

Modelación de Efectos de Sitio en Simulaciones del Movimiento Sísmico del Terreno: Aprendiendo de Pequeños Terremotos en Nueva Zelanda

Felipe Kuncar¹

Brendon Bradley¹, Chris de la Torre¹, Adrian Rodriguez-Marek²,
Chuanbin Zhu¹, Robin Lee¹

¹University of Canterbury, Nueva Zelanda

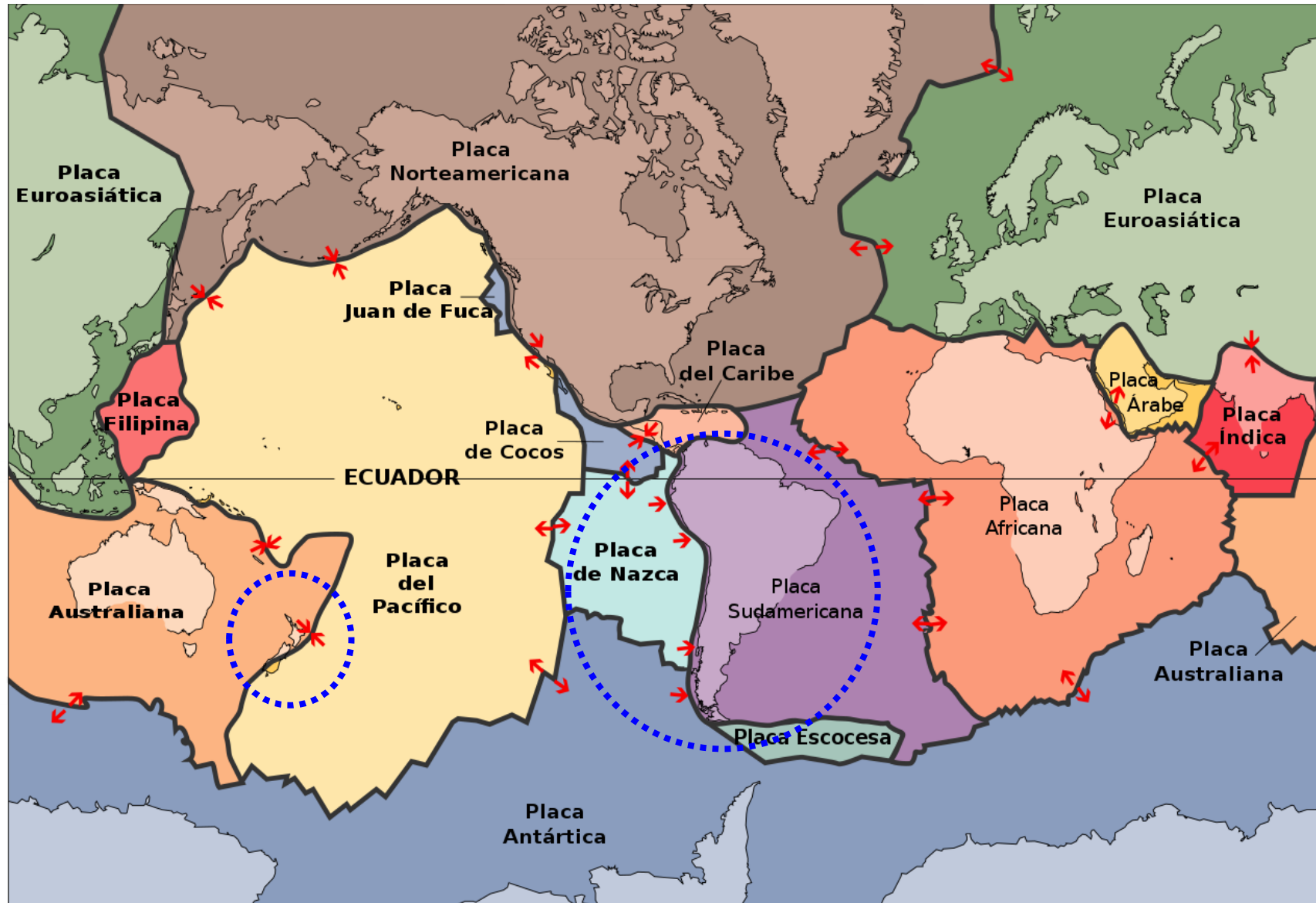
²Virginia Tech, Estados Unidos

Índice

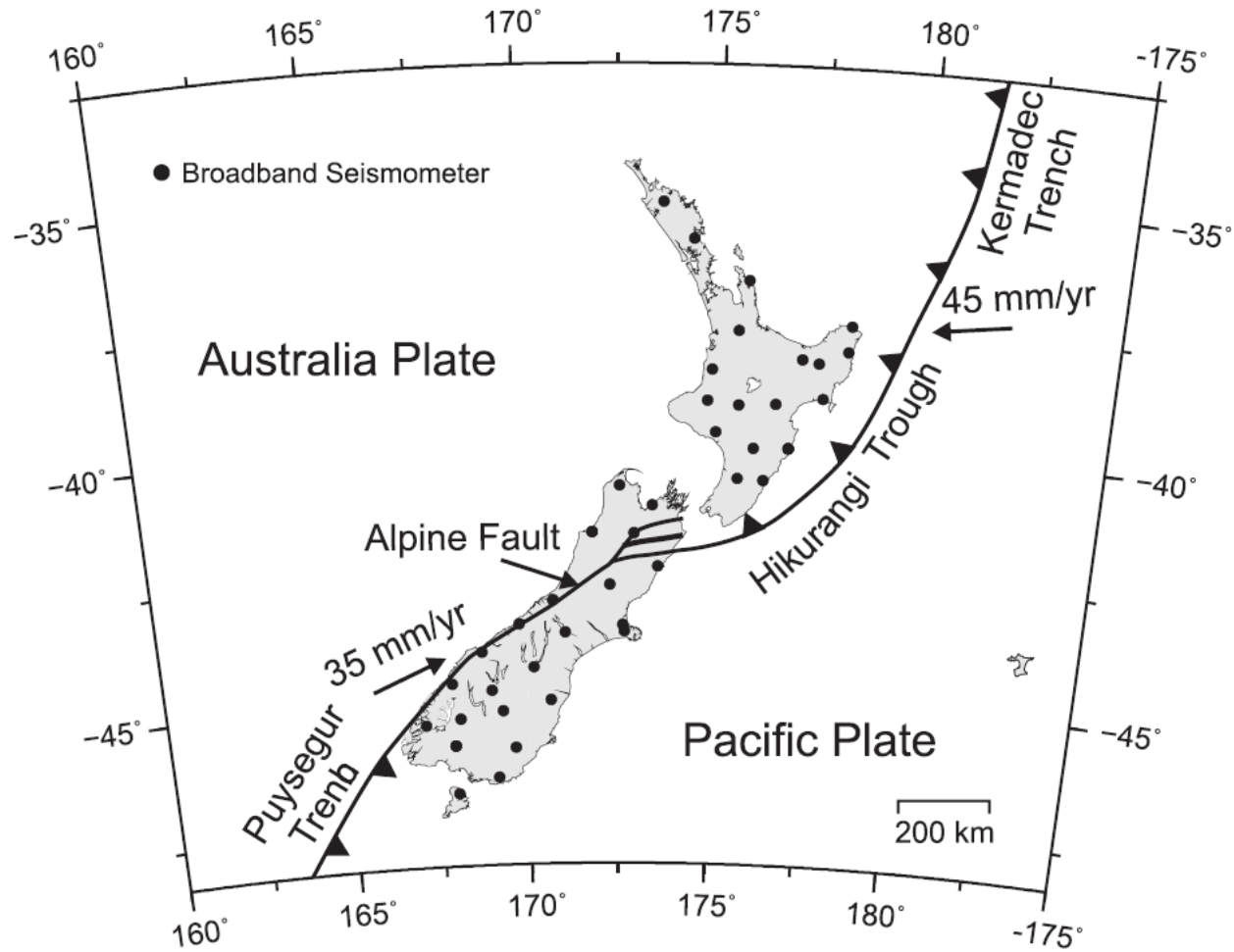
1. Nueva Zelanda y Grupo de Investigación
2. Motivación para Explorar el uso de Simulaciones
3. Modelación de Efectos de Sitio en Simulaciones
4. Estudio de Validación en Curso

1. Nueva Zelanda y Grupo de Investigación

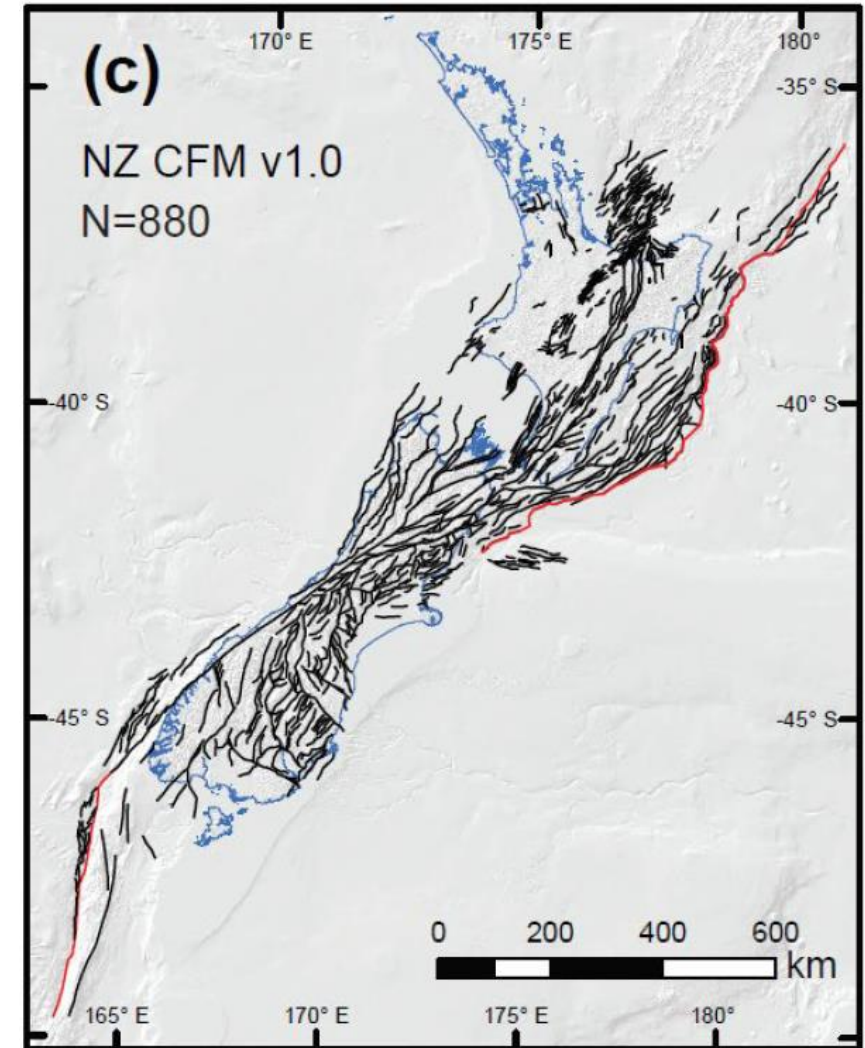
Configuración Tectónica de Nueva Zelanda



Configuración Tectónica de Nueva Zelanda



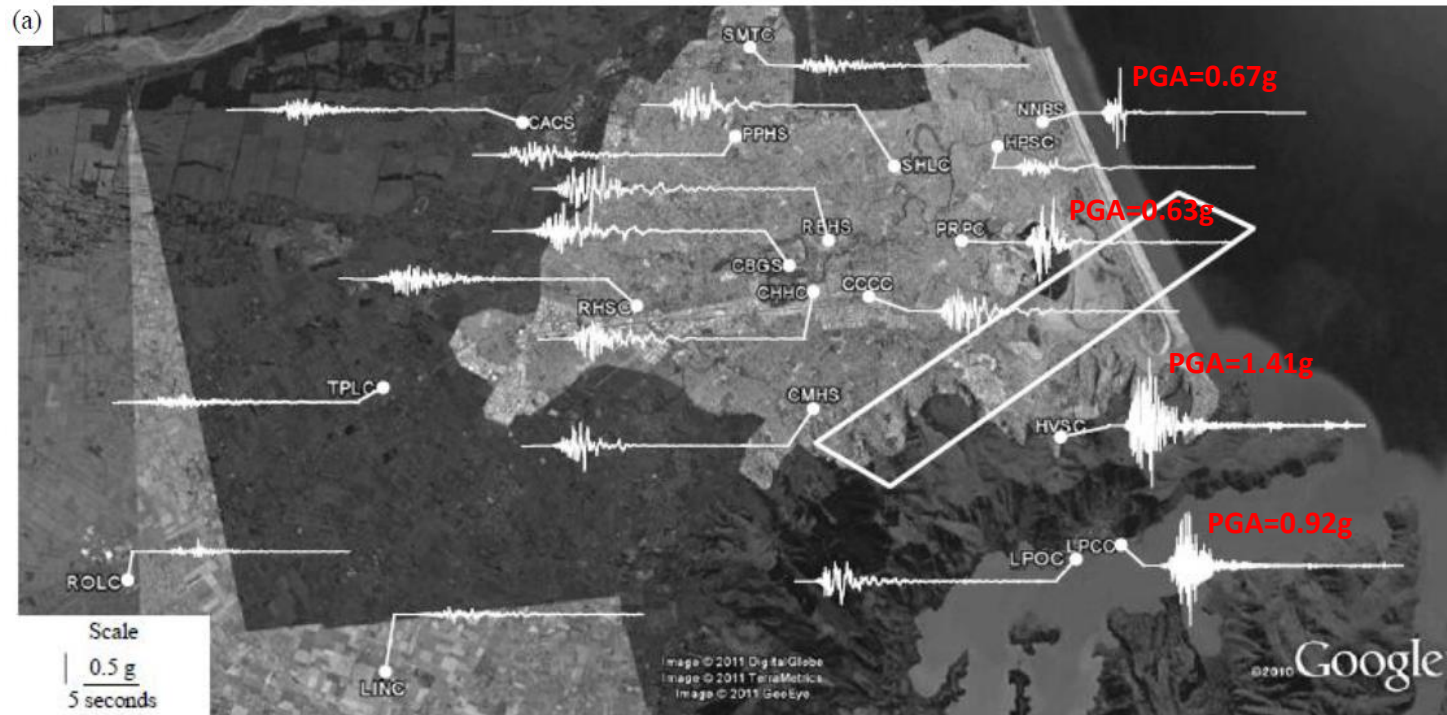
Ristau (2008)



Seebeck et al. (2022)

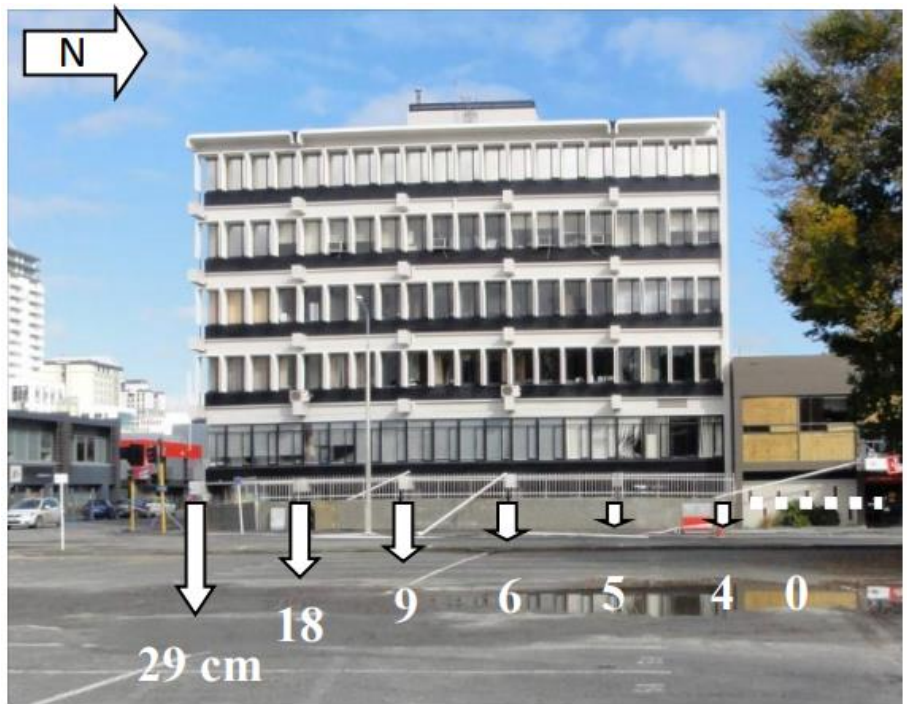
Secuencia de Terremotos de Canterbury de 2010-2011

- Serie de terremotos entre Septiembre de 2010 y Diciembre de 2011, incluyendo el terremoto de Darfield (Mw 7.1) y otros de magnitud 6.2, 6.0, 5.9, y 5.8
- Daño material: ~US\$ 40 B (Quigley et al., 2016)
- Terremoto de Christchurch de 2011 (Mw 6.2): 185 muertes y ~US\$ 15 B (Quigley et al., 2016)



Bradley & Cubrinovski (2011)

Secuencia de Terremotos de Canterbury de 2010-2011



GEER Report (2011)



QuakeCoRE: Centro de Resiliencia Sísmica de Nueva Zelanda



QuakeCoRE

NZ Centre for Earthquake Resilience

Te Hiranga Rū

QuakeCoRE is a Centre of Research Excellence (CoRE) funded by the New Zealand Tertiary Education Commission (TEC)

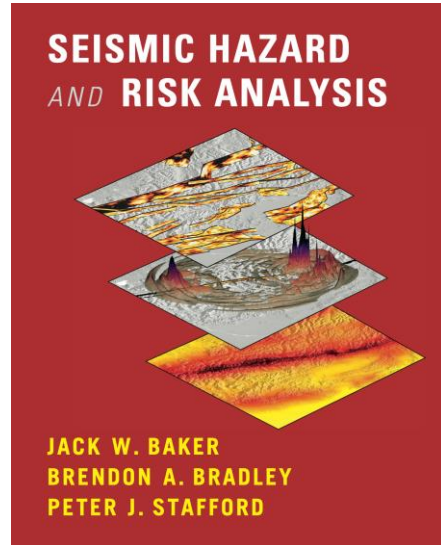
<http://www.quakecore.nz/>



Grupo de Investigación



Prof. Brendon Bradley
Director de QuakeCoRE



Castle Hill, Nueva Zelanda, Enero 2023

Papers y Oportunidades de Investigación: <https://sites.google.com/site/brendonabradley/>

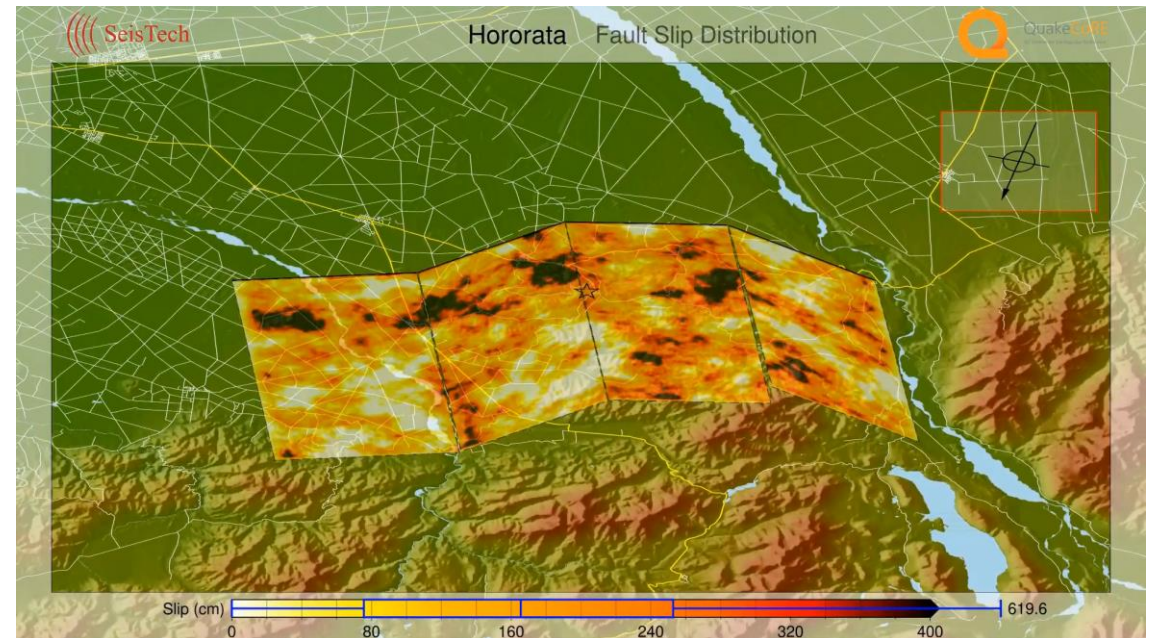
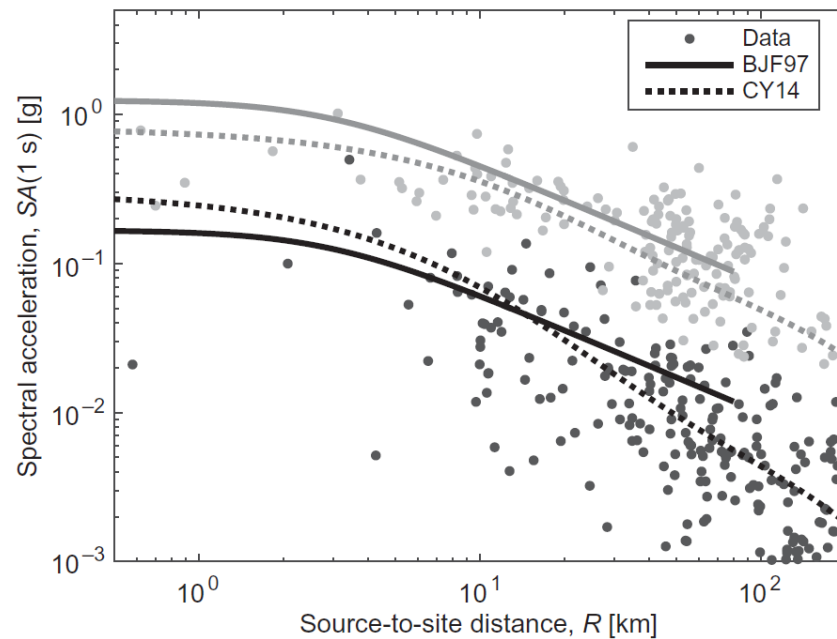
2. Motivación para Explorar el Uso de Simulaciones

