Respuesta de sitio en depósitos de flujo de lodos sobre saprolito del Batolito Antioqueño

Oscar Darío Moreno Borja[1*]

[1]Gerente de Proyectos, DIADICA Proyectos e Ingeniería S.A.S., Medellín

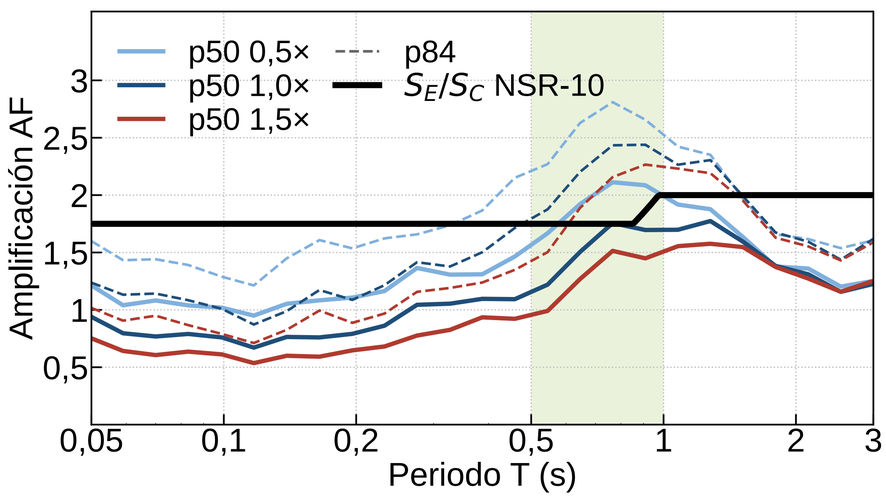
1. Resumen

Se estudia la respuesta sísmica de un flujo de lodos sobre saprolito del Batolito Antioqueño (Guarne, perfil E por Ñ) con **480 análisis no lineales** por elementos finitos verificados contra la solución analítica. Entre 0,5 y 1 s, la banda de los pórticos de 5 a 10 pisos, la mediana de la amplificación alcanza el cociente S_E/S_C de la NSR-10 y el **64 %** de las realizaciones lo supera. Los sustitutos de IA bajan el error de un factor 2,0 a 1,29–1,35; la base física reduce el error al cambiar la intensidad y, en una prueba añadida después, solo la red que recibió el límite lineal en la pérdida lo reproduce.

2. Desarrollo

Caso de referencia: Guarne, A_a = 0,15, A_v = 0,20; perfil E por Ñ (8,8–11,6); sobre el Batolito hay perfiles de C a E según el sitio. Roca de base C. Referencia: S_E/S_C = 1,75 hasta 0,85 s y 2,0 desde 0,98 s.

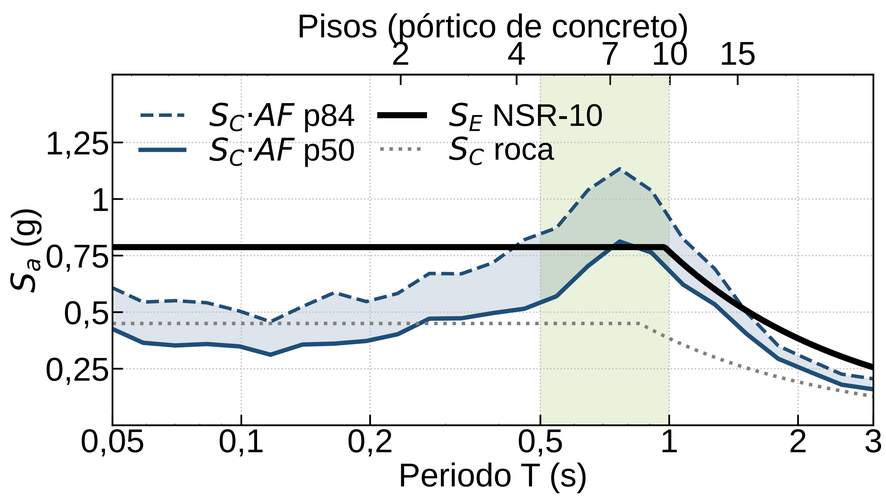
Campaña: 20 perfiles × 4 registros × 2 componentes × 3 intensidades = 480 análisis 3D.



AF por nivel frente a la norma: con la intensidad baja la mediana, no el p84.

Banda (s)	Supera	p50	p84	p95
0,05–0,2	10 %	0,54	0,77	0,95
0,2–0,5	22 %	0,65	1,04	1,26
0,5–1	**64 %**	**1,03**	**1,44**	**1,66**
1–3	40 %	0,89	1,16	1,43

Máximo de AF/(S_E/S_C) por banda y fracción que supera la norma; tres niveles juntos. Bajo 0,2 s, a la entrada de diseño: p84 0,82, p95 1,00.



