lineal con un error de factor 1,02, frente a 1,38 a 1,47 de los otros cuatro modelos, que no recibieron ese límite, y la diferencia con la misma red sin ese término es −0,32 en ln AF, con intervalo que excluye el cero. La base física reduce además el error de XGBoost al cambiar la intensidad, en 0,041 al interpolar y en 0,031 al extrapolar a 1,5×. Con las dos, el sustituto informado por la física es el único de los cinco al que se le impuso el límite lineal y lo reproduce, con el mismo error que los demás en los niveles de la campaña; dar ese límite a los demás por datos no se probó, y el tramo intermedio de intensidad queda por verificar contra el MEF. Cualquiera de los sustitutos baja el error típico de la solución lineal de un factor 2,0 a entre 1,29 y 1,35.

6. Con 20 perfiles el percentil 95 de S_a(0,65 s) tiene un IC95 de ±11 % y cambia menos de 4 % desde 10 perfiles; las fracciones de excedencia tienen intervalos de ±5 a ±15 puntos. Con la familia ajustada al espectro, a la intensidad de diseño, la demanda (máximo de cuatro registros) supera S_E entre 0,5 y 1 s en 10 de los 20 perfiles (IC95 30–70 %) con percentil 84 de 1,24; con la media de los cuatro, también en 10 de 20. Esa campaña usó otro material en el flujo ($\nu = 0{,}49$) y otra calibración del saprolito, y sus cifras no se comparan directamente con las de la conclusión 1. Como la campaña de 480 casos no usa una familia normativa, y la familia ajustada no tiene origen declarado del V_{s30} de sus estaciones ni representa la fuente cortical, las conclusiones 1 a 4 se presentan como resultados paramétricos y no como criterio de diseño.

8. REFERENCIAS

AIS (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Barrientos, S., CSN Team (2018). "The seismic network of Chile". Seismological Research Letters 89(2A): 467-474.

Castro, S., Benavente, R., Crempien, J. G. F., Candia, G., de la Llera, J. C. (2022). "A consistently processed strong-motion database for Chilean earthquakes". Seismological Research Letters 93(5): 2700-2718.

Chen, T., Guestrin, C. (2016). "XGBoost: a scalable tree boosting system". Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining: 785-794.

Darendeli, M. B. (2001). "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves". Tesis doctoral, University of Texas at Austin.

Efron, B., Tibshirani, R. J. (1993). An introduction to the bootstrap. Nueva York, Chapman & Hall.

Gazetas, G. (1991). "Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations". Journal of Geotechnical Engineering 117(9): 1363-1381.

Gu, Q., Conte, J. P., Elgamal, A., Yang, Z. (2009). "Finite element response sensitivity analysis of multi-yield-surface J2 plasticity model by direct differentiation method". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 198(30-32): 2272-2285.

Imai, T., Tonouchi, K. (1982). "Correlation of N value with S-wave velocity and shear modulus". Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam: 67-72.

Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., Yang, L. (2021). "Physics-informed machine learning". Nature Reviews Physics 3(6): 422-440.

Kingma, D. P., Ba, J. (2015). "Adam: a method for stochastic optimization". 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR), San Diego. arXiv:1412.6980.

Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Upper Saddle River, Prentice Hall.

Kulhawy, F. H., Mayne, P. W. (1990). Manual on estimating soil properties for foundation design. Report EL-6800. Palo Alto, Electric Power Research Institute.

Liu, P.-L., Der Kiureghian, A. (1986). "Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances". Probabilistic Engineering Mechanics 1(2): 105-112.

Lysmer, J., Kuhlemeyer, R. L. (1969). "Finite dynamic model for infinite media". Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE 95(EM4): 859-877.

McKenna, F., Scott, M. H., Fenves, G. L. (2010). "Nonlinear finite-element analysis software architecture using object composition". Journal of Computing in Civil Engineering 24(1): 95-107.

Montejo, L. A., Suarez, L. E. (2013). "An improved CWT-based algorithm for the generation of spectrum-compatible records". International Journal of Advanced Structural Engineering 5(1): 26.

Nadeau, C., Bengio, Y. (2003). "Inference for the generalization error". Machine Learning 52(3): 239-281.

Raissi, M., Perdikaris, P., Karniadakis, G. E. (2019). "Physics-informed neural networks: a deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations". Journal of Computational Physics 378: 686-707.

SGC (2026). Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia: registros de Quetame (2008), Risaralda (1995) y Calima (1995). Bogotá, Servicio Geológico Colombiano. Consulta: septiembre de 2026.

Stewart, J. P., Fenves, G. L., Seed, R. B. (1999). "Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical methods". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 125(1): 26-37.

Stroud, M. A. (1974). "The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks". Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing, Estocolmo, 2(2): 367-375.

Yang, Z., Elgamal, A., Parra, E. (2003). "Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 129(12): 1119-1127.