Motivación

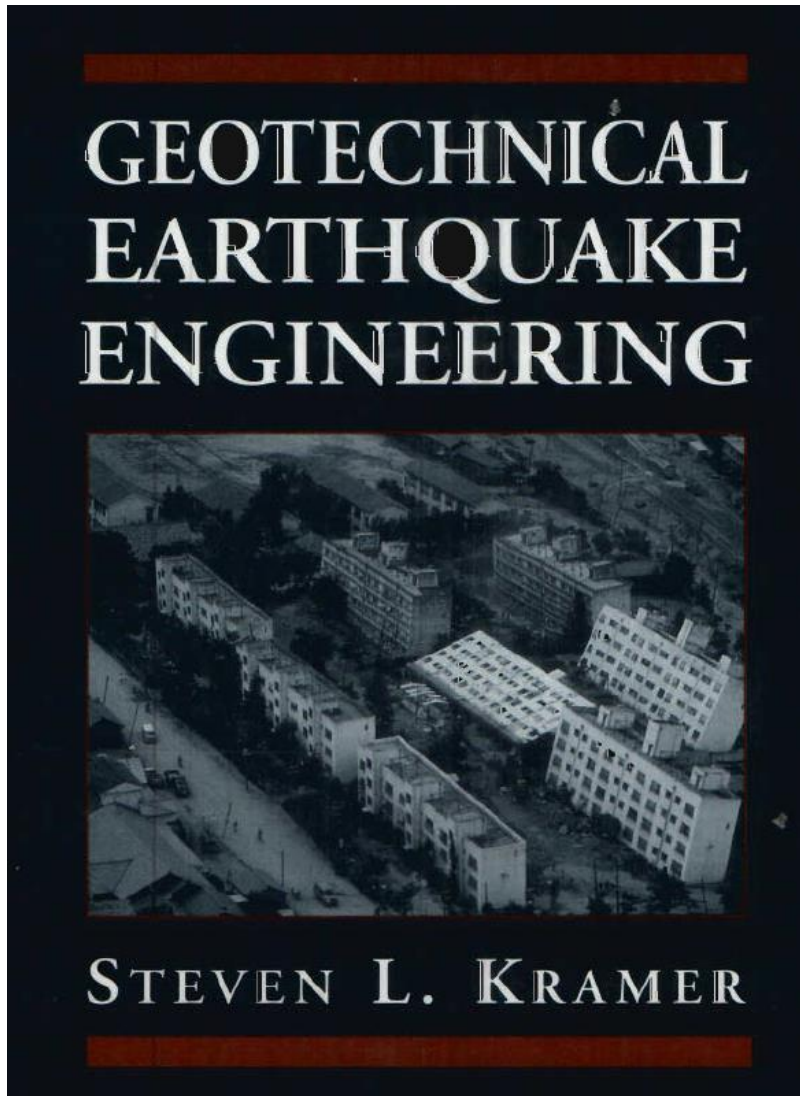


Modelos Empíricos
Empirical GMMs / GMPEs

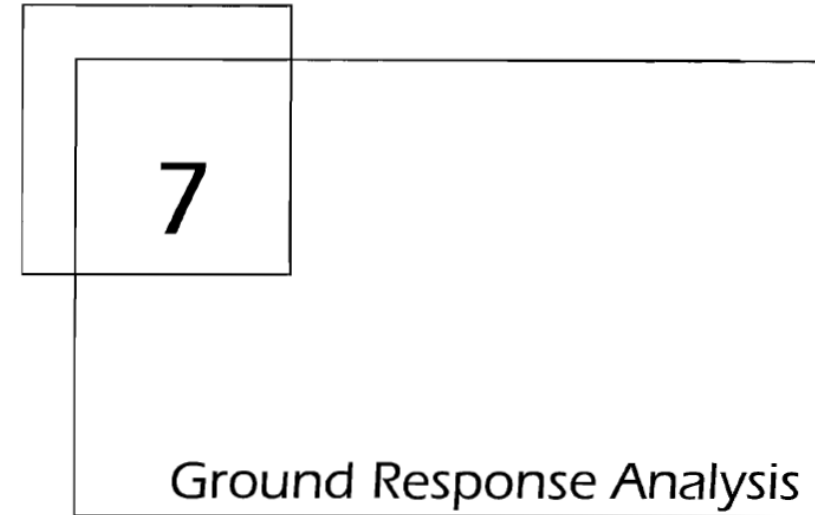
Simulaciones
Physics-Based Ground-Motion Simulations



Motivación



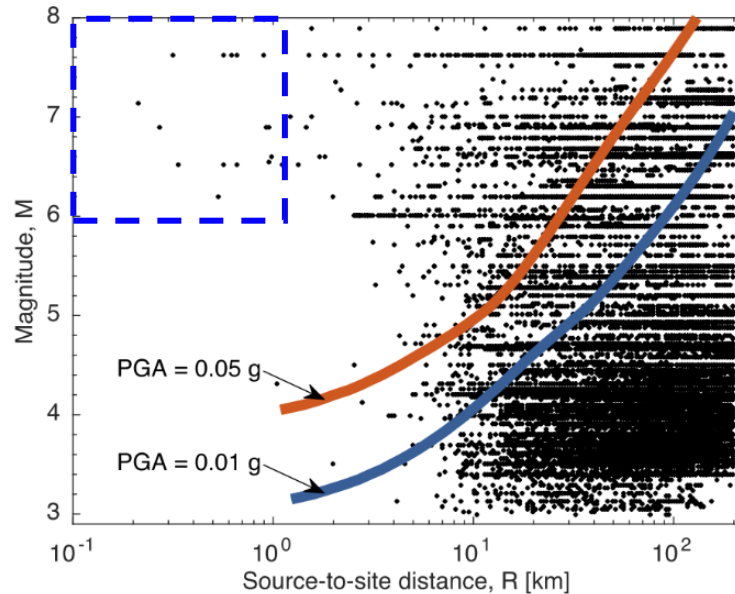
Kramer (1996)



“En condiciones ideales, un análisis completo de la respuesta de sitio modelaría el mecanismo de ruptura de un terremoto, la propagación de las ondas a través de la tierra hasta la parte superior del lecho rocoso debajo de un sitio en particular, y luego determinaría cómo el movimiento de la superficie del terreno está influenciado por los suelos que se encuentran sobre el lecho rocoso. En la realidad, el mecanismo de ruptura de fallas es tan complejo y la naturaleza de la transmisión de energía entre la fuente y el sitio es tan incierta que este enfoque no es práctico para aplicaciones de ingeniería comunes”

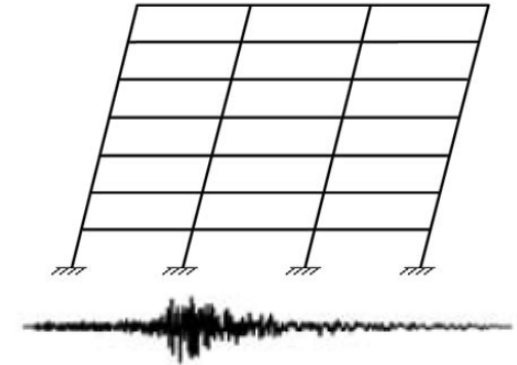
¿Por qué explorar el uso de Simulaciones?

1. Falta de Registros de Gran Amplitud



2. Creciente utilización de Series de Tiempo

Análisis
Tiempo-Historia



3. Modelación Explícita de la Física del Problema

Potencial generación de
predicciones más exactas y precisas

¿Por qué explorar el uso de Simulaciones?

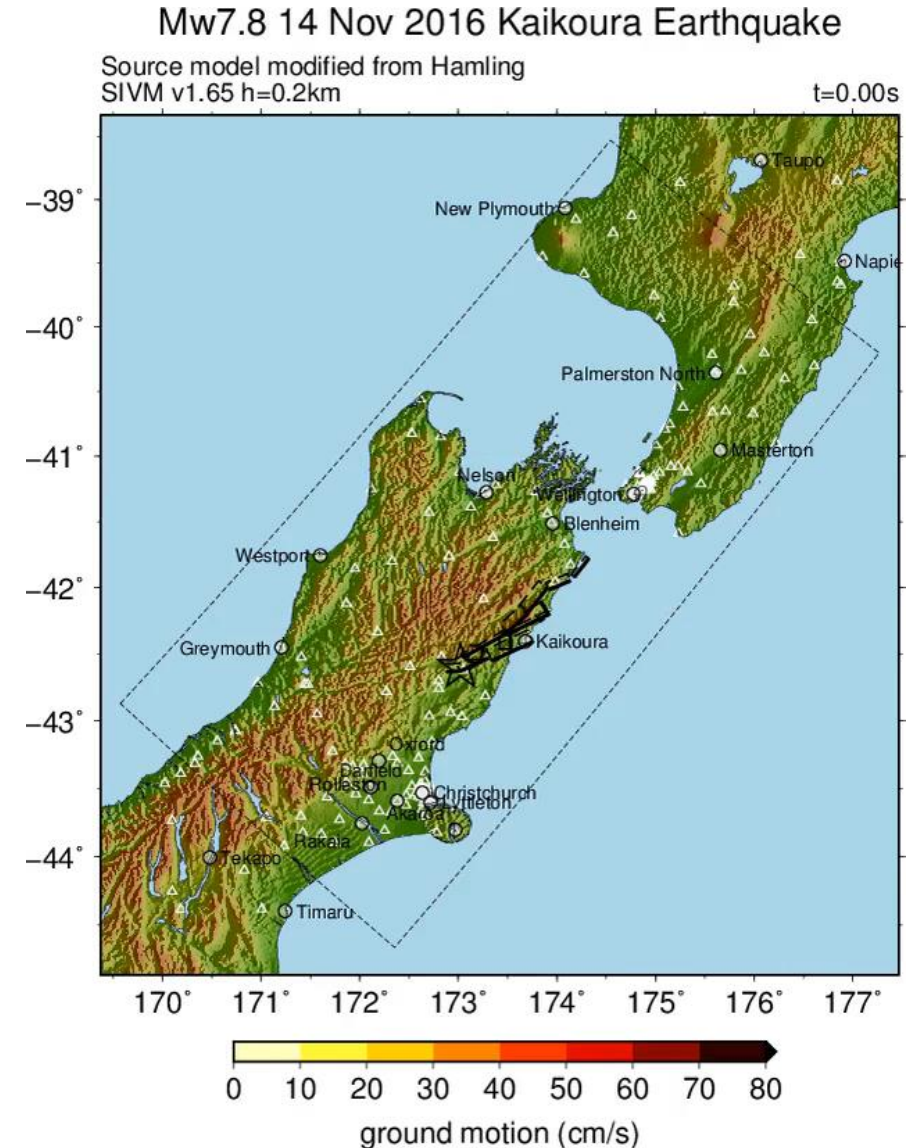
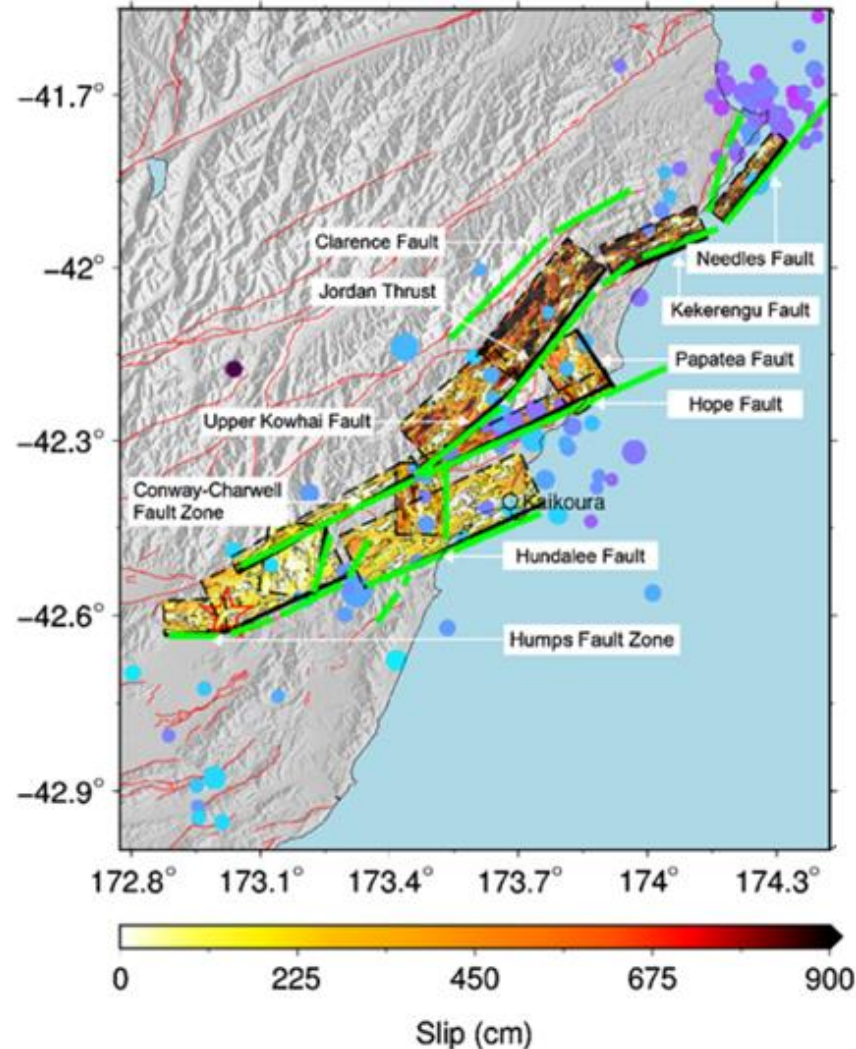
Ejemplo 1:

Simulación del
Terremoto de Kaikoura
de 2016 (Mw 7.8)

Bradley et al. (2017a)

- Ruptura multi-falla
- Efectos de Directividad

Modelos Empíricos no
tienen la capacidad de
capturar todas estas
particularidades

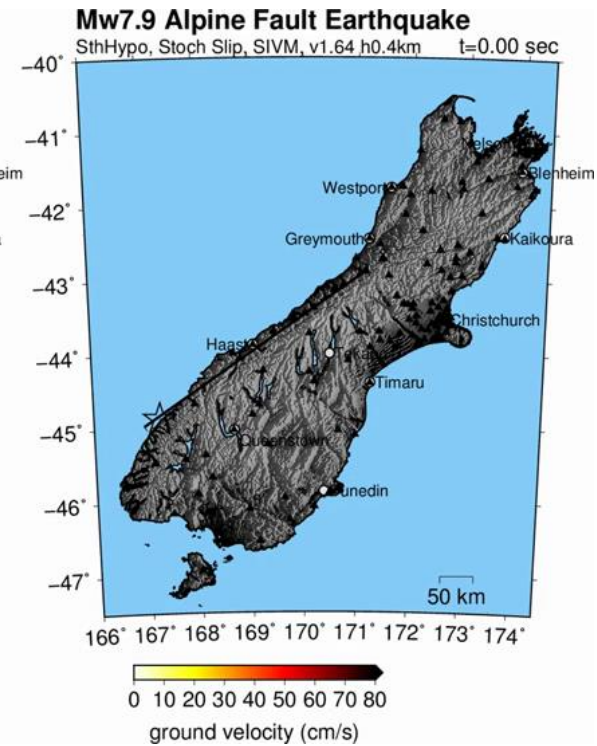
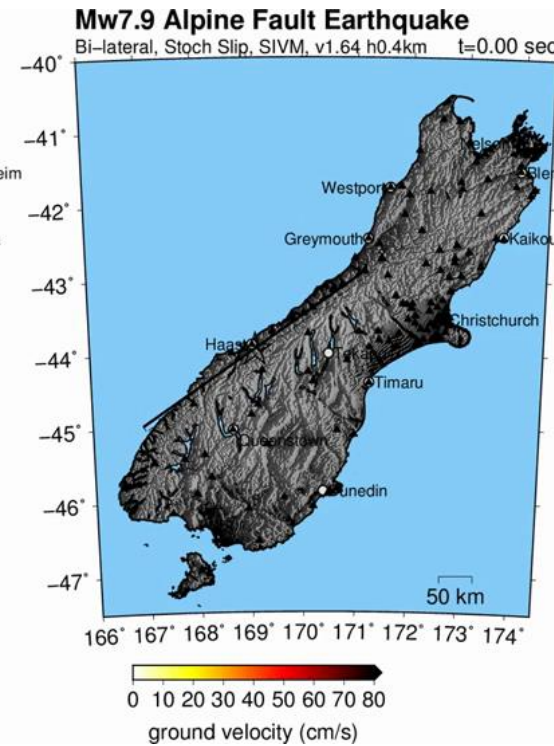
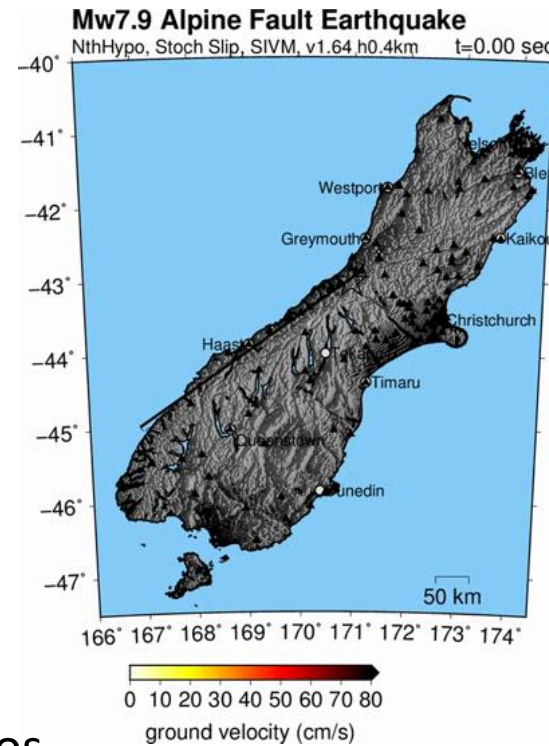
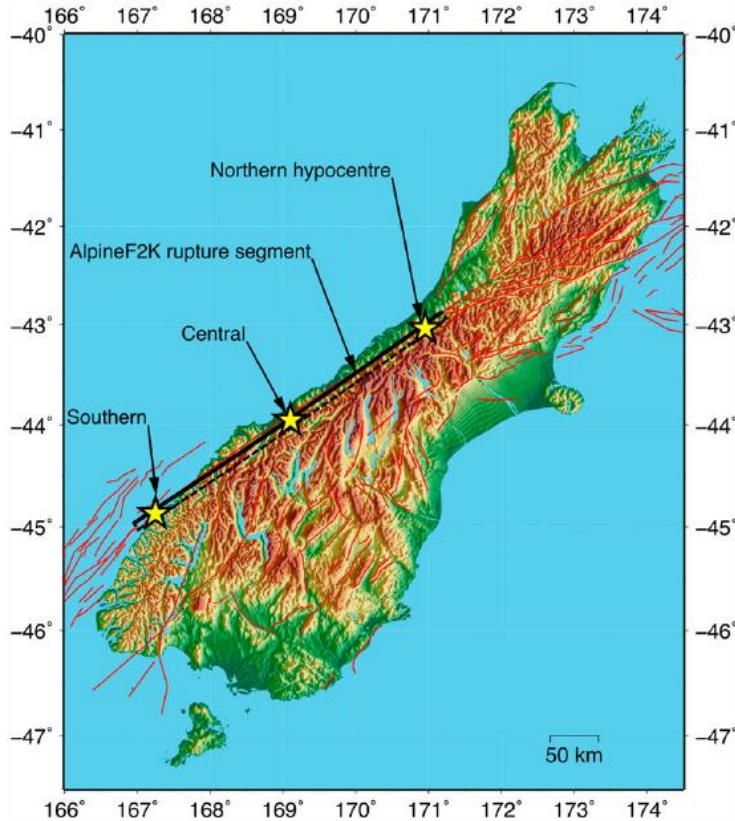


¿Por qué explorar el uso de Simulaciones?