Espectro implícito S_C·AF: el p84 supera la norma entre 0,46 y 1,3 s.

Familia ajustada al espectro (condicionada; rama A.2.6-7 bajo 0,18 s): a la intensidad de diseño la demanda supera S_E entre 0,5 y 1 s en **10 de 20** perfiles (IC95 30–70 %); p84 = 1,24 S_E.

Estudio paramétrico: la entrada no es una familia normativa y la familia ajustada está condicionada (flujo con ν = 0,49).

*Correspondencia: oscar@diadicaing.com

3. Procedimiento

1 Perfiles estocásticos

$$V_s = 97\, N_{60}^{0,314}\, \varepsilon_{sys}\, \varepsilon_{capa} \qquad T_0 = 4H/V_{s30}$$

2000 perfiles con cópula gaussiana; error de V_S sistemático y por capa.

2 Columna 3D en OpenSees

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z}, \qquad \tau = G(\gamma)\,\gamma$$

$$F(t) = \rho_r\, V_{s,r}\, A\, v_{aflor}(t)$$

MultiYieldSurfaceClay en el flujo, PDMY02 en el saprolito. Error ≤ 0,9 % frente a la analítica para T ≥ 0,3 s (≤ 3,4 % en periodos cortos).

3 IA informada por la ecuación de onda

Física en la estructura: el modelo aprende solo la corrección no lineal sobre la solución lineal.

$$\ln \widehat{AF} = \ln AF_{lin} + g_\theta(x,\ \ln AF_{lin})$$

Física en la pérdida: límite lineal y ablandamiento.

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{datos} + \lambda_1\, \mathcal{L}_{lin} + \lambda_2\, \mathcal{L}_{abl}$$

$$\mathcal{L}_{lin} = \langle\, [\ln \widehat{AF}(x^{(0,02)}) - \ln AF_{lin}]^2 \,\rangle$$

$$\mathcal{L}_{abl} = \langle\, \max(0,\ \partial \ln \widehat{AF}/\partial \ln I)^2 \,\rangle_{T \le 0,2\,s}$$

RMSE ln AF	XGB	XGB res	NN	NN física	Lineal
No vistos	0,263	**0,258**	0,290	0,290	0,694
→ 0,5×	0,314	0,308	0,330	0,248	0,433
→ 1,5×	0,354	**0,324**	0,359	0,354	0,880
→ 1,0×	0,344	**0,303**	0,355	0,306	0,695

Error típico: factor 2,0 → **1,29–1,35**; costo 1180 s → **< 1 s**. **Límite lineal (0,01×):** NN física, la única con él, **1,02**; demás 1,38–1,47.

4 Interacción suelo-estructura

$$T_{SSI} = T_{fijo} \sqrt{1 + k/K_x + k\, h_{ef}^2/K_\theta}$$

Pórtico de 3 pisos: T_{SSI}/T_{fijo} = 1,06–1,22; V_{SSI}/V_{fijo} = 0,59–1,13.

4. Conclusiones frente a la NSR-10

- **A.2.6:** entre 0,5 y 1 s (5–10 pisos) el p84 supera S_E en 44 %; bajo 0,2 s (1 piso), a la entrada de diseño, p84 = 0,82 y p95 = 1,00.
- **A.2.4.5.3:** si un V_{s30} medido fuera el de la población, 12 de 20 perfiles pasarían a D (S_D/S_C = 1,25) y 11 lo superan. V_S sirve para T_0.
- **A.2.10:** estudio de sitio si T está entre 0,8 y 2,05 T_0; con la media que pide la norma el sitio queda en 1,02 S_E, con el p84 en 1,44.
- **A.7 y A-2:** con S_E la interacción solo reduce; con el espectro de sitio aumenta el cortante en 22 % de los casos. G/G_{max} 0,49–0,79 frente a 0,64 de la tabla.
- **IA:** en una prueba añadida, solo la red a la que se impuso el límite lineal en la pérdida lo reproduce; la base física reduce el error al cambiar la intensidad.

5. Referencias

[1] AIS (2010). NSR-10.
[2] Raissi et al. (2019). J. Comput. Phys. 378.
[3] Karniadakis et al. (2021). Nat. Rev. Phys. 3.
[4] Yang et al. (2003). J. Geotech. Geoenviron. Eng. 129(12).

Congreso Colombiano de Geotecnia
Sociedad Colombiana de Geotecnia
ICEIG Instituto Colombiano de Ensayos e Investigaciones Geotécnicas
Universidad de Medellín
Vigilada MinEducación