Ejemplo 2: Simulaciones de Escenarios de Terremotos en la Falla Alpina

Bradley et al. (2017b)

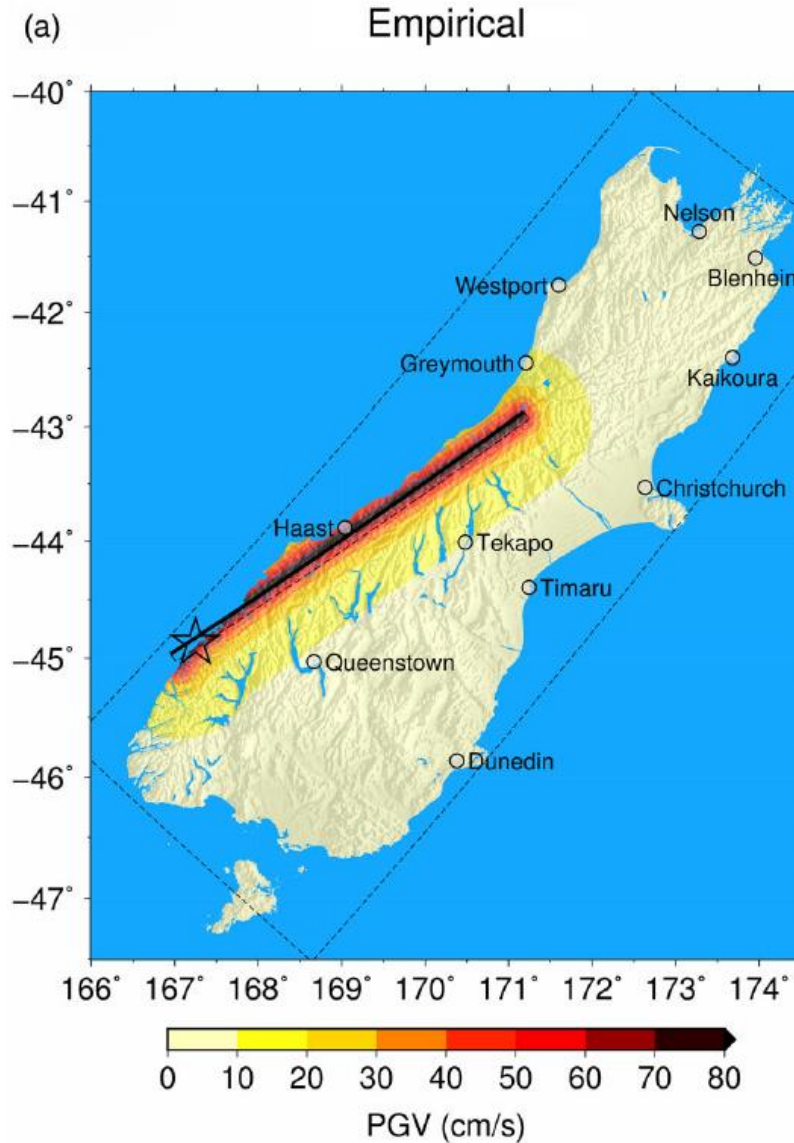
3 escenarios:



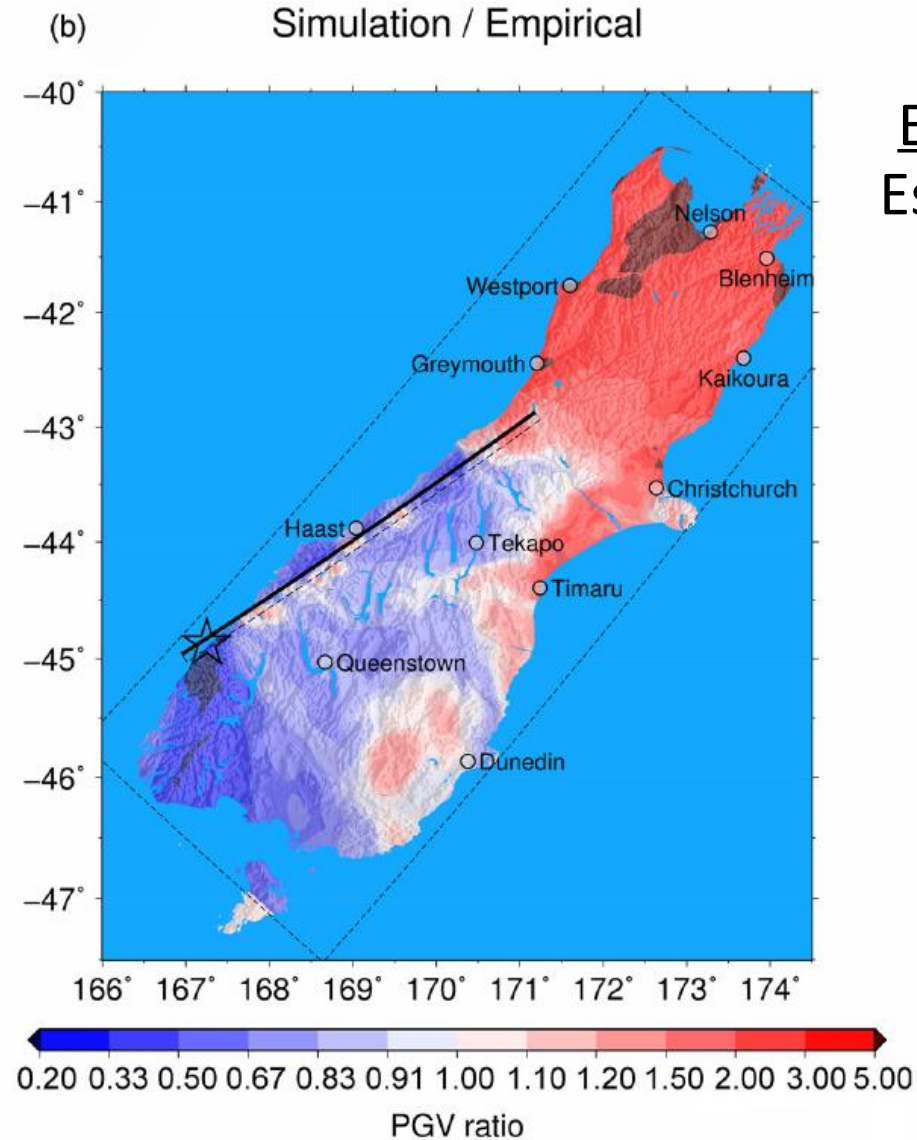
- Gran terremoto cada 300-500 años
- Último fue en 1717

https://www.youtube.com/watch?v=FxiHB0FJF5k&ab_channel=

¿Por qué explorar el uso de Simulaciones?



Chiou & Youngs (2008)



Escenario 3: hipocentro al sur

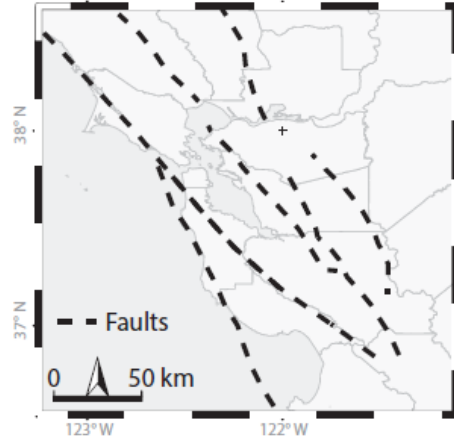
Ejemplo 2: Simulaciones de Escenarios de Terremotos en la Falla Alpina

Bradley et al. (2017b)

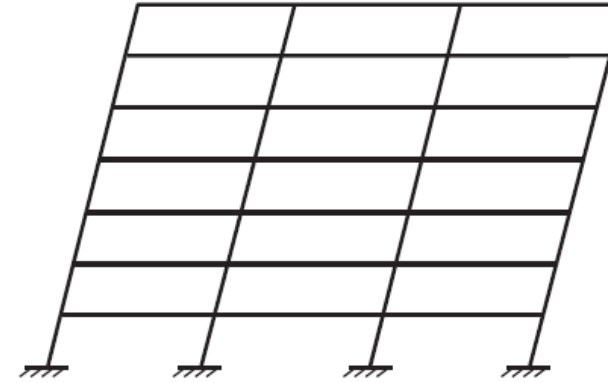
Efectos de directividad y de cuenca son explícitamente modelados en la simulación

Uso de Simulaciones en Ingeniería

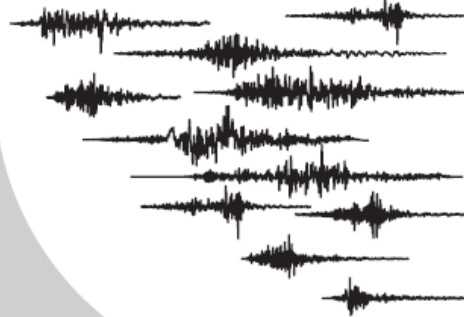
Seismic Sources



Structural Performance

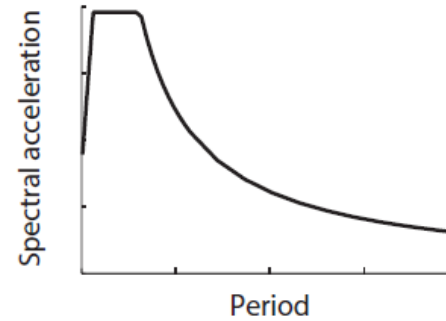


Ground Motions

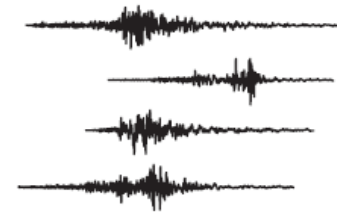


Hazard Analysis

Target Response Spectrum



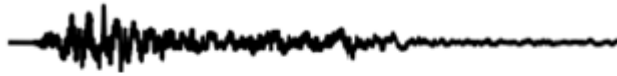
Ground Motions



Response-History Analysis

Validación

Observación



Simulación

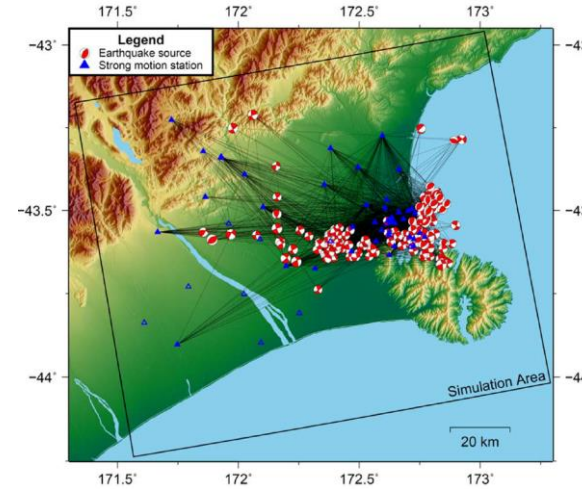


¿Cuáles son las causas que explican la diferencia entre la observación y la simulación?

Múltiples terremotos y sitios

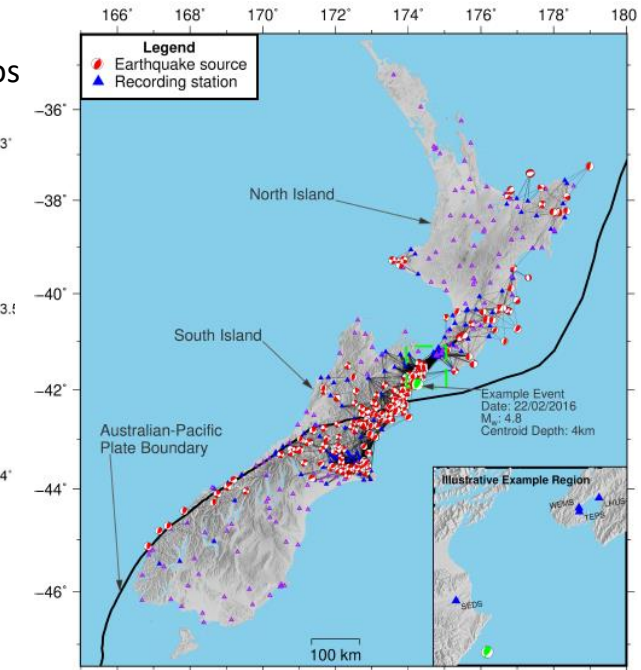
Lee et al. (2020)

148 Eventos de Baja Magnitud | 43 Sitios



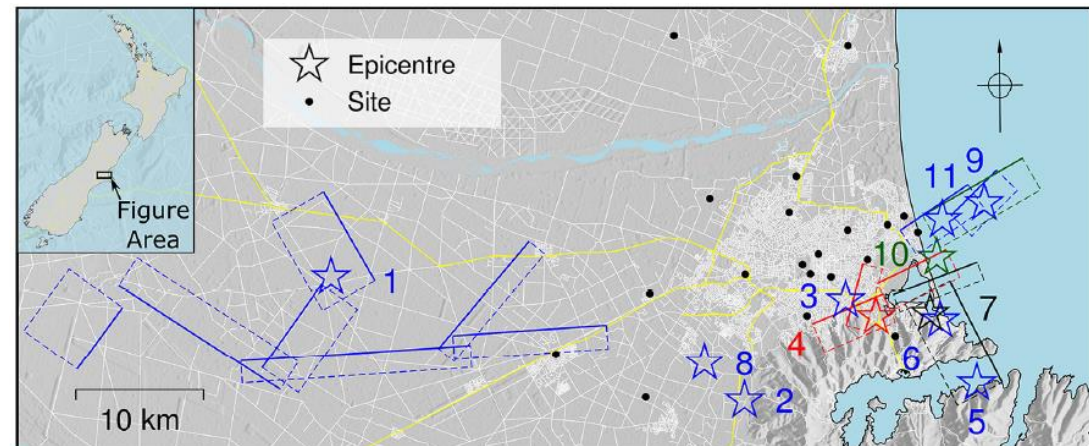
Lee et al. (2022)

479 Eventos de Baja Magnitud | 212 Sitios



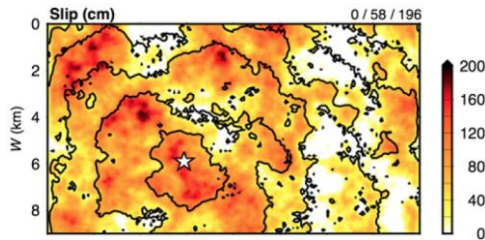
de la Torre et al. (2020)

11 Eventos Significativos | 20 Sitios



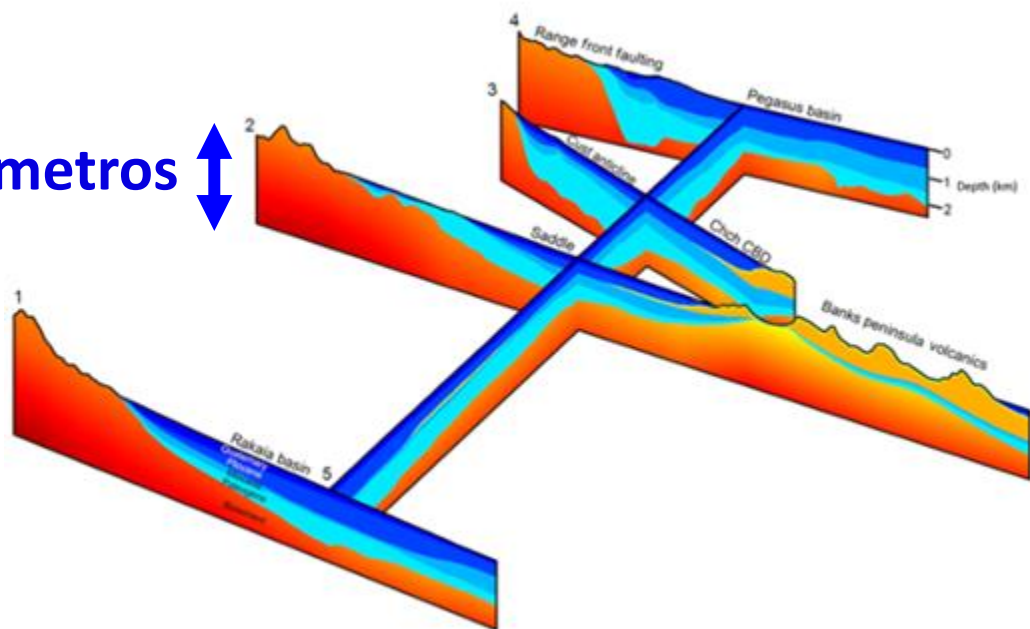
3. Modelación de Efectos de Sitio en Simulaciones

Foco de Investigación



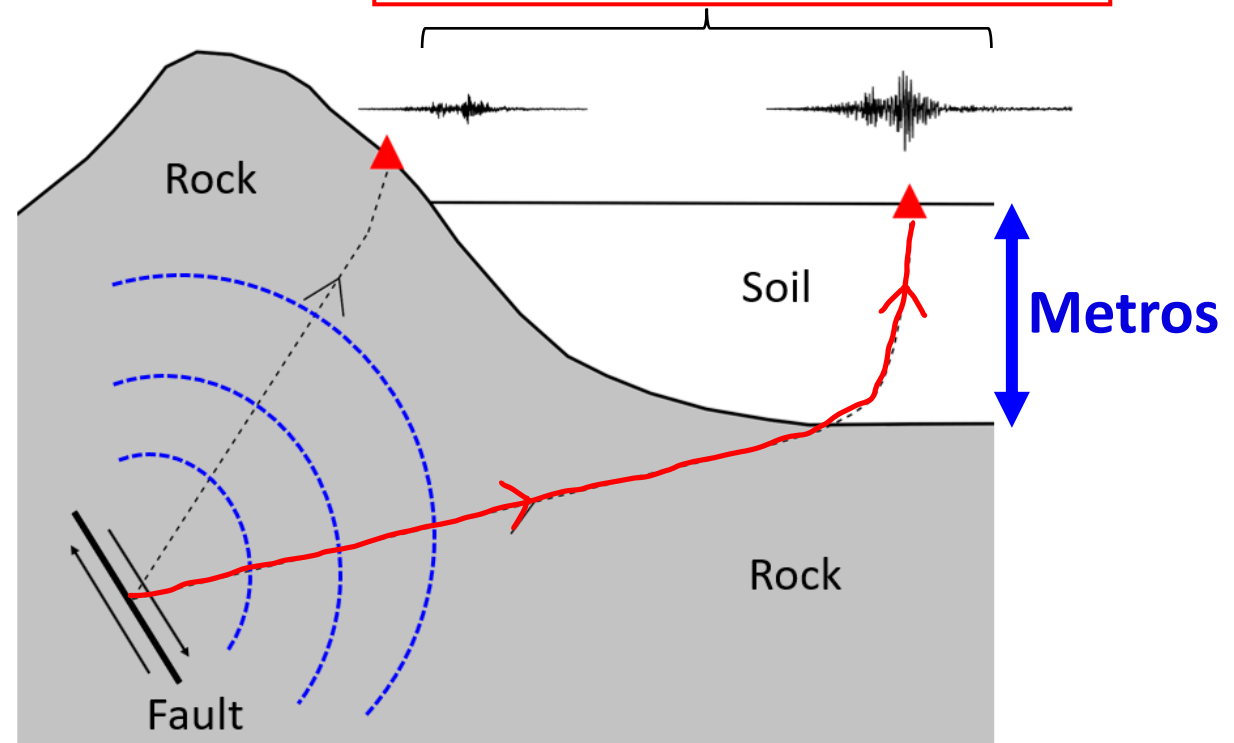
1. Fuente

Kilómetros



2. Trayectoria

3. Efectos Locales de Sitio



Desafío: Fenómeno Multi-Escala

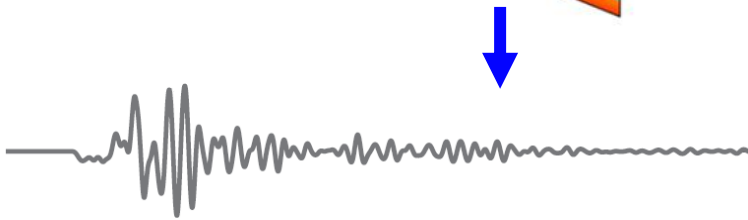
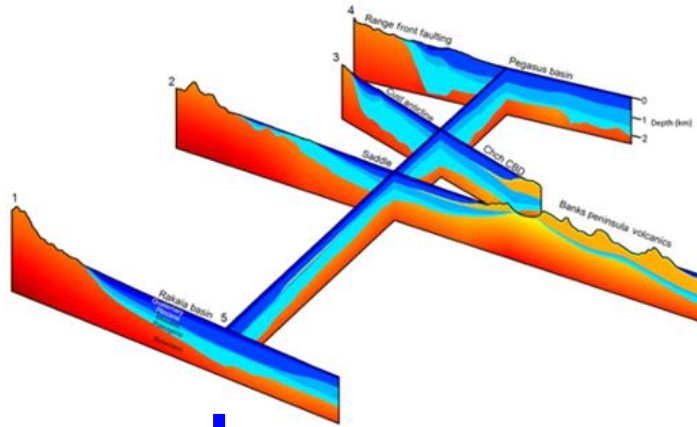
Simulaciones Híbridas

Método de Graves & Pitarka (2010, 2015, 2016)

Bajas Frecuencias (LF)

Propagación Sísmica 3D

Modelo de
Velocidad 3D
de Nueva Zelanda
(Thompson et al., 2020)

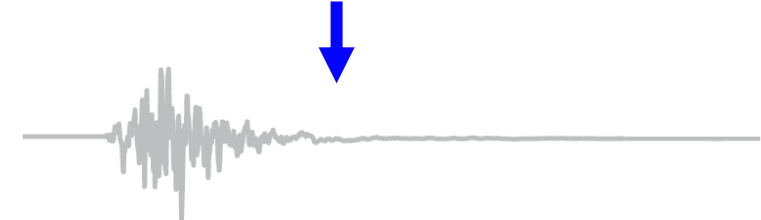
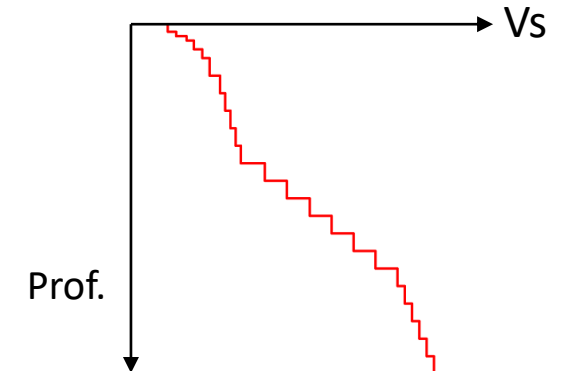


← 1 Hz →
(este estudio)

Altas Frecuencias (HF)

Física Simplificada ~ 1D

Perfil de Vs
Regional

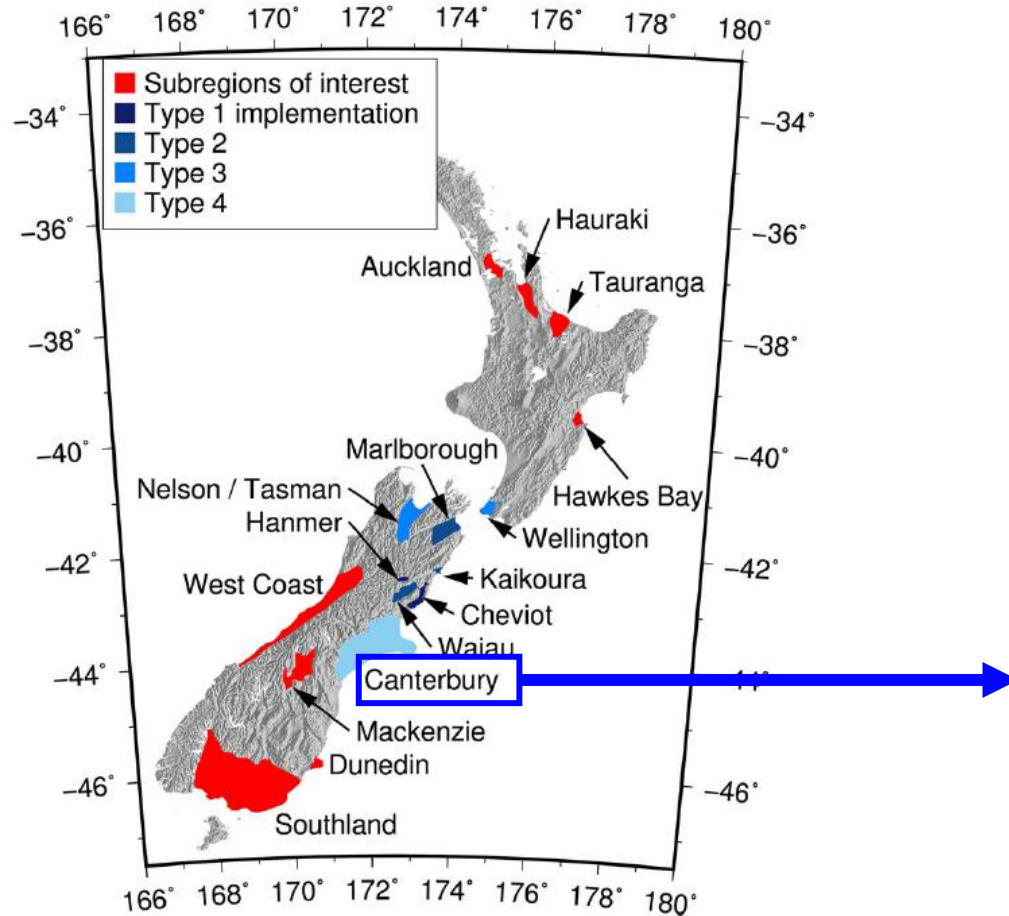


Banda Ancha (BB)



Modelo de Velocidad de Nueva Zelanda 3D

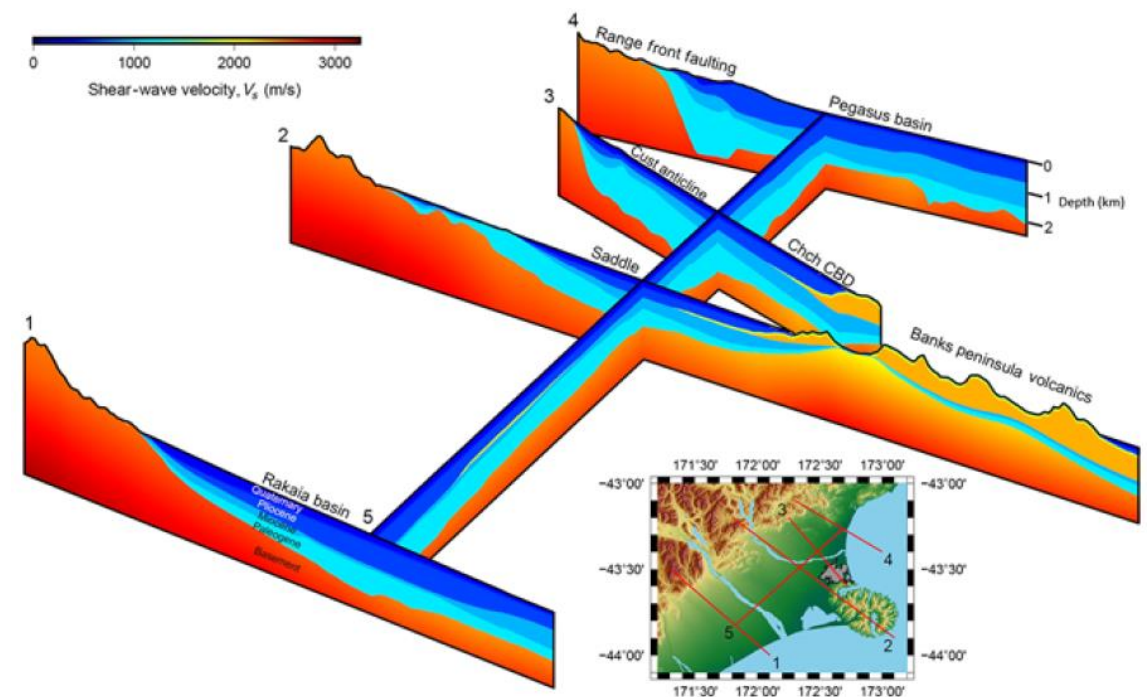
Modelo basado en tomografía de tiempo de viaje con varios sub-modelos de cuenca embebidos



Thomson et al. (2020)

Región de Canterbury - Tipo 4

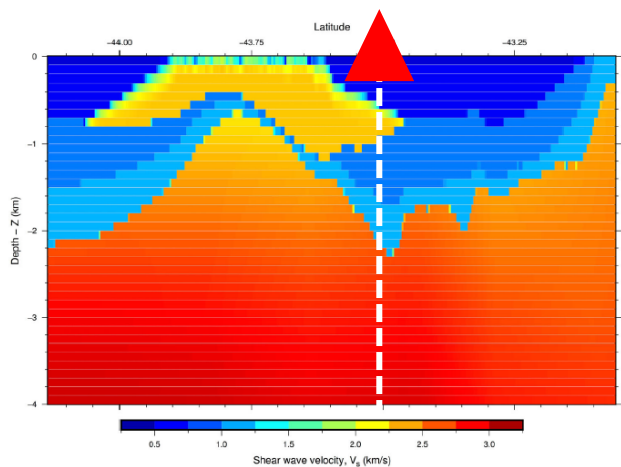
Calibrado con una densa red de líneas de reflexión sísmica, registros de pozos de petróleo y agua, datos de CPT y mapas geológicos



Lee et al. (2017)

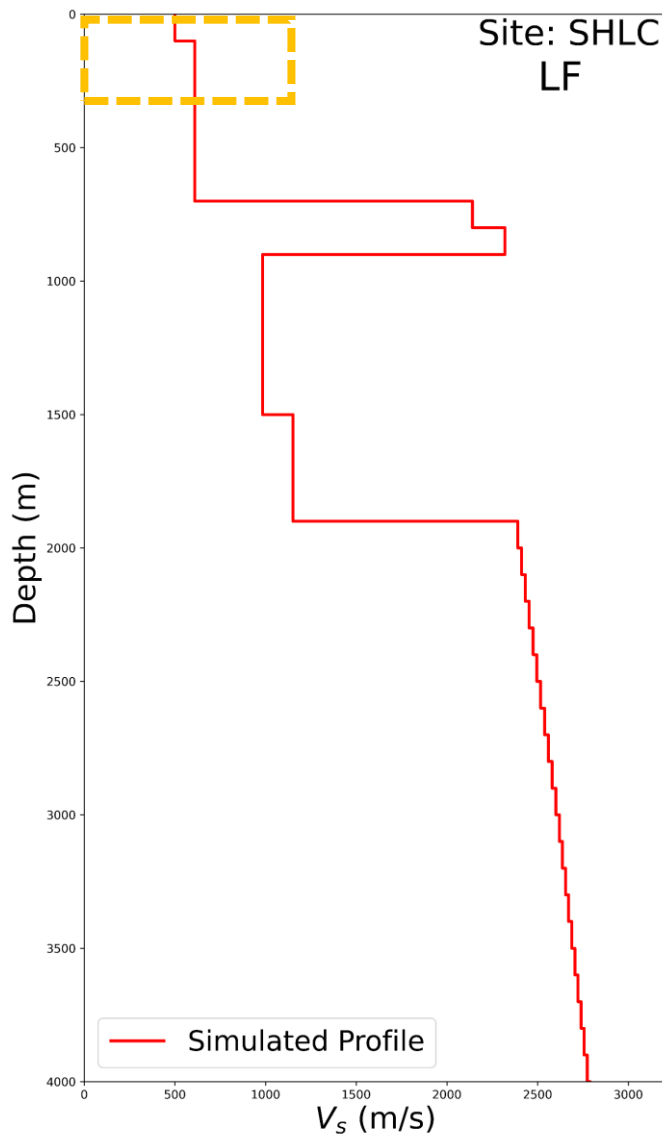
Ejemplo de Perfiles V_s “Simulados”

Sitio “SHLC”

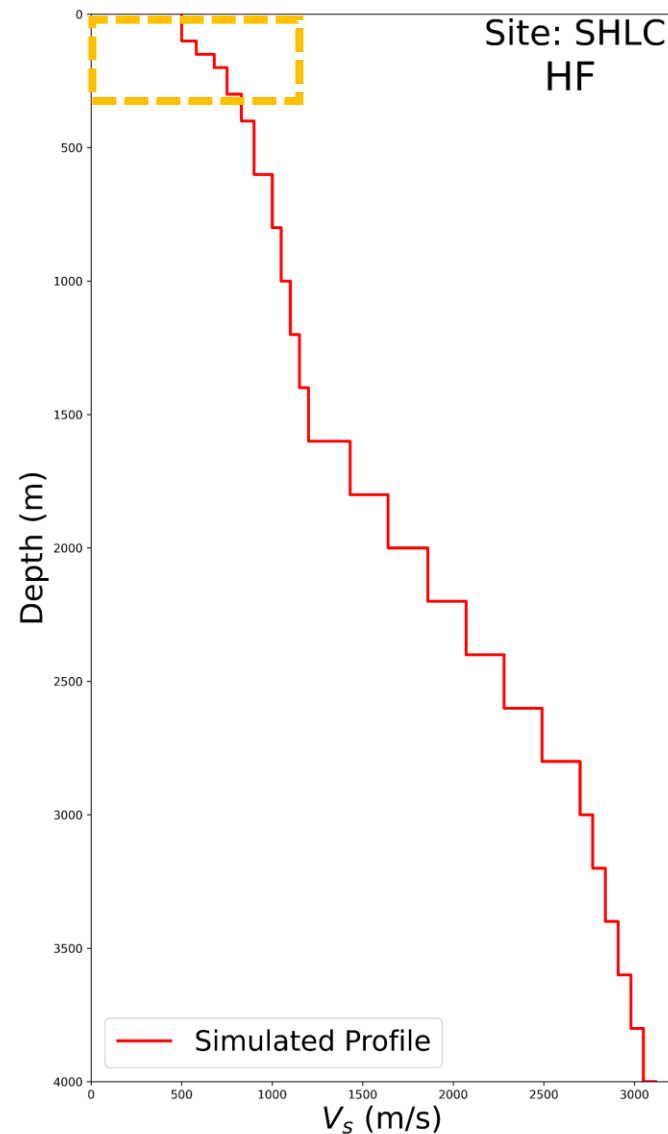


[Posición aproximada]

Bajas Frecuencias (LF)



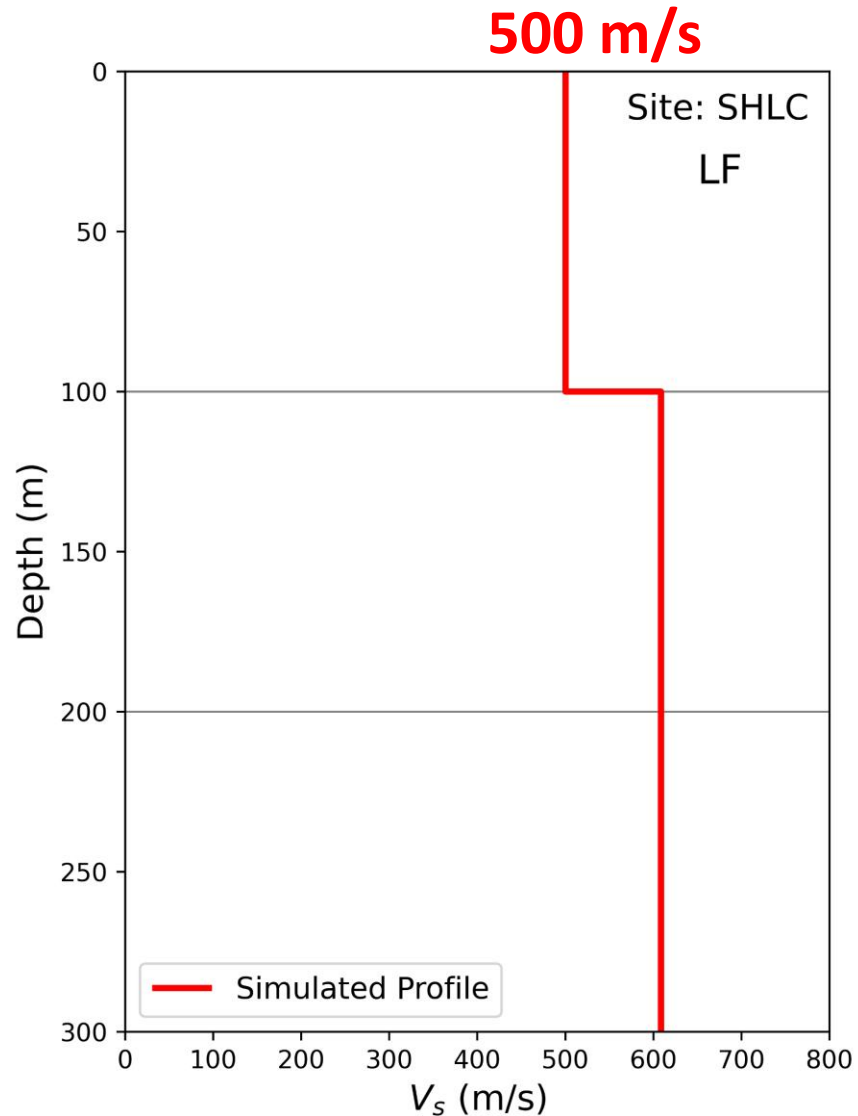
Altas Frecuencias (HF)



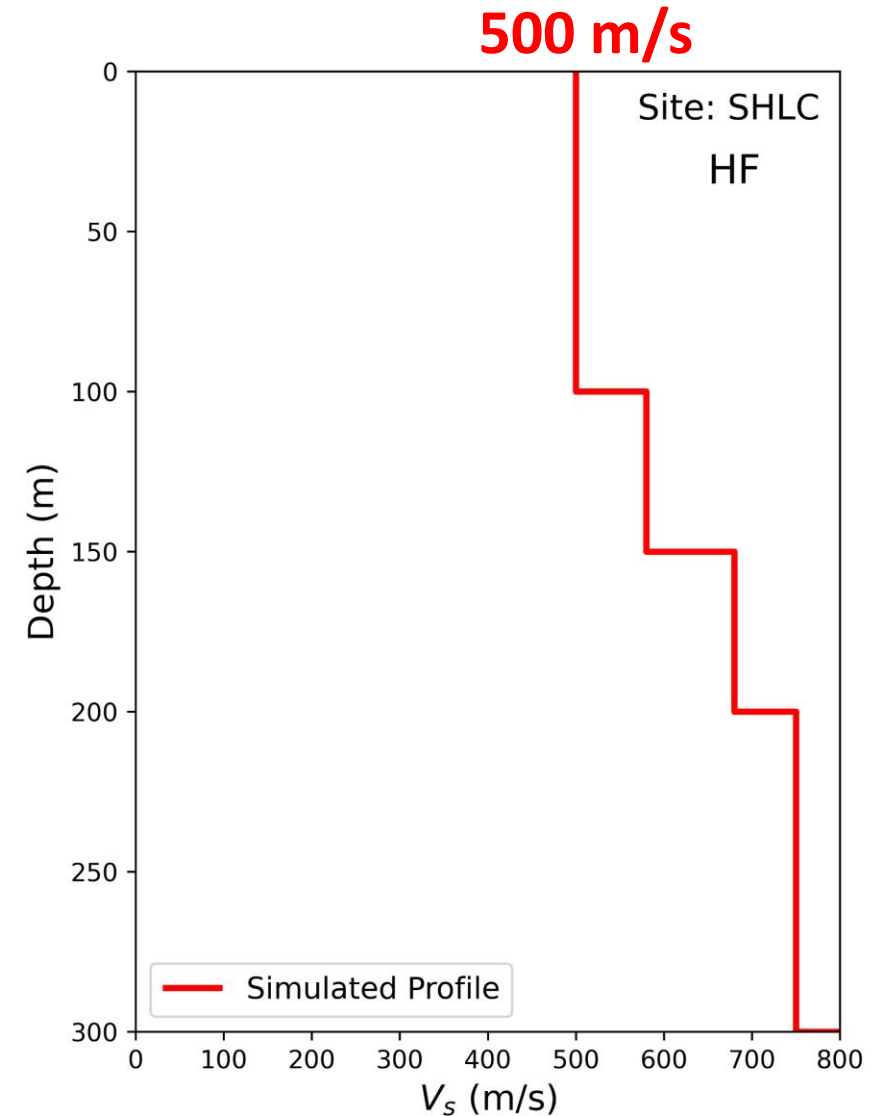
Perfil
Regional

Limitaciones de las Simulaciones

Bajas Frecuencias (LF)

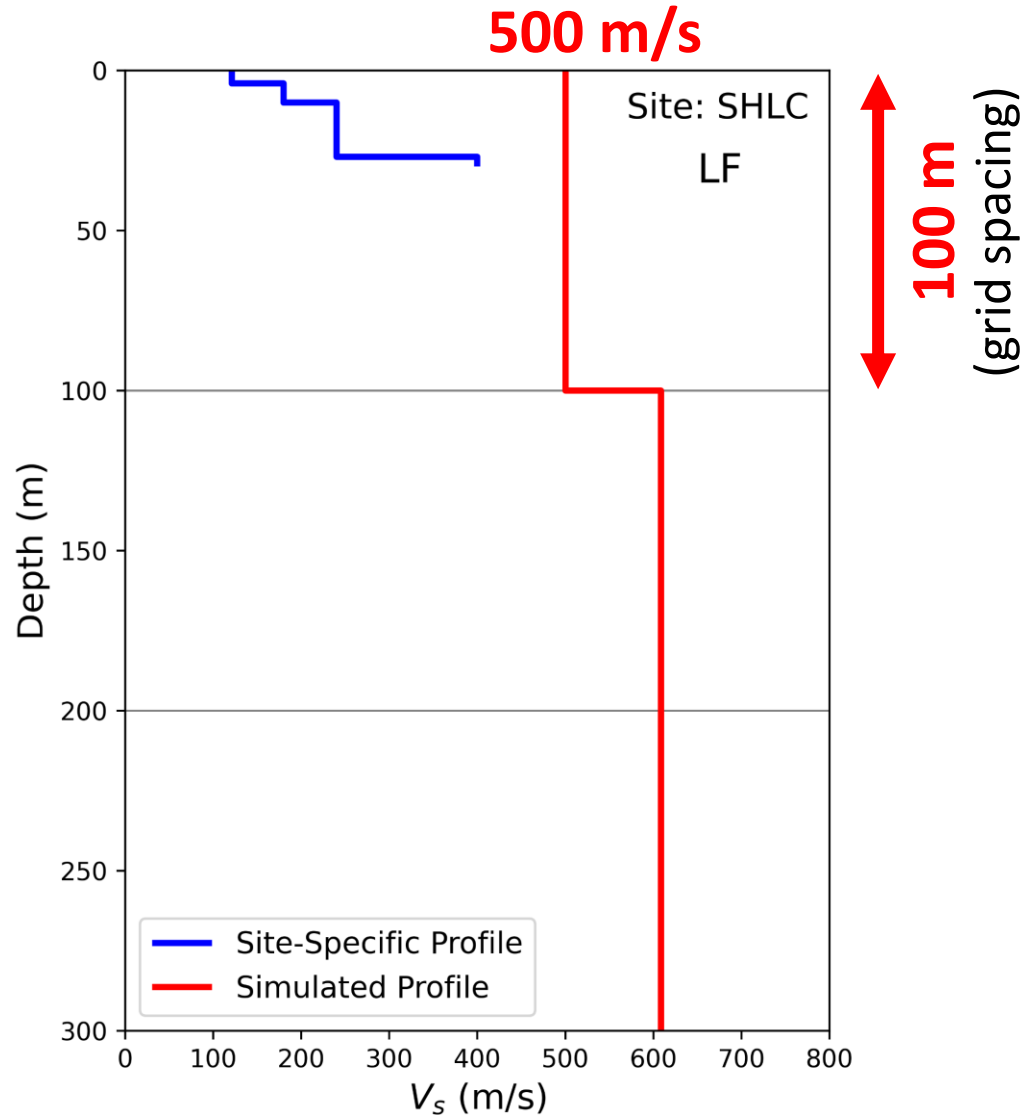


Altas Frecuencias (HF)

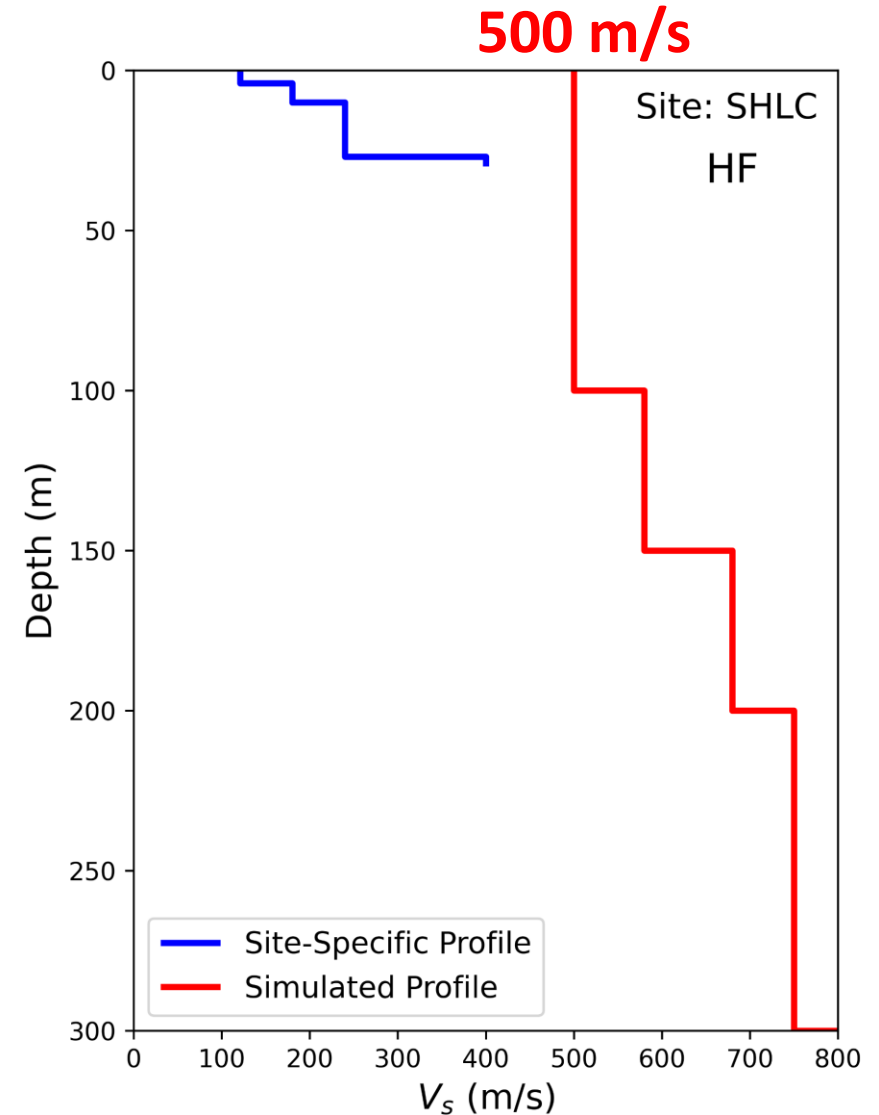


Limitaciones de las Simulaciones

Bajas Frecuencias (LF)

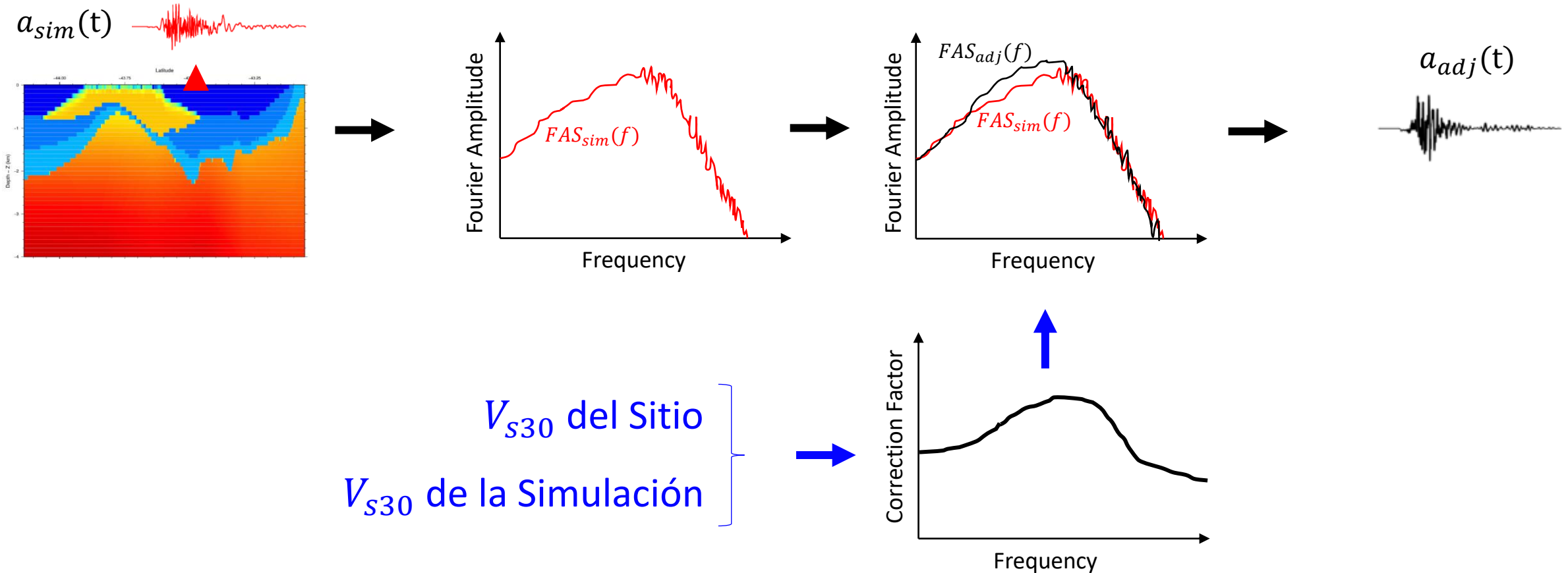


Altas Frecuencias (HF)



Enfoque Estándar (basado en Vs30) para capturar Efectos de Sitio

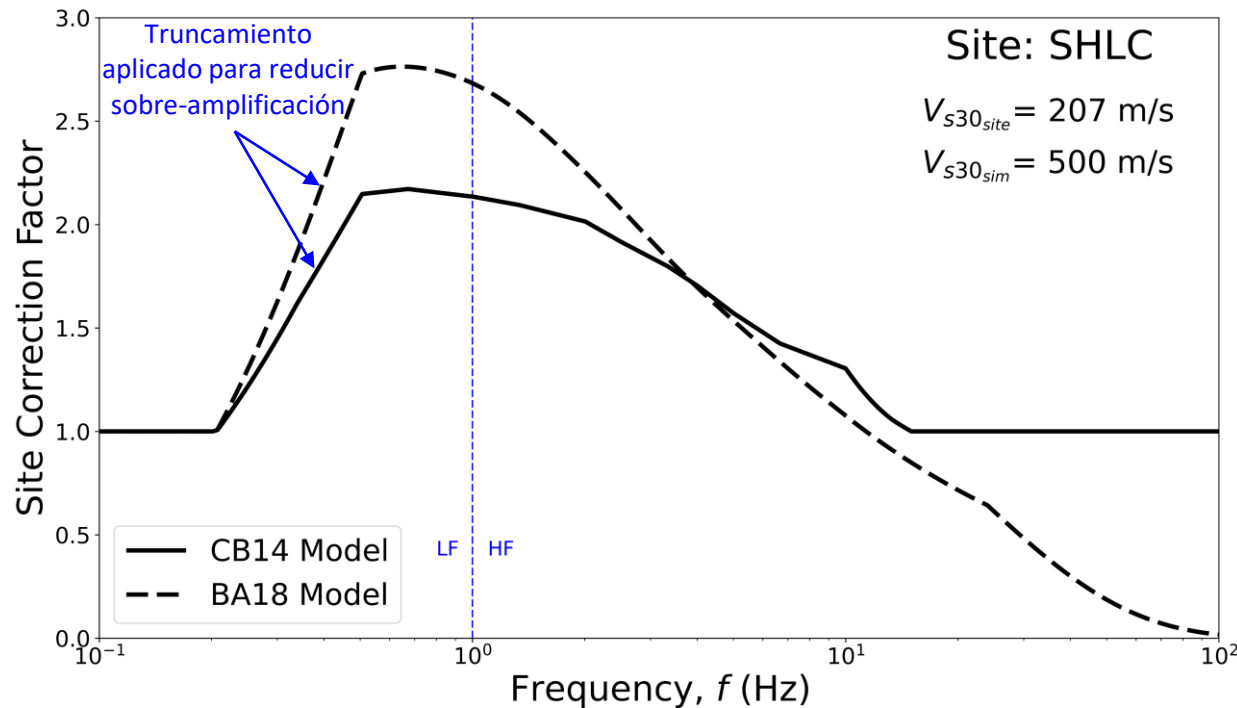
- 1 Obtener el movimiento sísmico simulado
- 2 Convertirlo al dominio de las frecuencias
- 3 Aplicar Factor de Corrección de Sitio
- 4 Convertirlo de vuelta al dominio del tiempo



Enfoque Estándar (basado en Vs30) para capturar Efectos de Sitio

$$Factor = \frac{F(V_{s30_{site}})}{F(V_{s30_{sim}})}$$

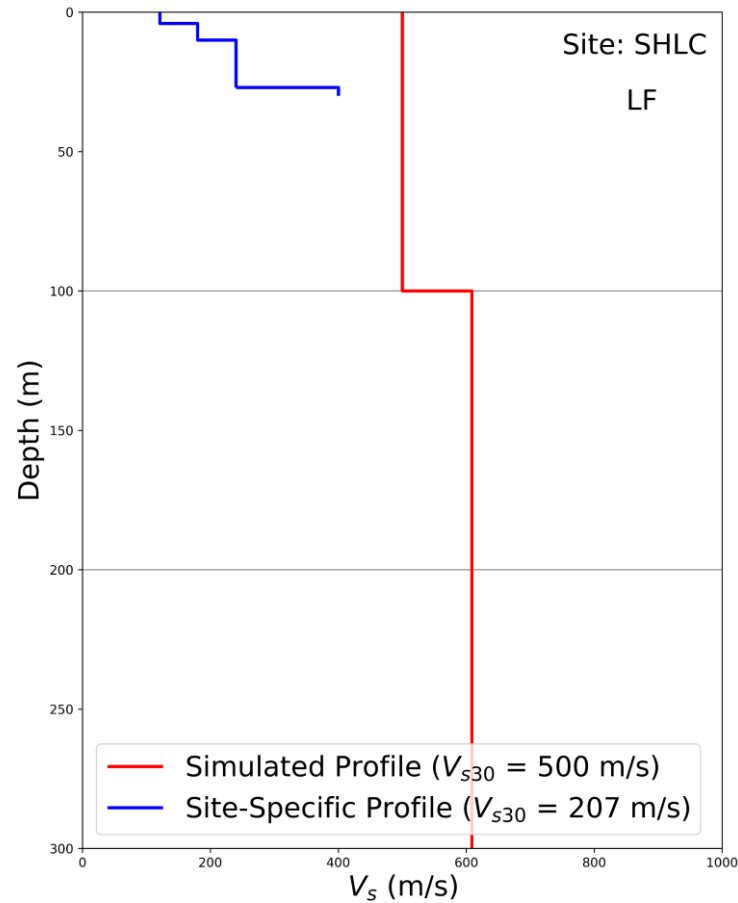
Término de Amplificación de Sitio obtenido de Modelo Empírico



Limitaciones:

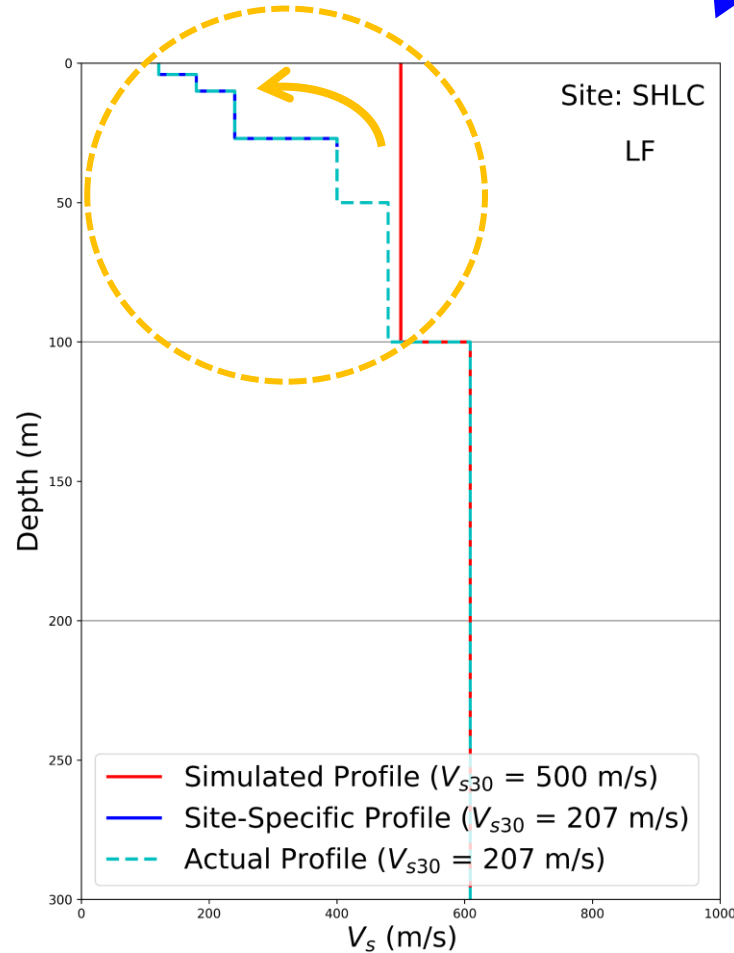
- Basado en $V_{s30} \rightarrow$ Ergódico
- Sobre-amplificación a bajas frecuencias (de la Torre et al., 2020; Lee et al., 2020)

Enfoque Estándar (basado en V_{s30}) para capturar Efectos de Sitio



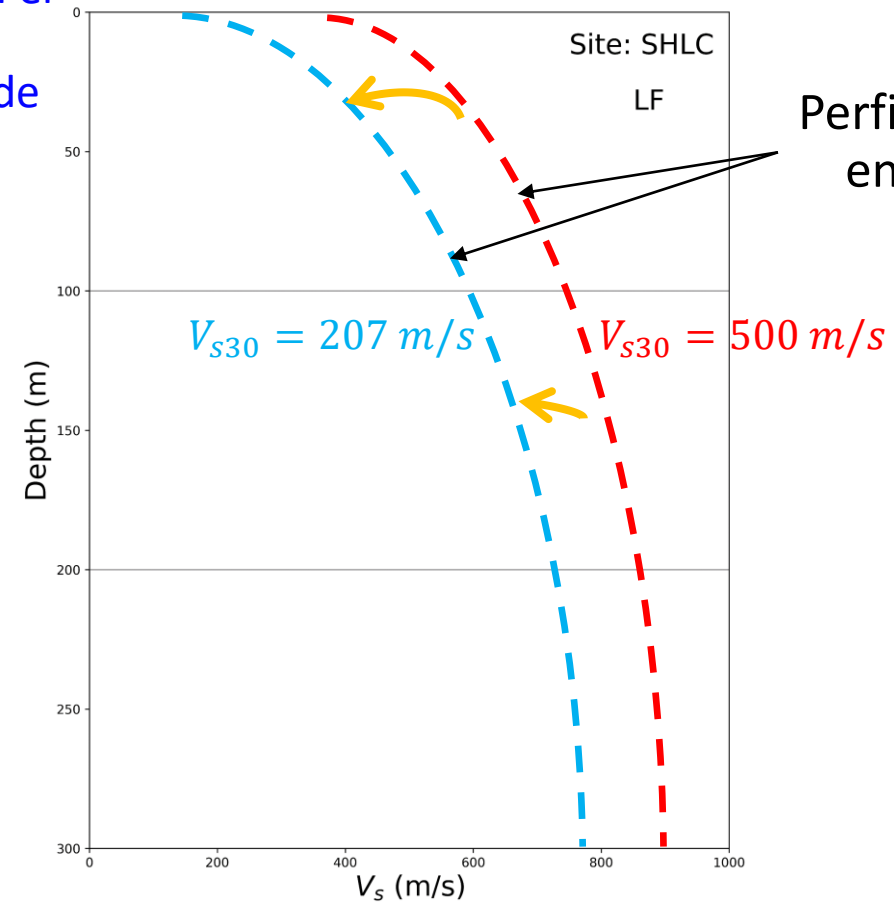
Enfoque Estándar (basado en Vs30) para capturar Efectos de Sitio

Efectos de sitio superficial
a ser capturados



Inconsistencia

Mapeada en el
factor de
corrección de
sitio



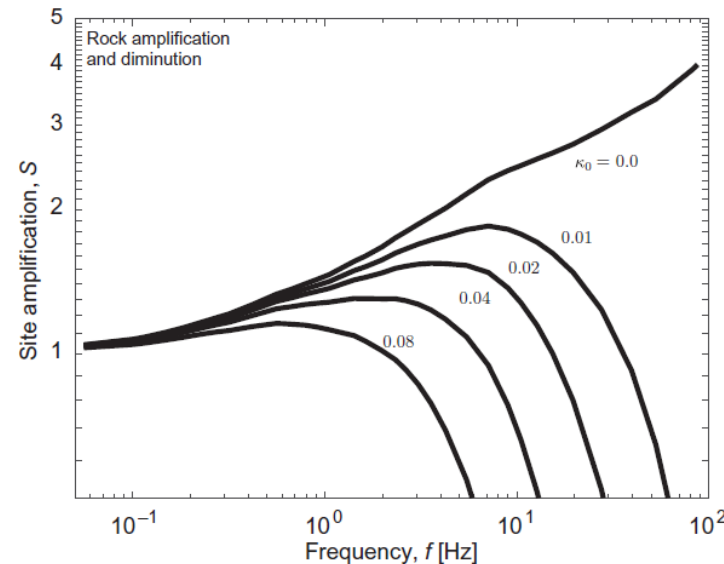
Perfiles implícitos
en el Modelo
Empírico

Enfoque Alternativo 1: Método SRI (Square-Root Impedance)

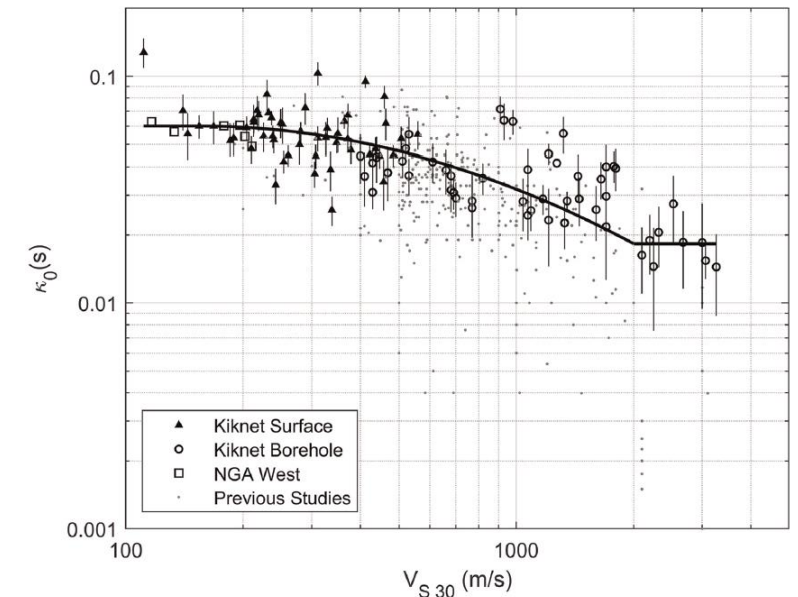
$$\text{Respuesta de Sitio} = \underbrace{\sqrt{\frac{\rho_R V_R}{\bar{\rho} \bar{V}}}}_{\text{Efectos de Impedancia}} \times \underbrace{\exp(-\pi f \kappa_0)}_{\text{Efectos de Atenuación}}$$

$\bar{\rho}$ y $\bar{V}$ se calculan para cada frecuencia, considerando una profundidad equivalente a un cuarto de la longitud de onda de la frecuencia en cuestión

κ_0 es el parámetro de atenuación de sitio y domina comportamiento a altas frecuencias

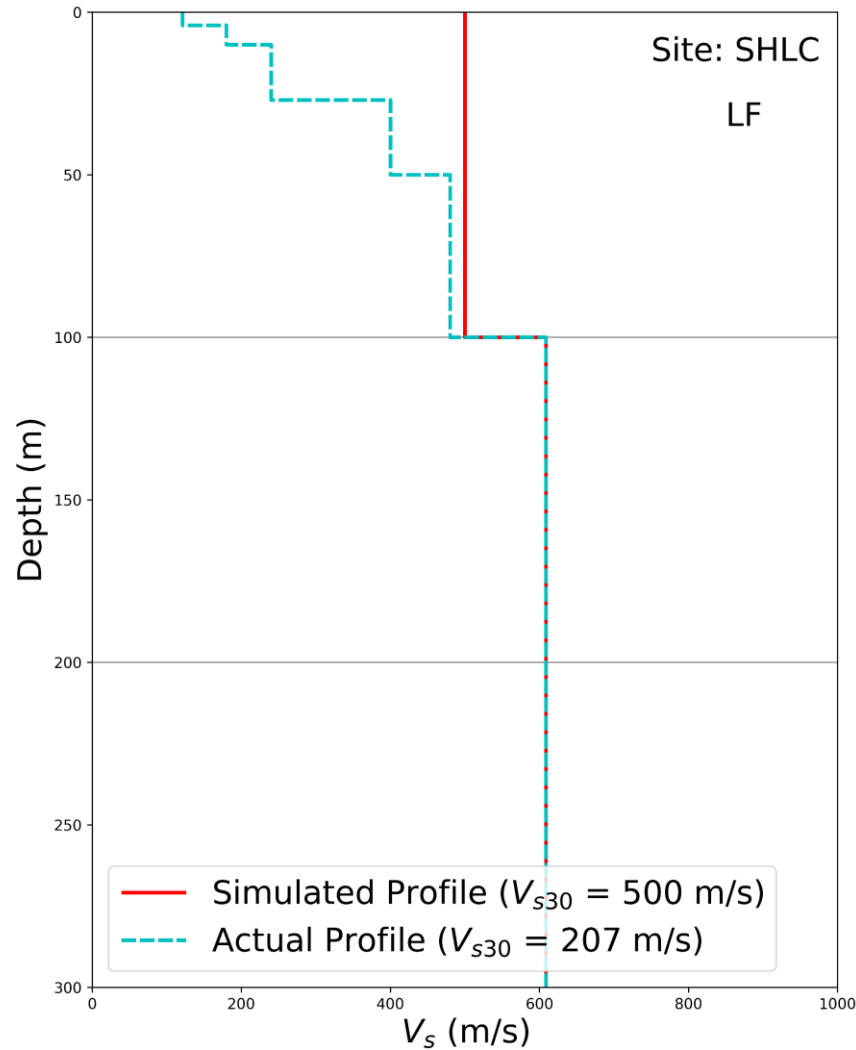


Baker et al. (2021)

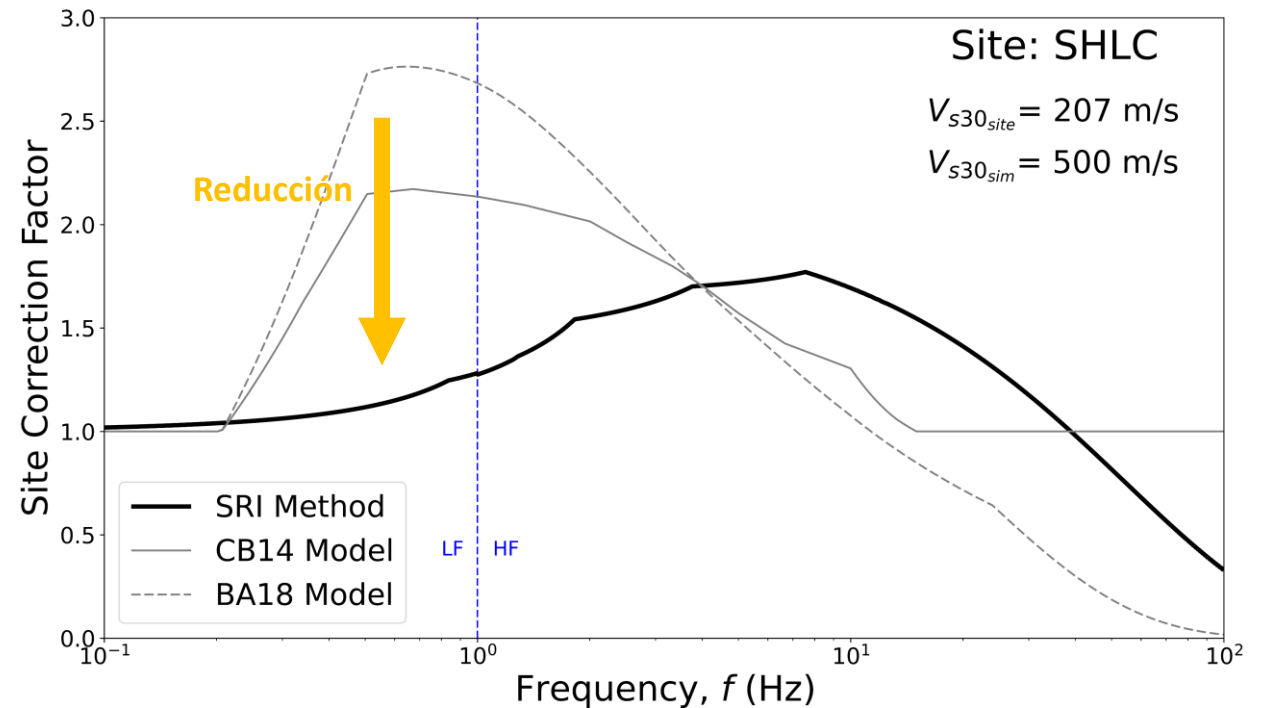


Xu et al. (2020)

Enfoque Alternativo 1: Método SRI (Square-Root Impedance)

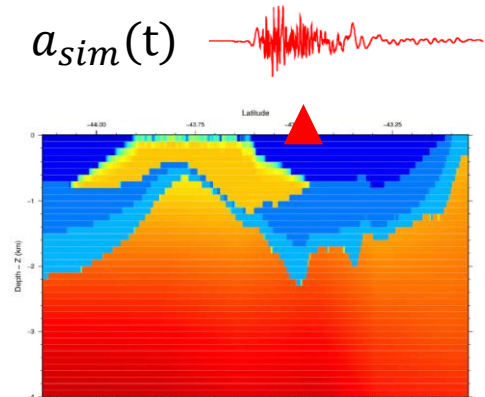


$$Factor = \frac{\sqrt{\frac{\rho_R V_R}{\bar{\rho}_{actual} \bar{V}_{actual}} \times \exp(-\pi f \kappa_{0_{actual}})}}{\sqrt{\frac{\rho_R V_R}{\bar{\rho}_{sim} \bar{V}_{sim}} \times \exp(-\pi f \kappa_{0_{sim}})}}$$

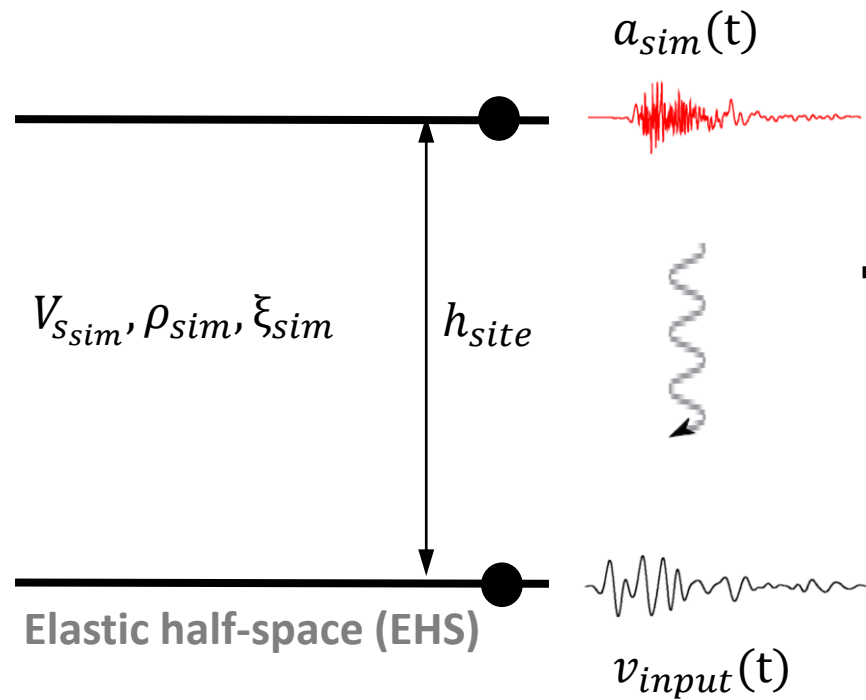


Enfoque Alternativo 2: Análisis de Respuesta de Sitio 1D

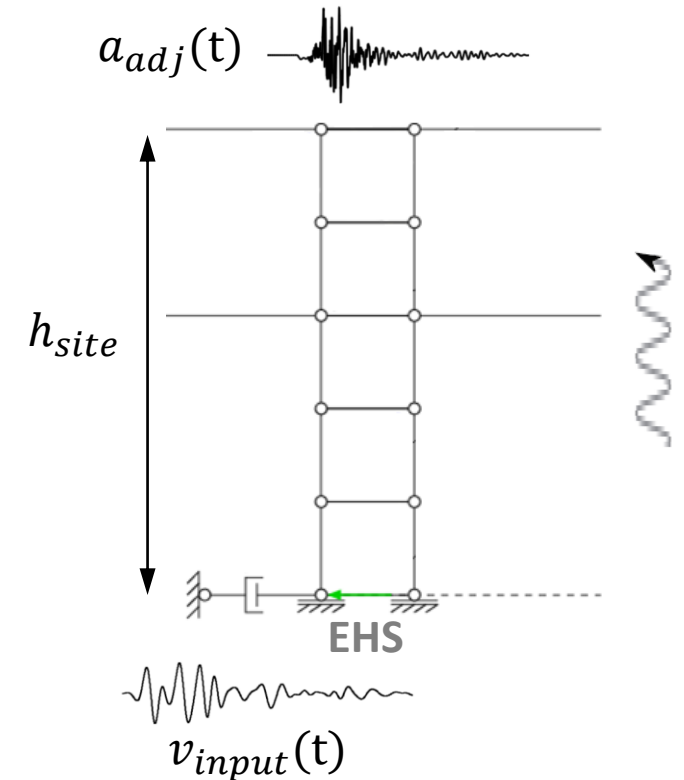
1 Obtener el movimiento sísmico simulado



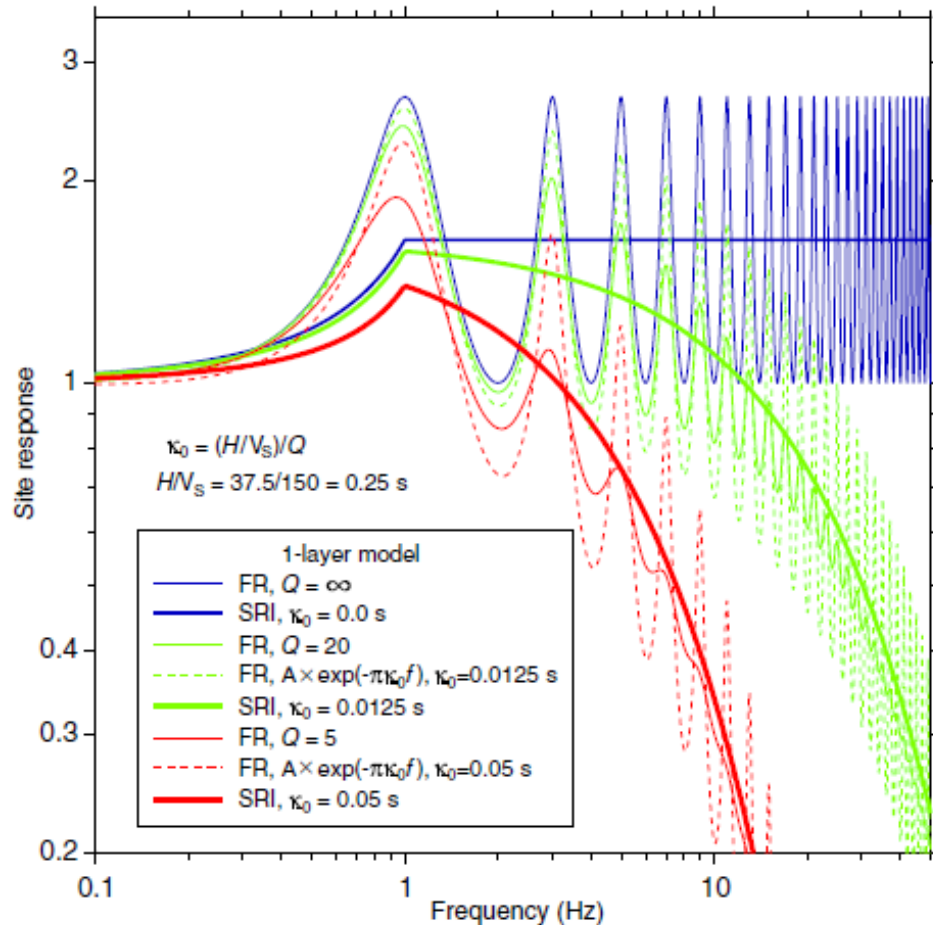
2 Realizar deconvolución



3 Realizar Análisis de Respuesta de Sitio 1D



Método SRI vs Análisis de Respuesta de Sitio 1D

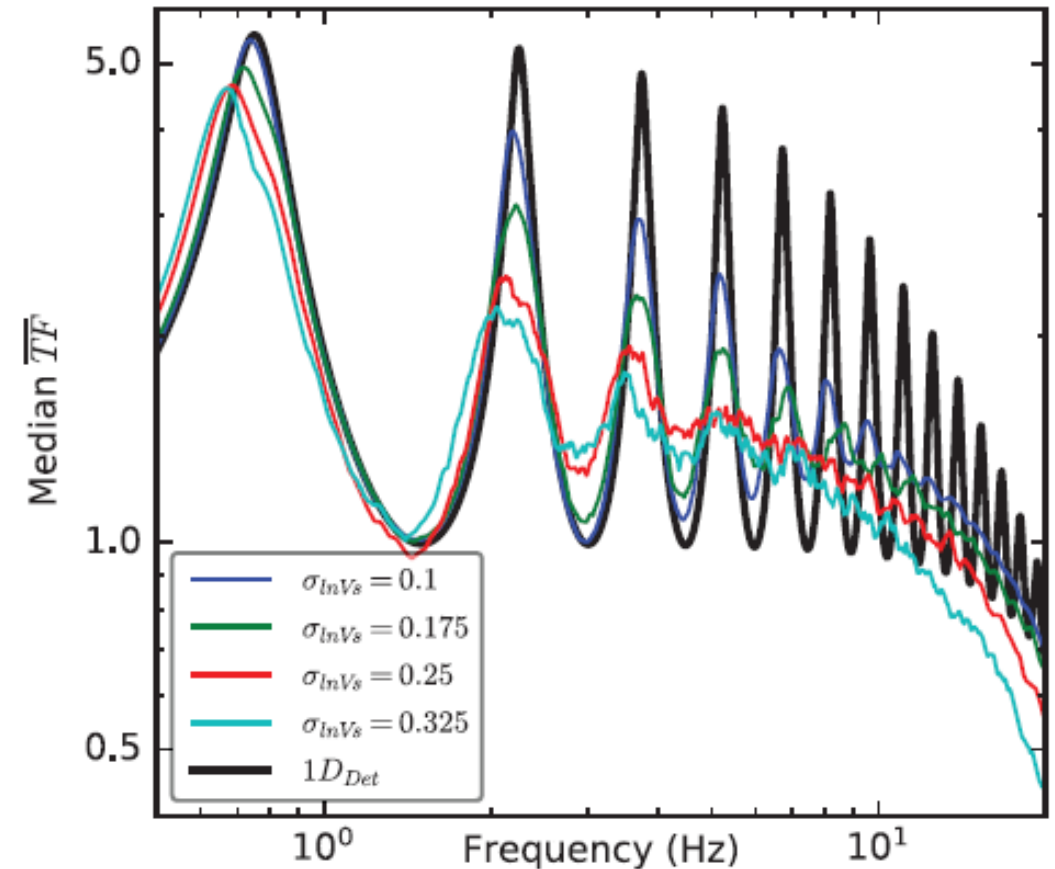
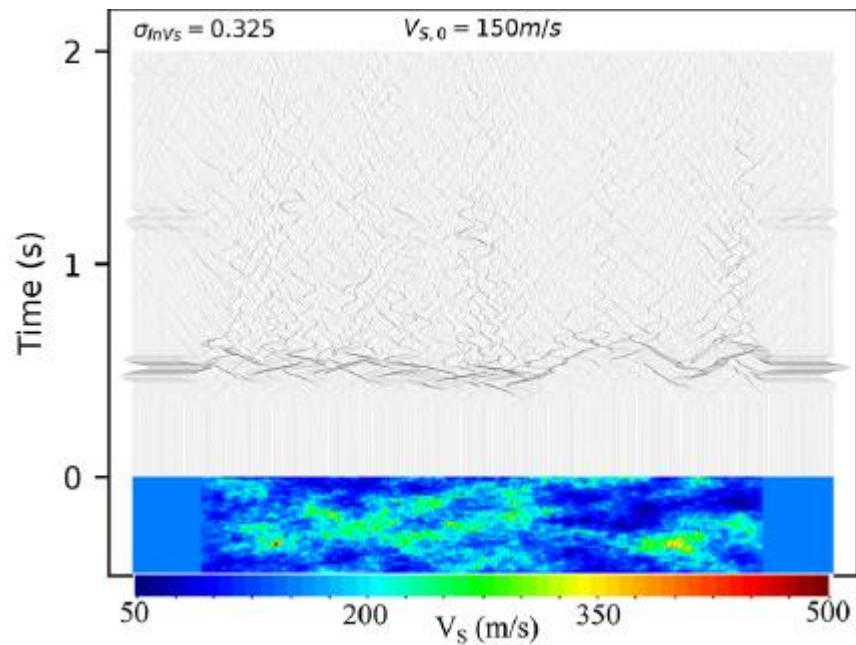
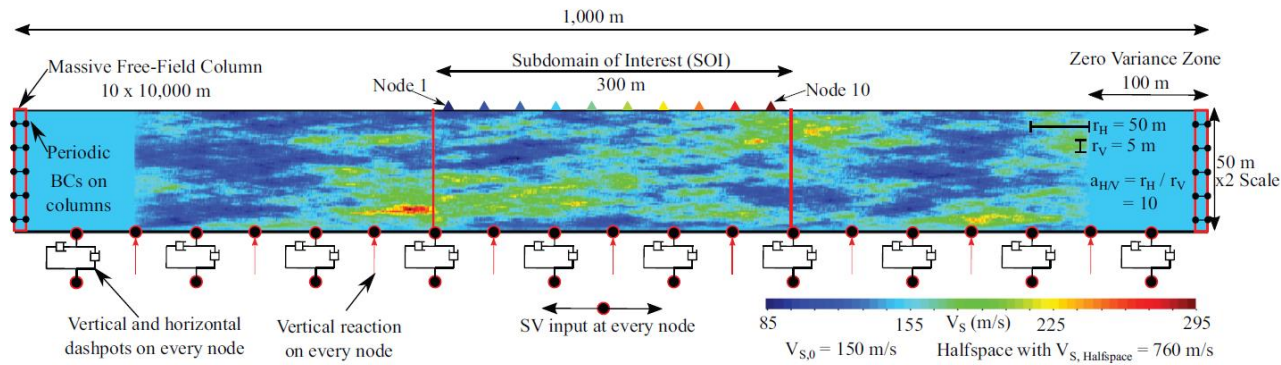


Boore (2013)

- Análisis de Respuesta de Sitio 1D captura efectos de impedancia, resonancia, y atenuación
- Método SRI solo captura efectos de impedancia y atenuación
- La existencia de los efectos de resonancia depende fuertemente de la idoneidad de del supuesto de propagación 1D

Limitaciones del Análisis de Respuesta de Sitio 1D

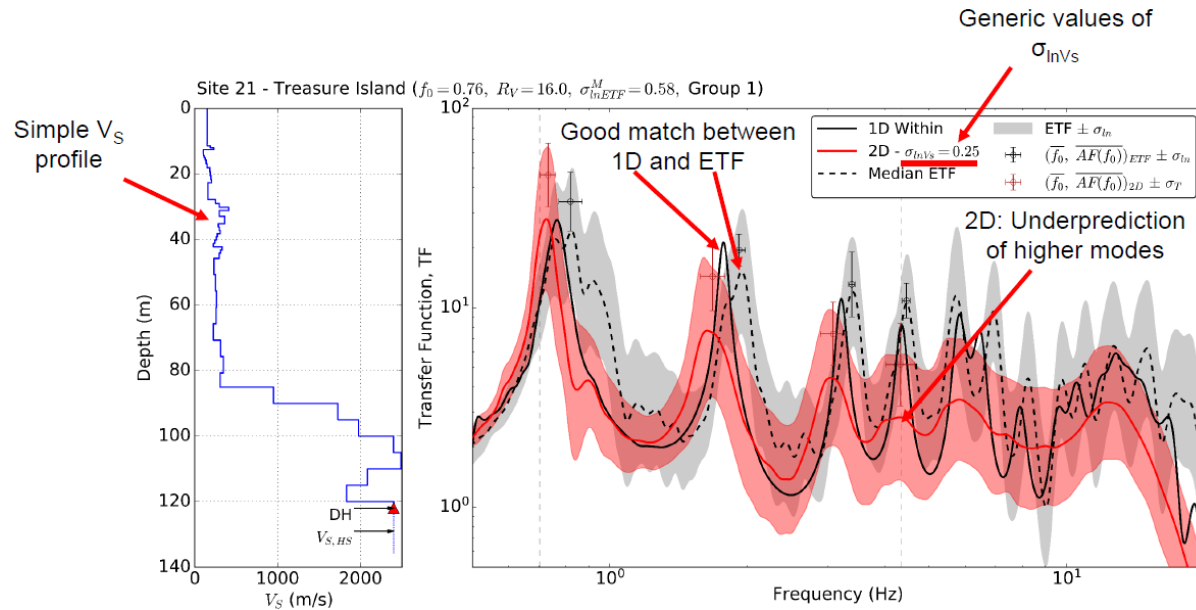
Heterogeneidad definida utilizando un modelo de campos aleatorios correlacionados espacialmente



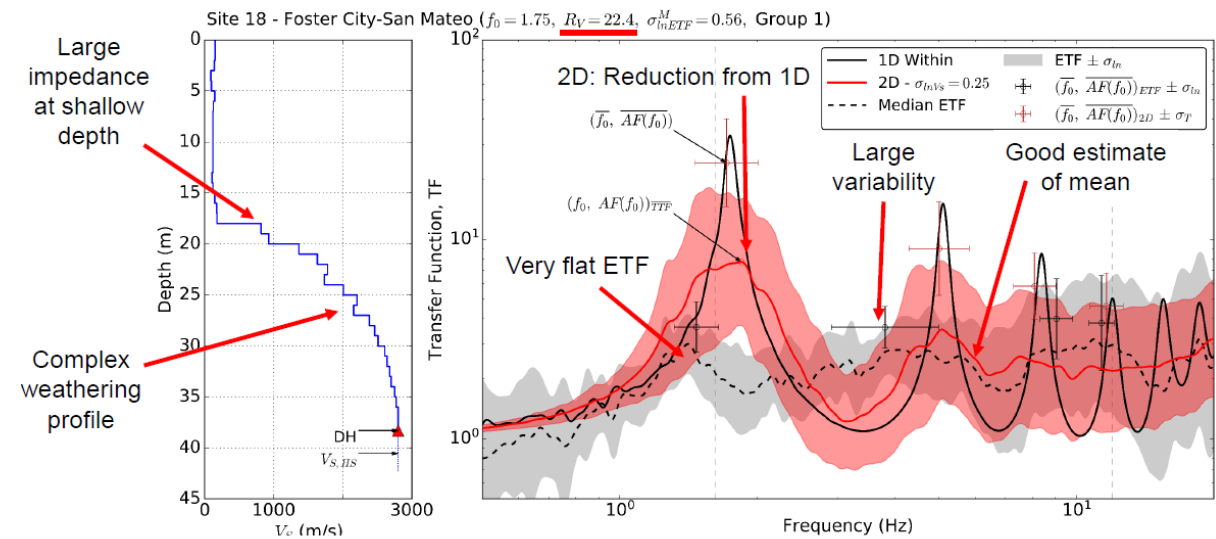
de la Torre et al. (2022a)

Limitaciones del Análisis de Respuesta de Sitio 1D

Sitio 1D



Sitio con fuertes efectos 2D/3D



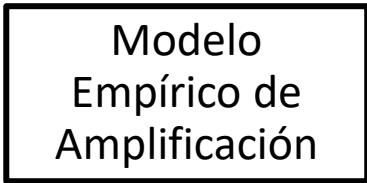
Pregunta de Investigación

¿Bajo qué condiciones podemos mejorar las predicciones al utilizar métodos que incorporen más información sitio-específica?



Validación

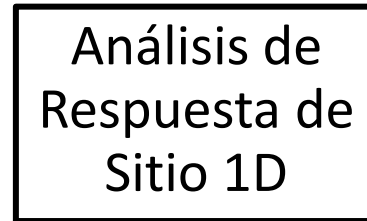
Enfoque Estándar
(basado en Vs30)



Enfoque Alternativo 1



Enfoque Alternativo 2



Ajuste en el dominio de la
frecuencia

Ajuste en el
dominio del tiempo



Observación



Enfoque 1

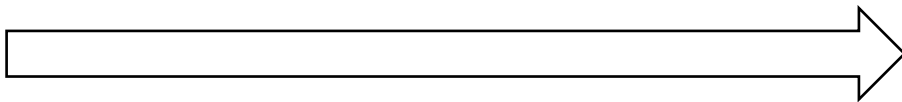
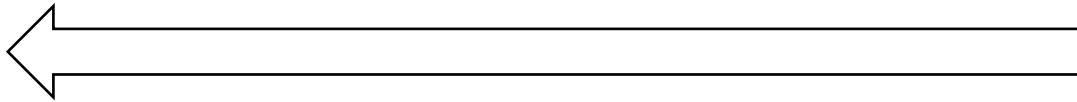


Enfoque 2



Enfoque 3

Menos sitio-
específico

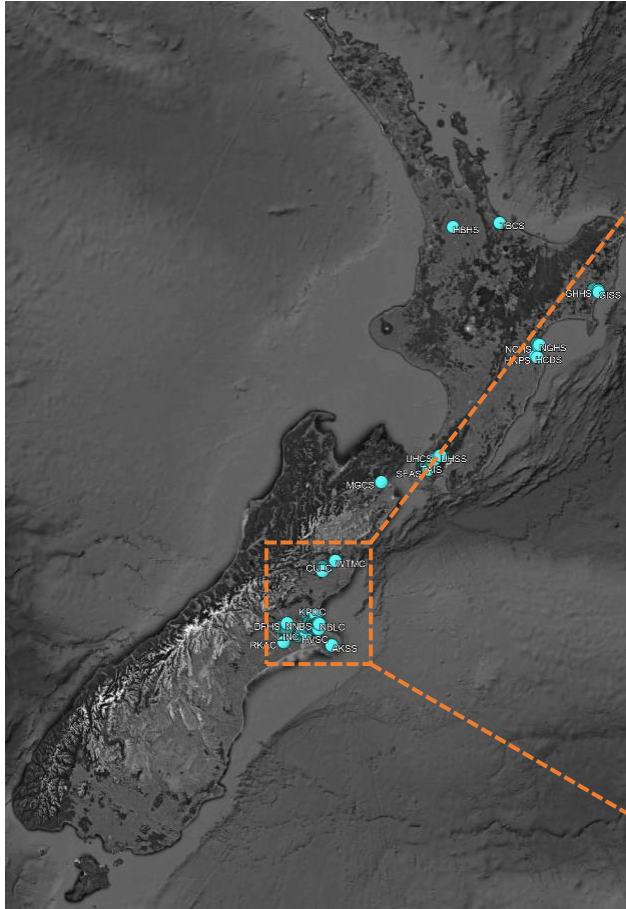


Descansa en un
supuesto idealista

4. Estudio de Validación en Curso

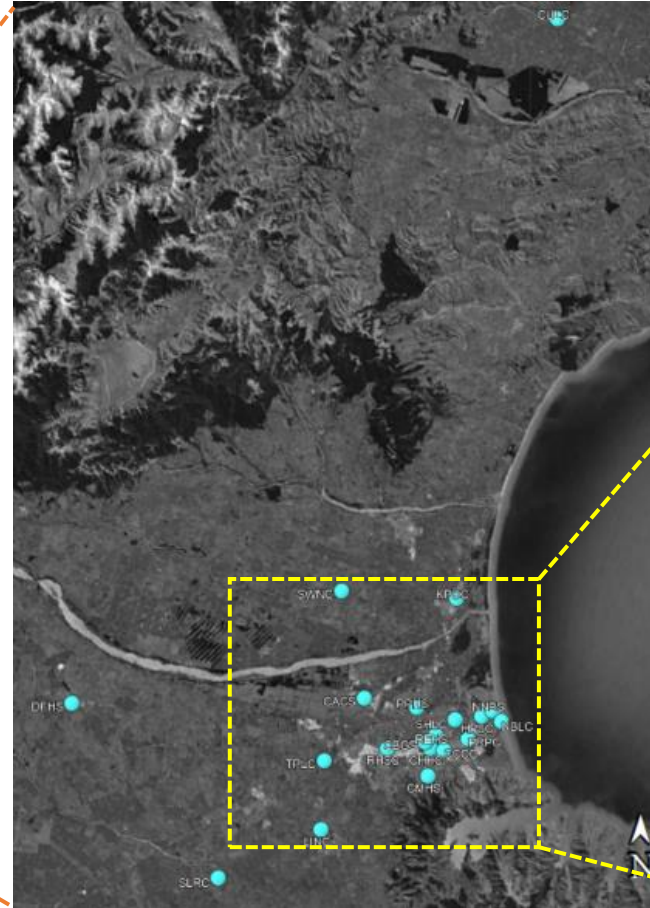
Sitios

Área Total de Estudio
Nueva Zelanda

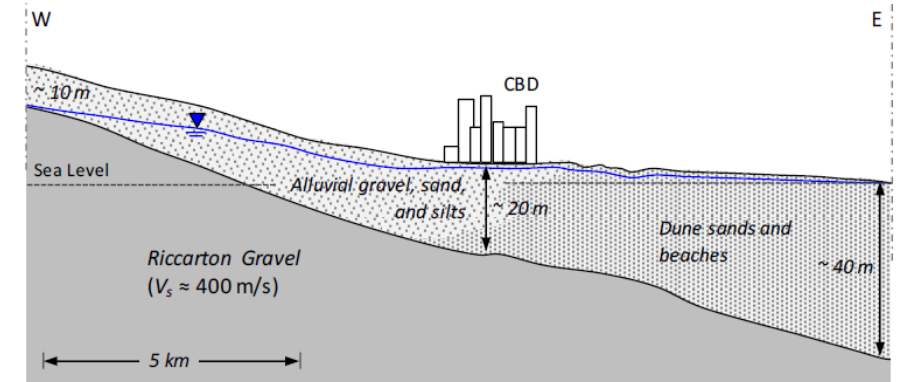


- Estación de Movimiento Fuerte
- Al menos un perfil de V_s

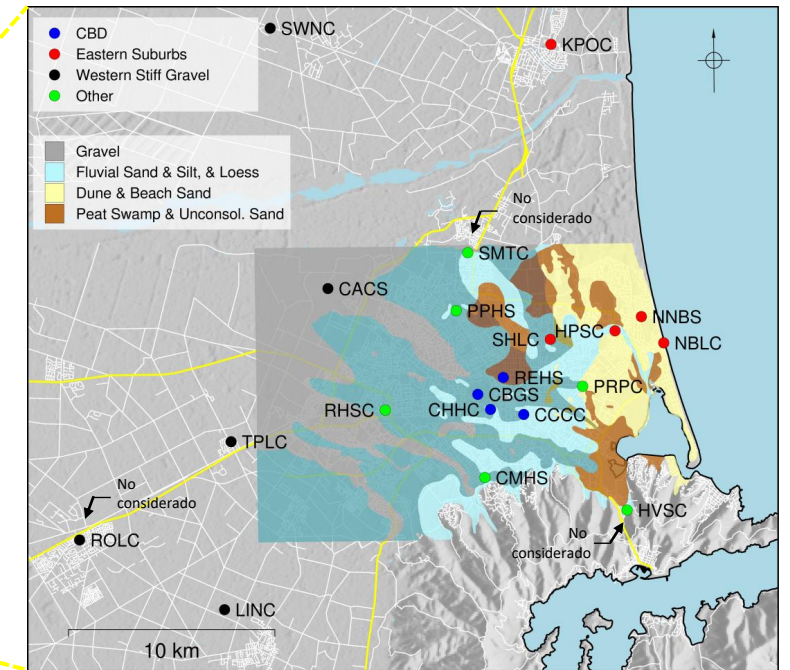
Fase actual del estudio
Región de Canterbury | 20 sitios



- ≥ 3 registros

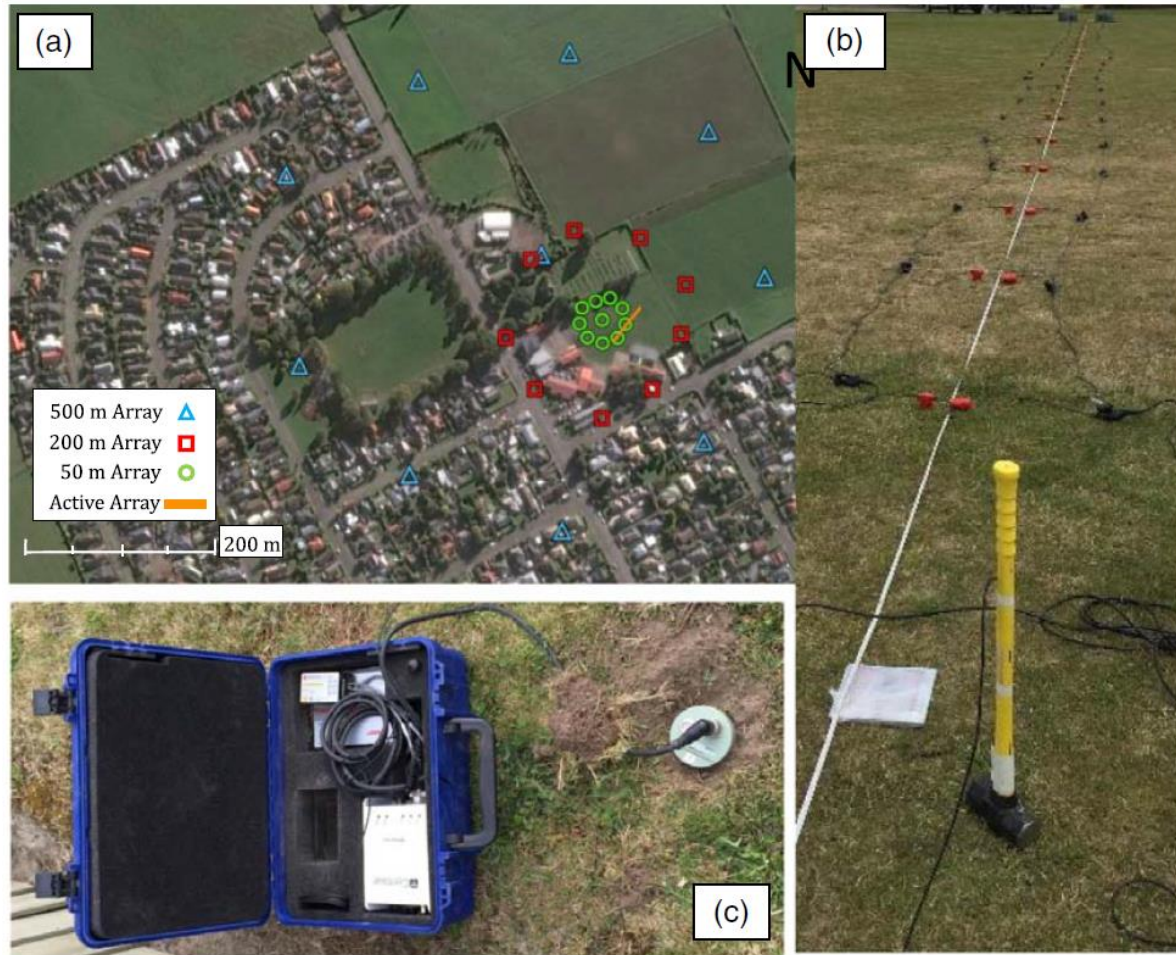


Ntritsos (2021)



$$154 \text{ m/s} \leq V_{s30} \leq 552 \text{ m/s}$$

Caracterización Geotécnica

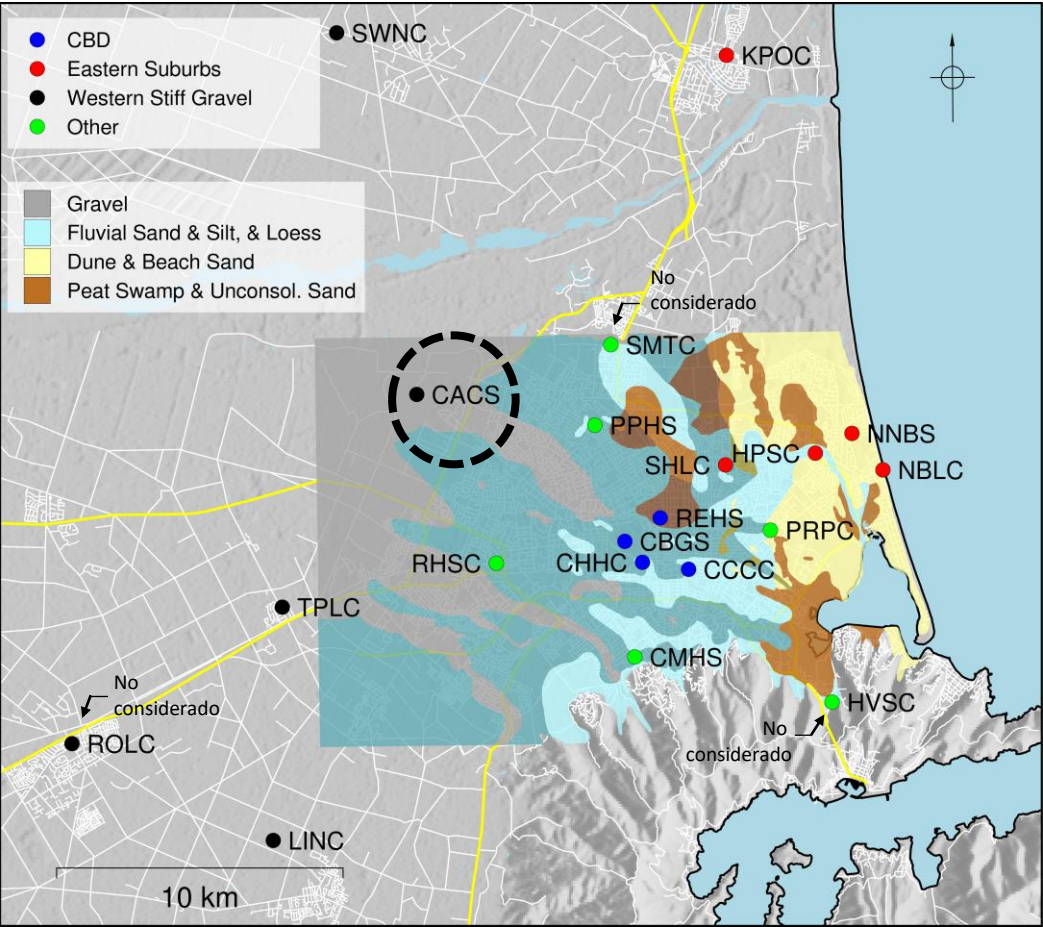


Deschenes et al. (2018)



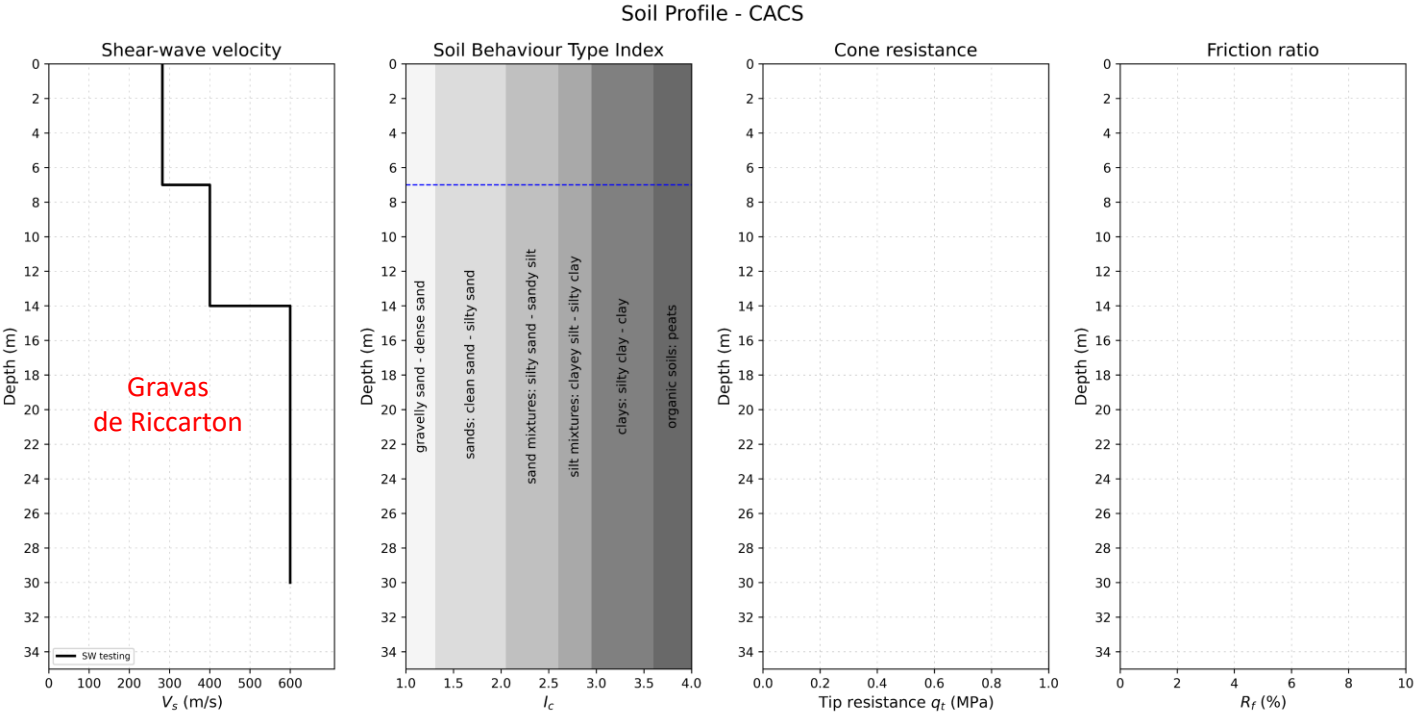
Wotherspoon et al. (2015)

Sitios

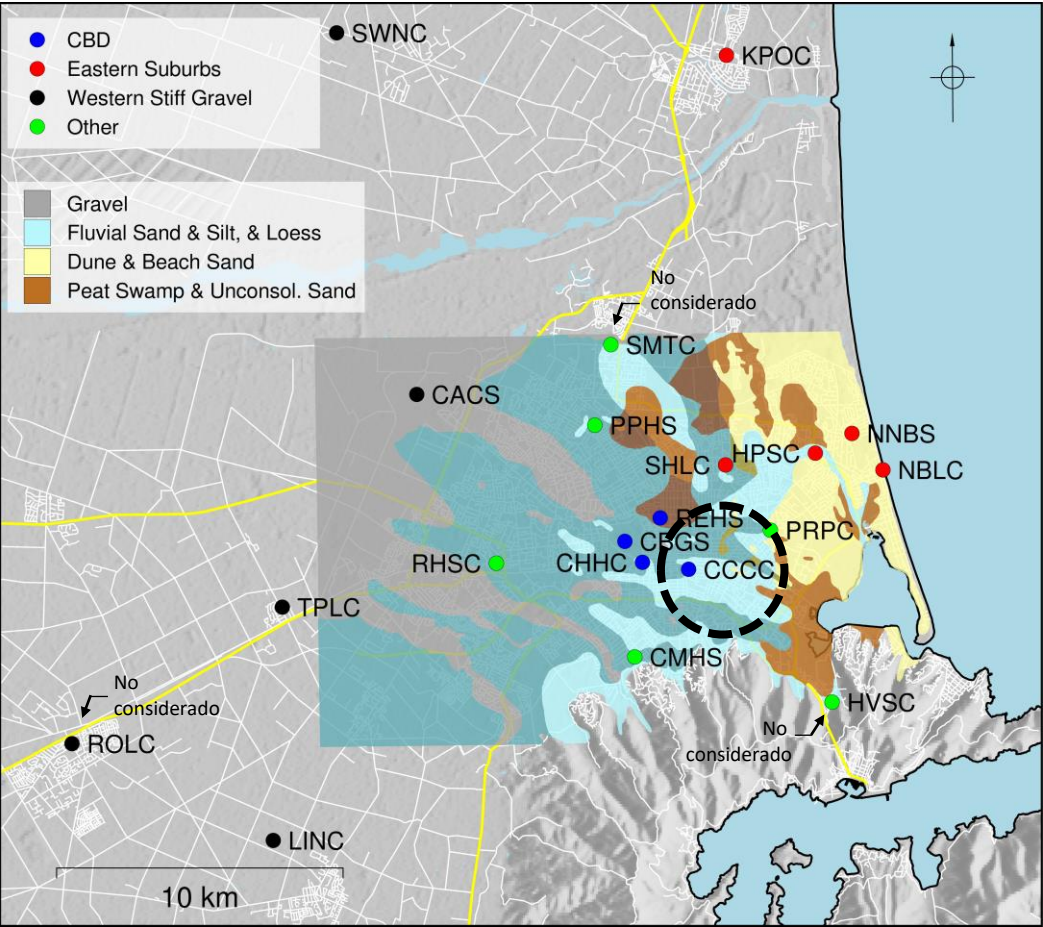


CACS

$$V_{s30} = 435 \frac{m}{s}$$

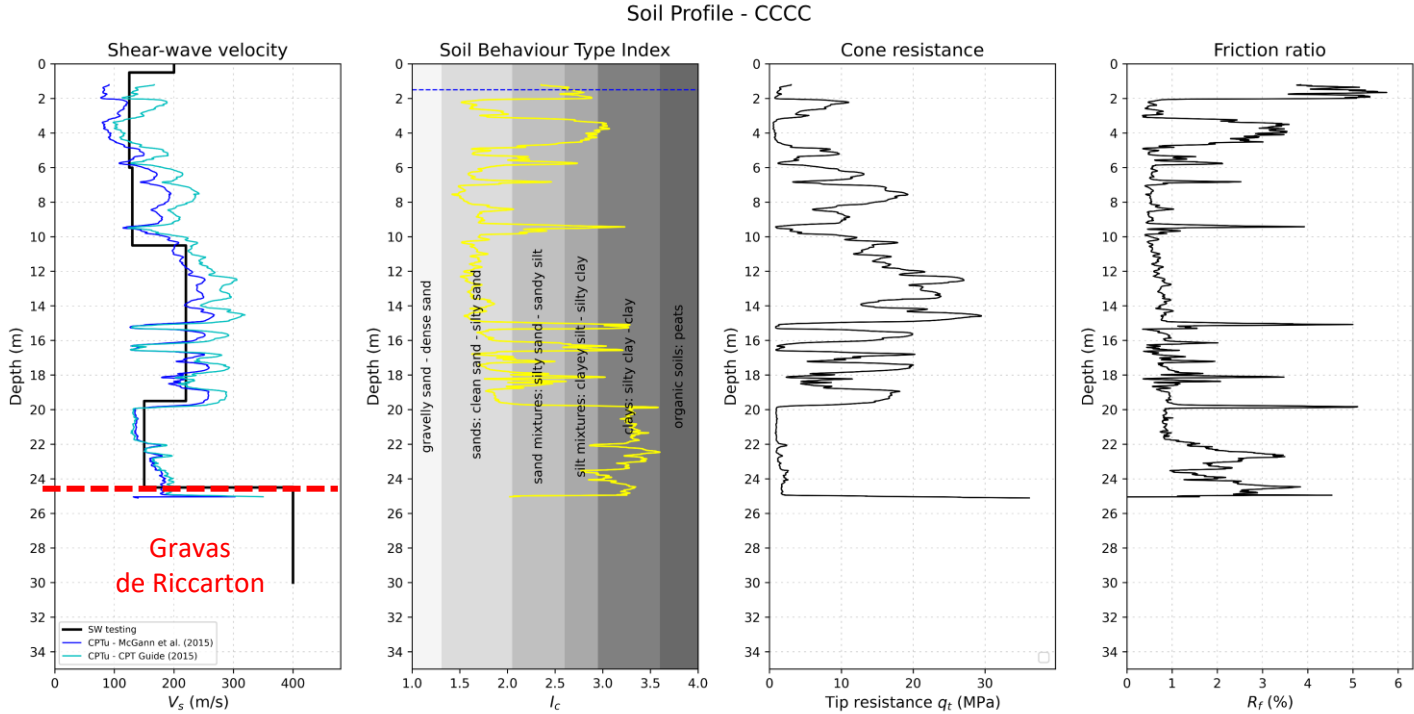


Sitios

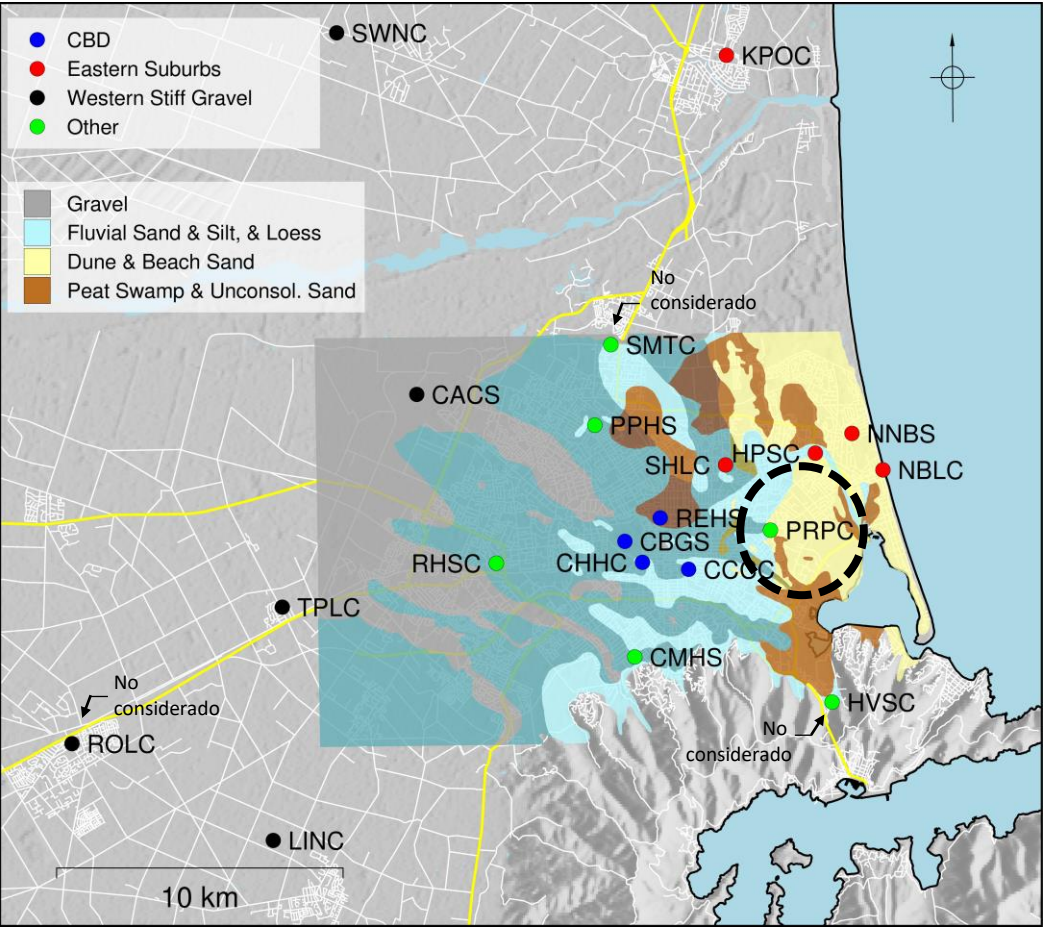


CCCC

$$V_{s30} = 176 \frac{m}{s}$$

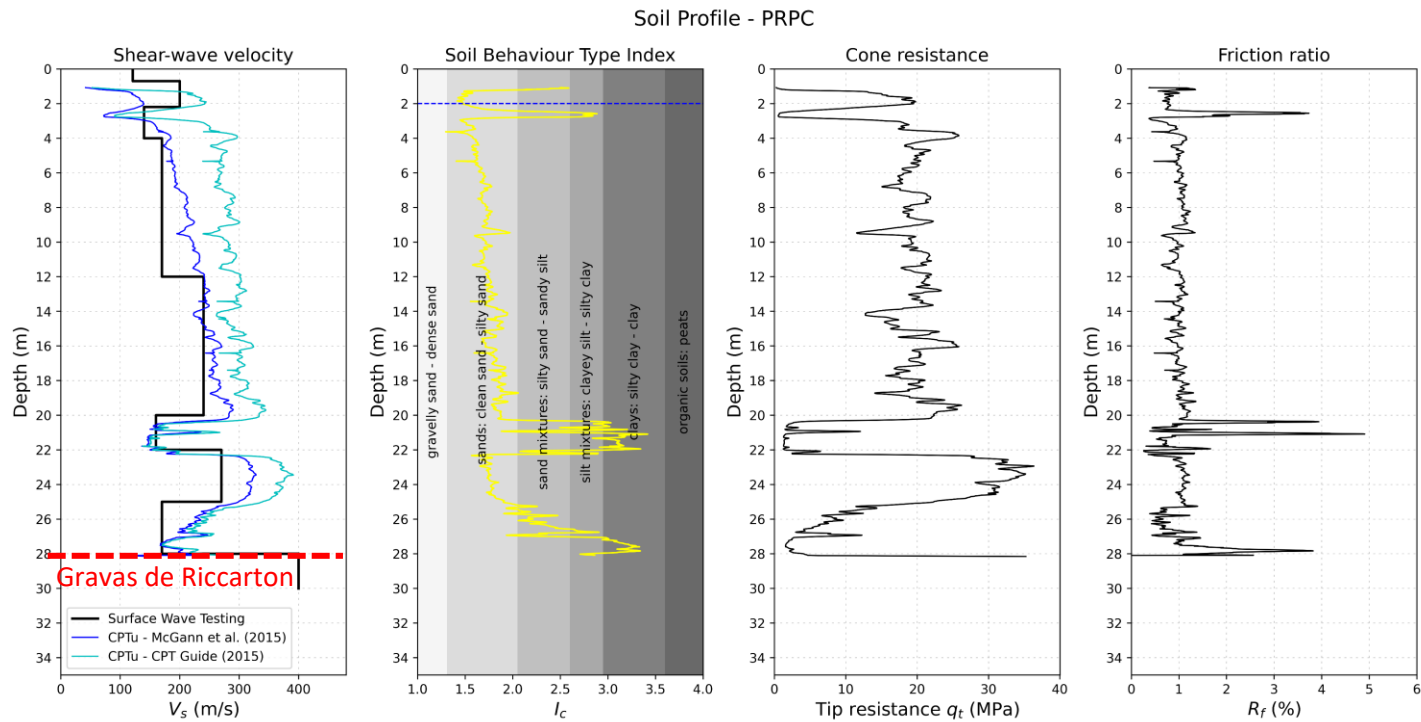


Sitios



PRPC

$$V_{s30} = 196 \frac{m}{s}$$



Terremotos y Registros

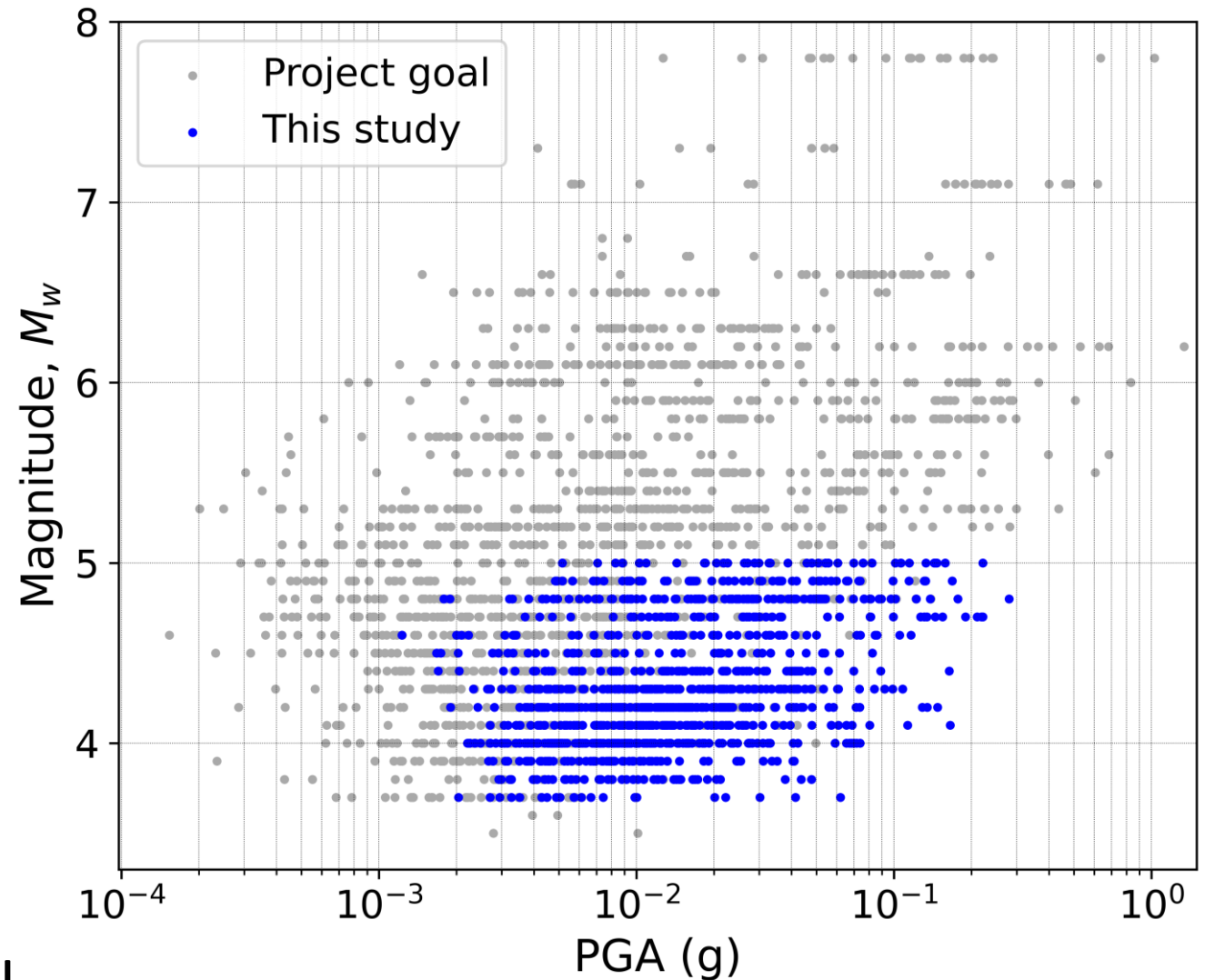
Terremotos de Pequeña Magnitud
 $(3.5 \leq M_w \leq 5.0)$



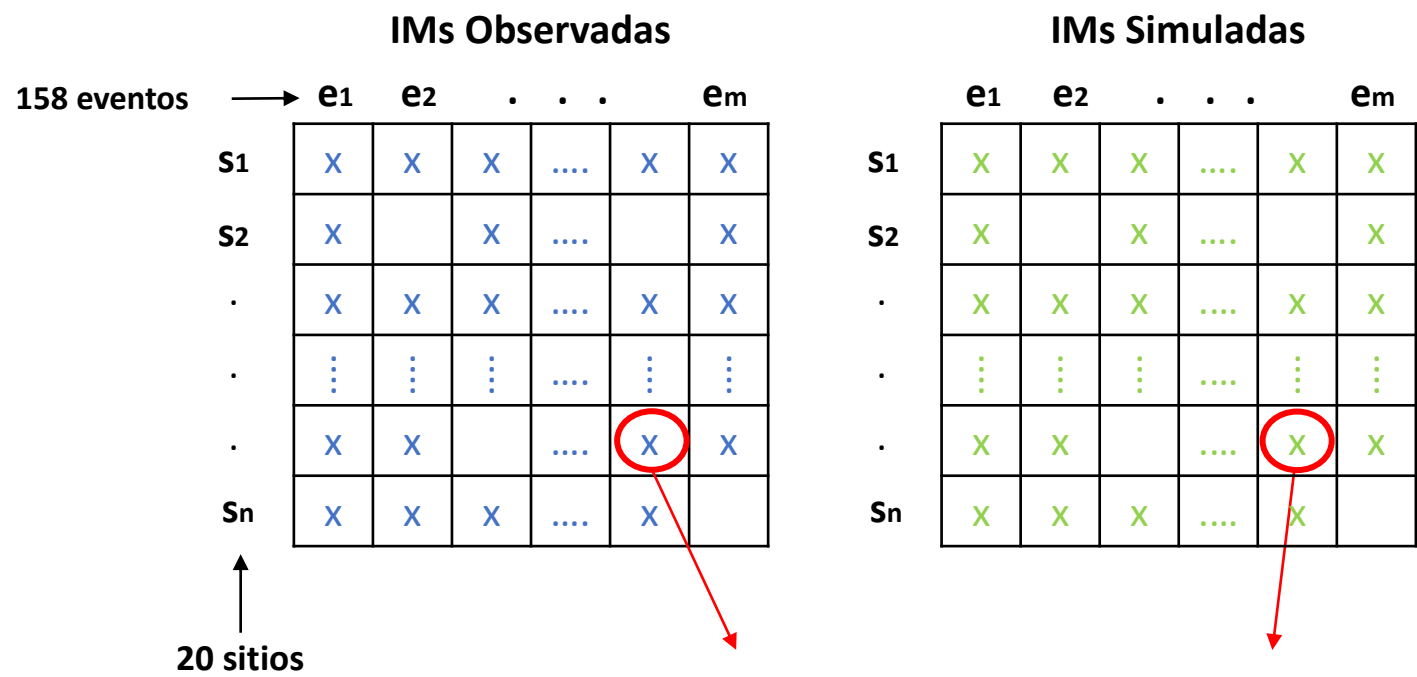
158 Eventos Corticales
1032 Registros



Supuesto: Comportamiento Lineal



Análisis Residual



$$\Delta_{es} = \ln IM_{Obs,es} - \ln IM_{Sim,es}$$

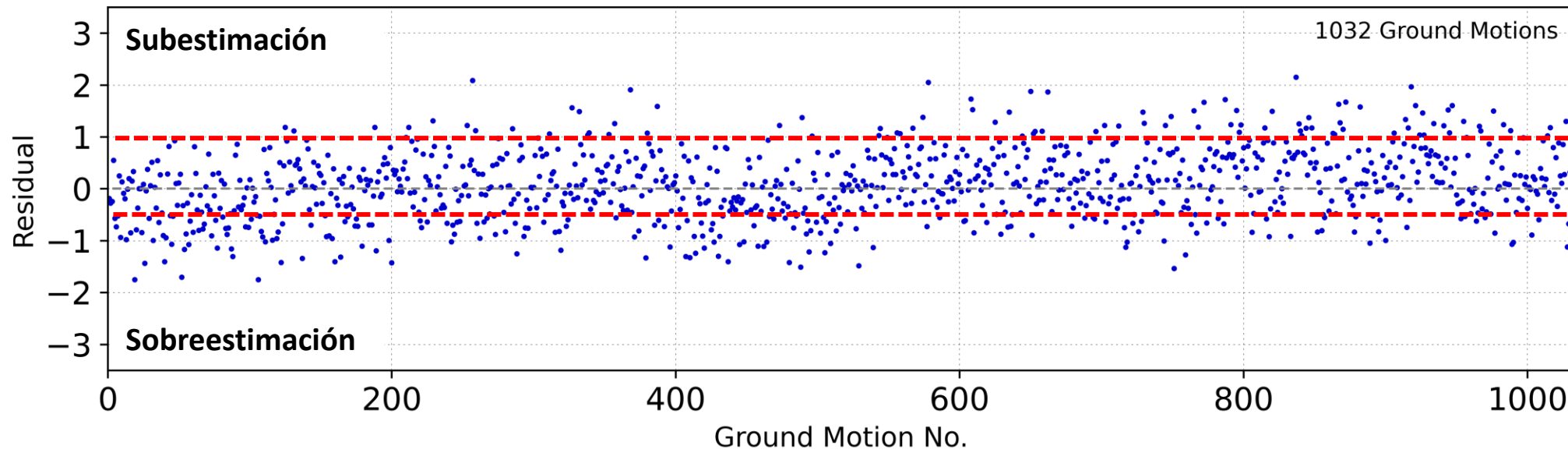
Análisis Residual

$$\Delta_{es} = \ln IM_{Obs,es} - \ln IM_{Sim,es} \rightarrow e^{\Delta_{es}} = \frac{IM_{Obs,es}}{\ln IM_{Sim,es}}$$

Residual

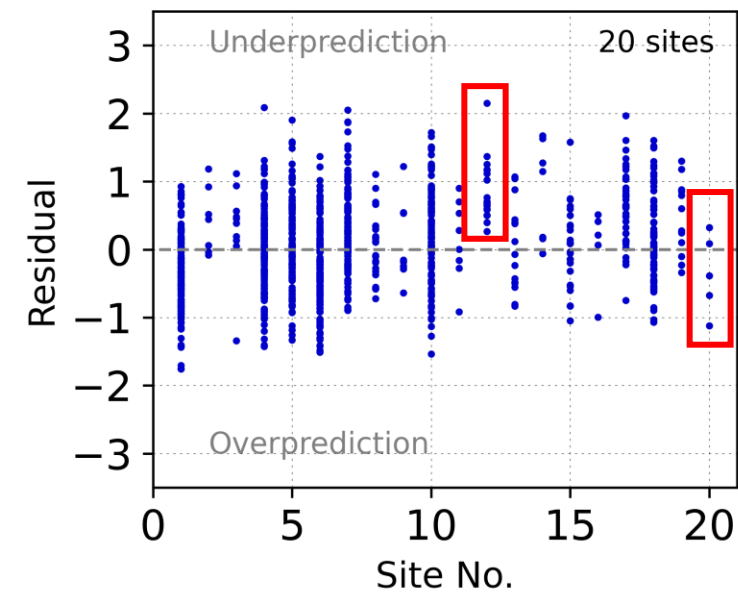
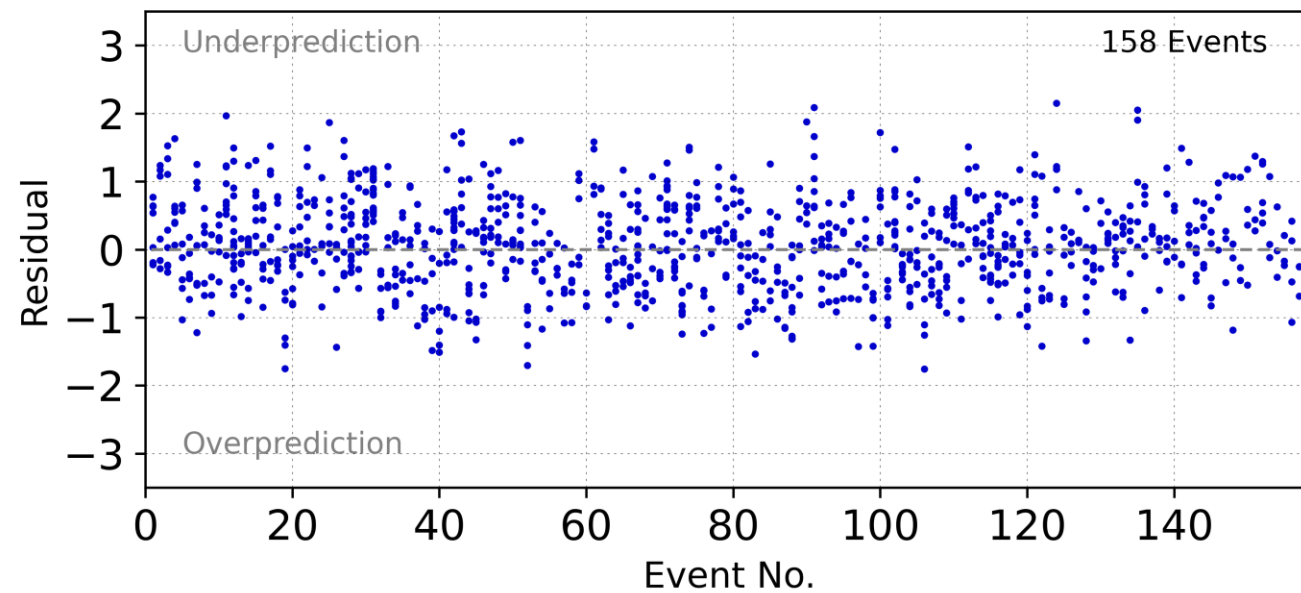
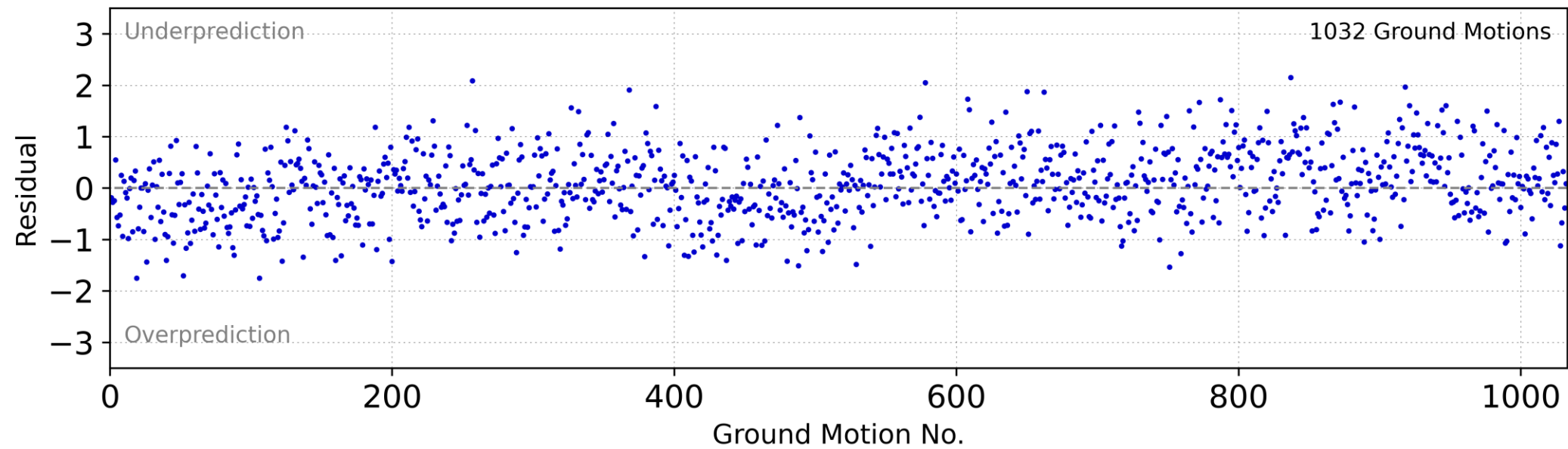
IM
Observada

IM
Simulada



$$\begin{aligned} \rightarrow \frac{IM_{Obs,es}}{\ln IM_{Sim,es}} &= e^1 = 2,72 \\ \rightarrow \frac{IM_{Sim,es}}{\ln IM_{Obs,es}} &= e^{0.5} = 1,65 \end{aligned}$$

Análisis Residual



Análisis Residual

Partición del residual usando regresión de efectos mixtos

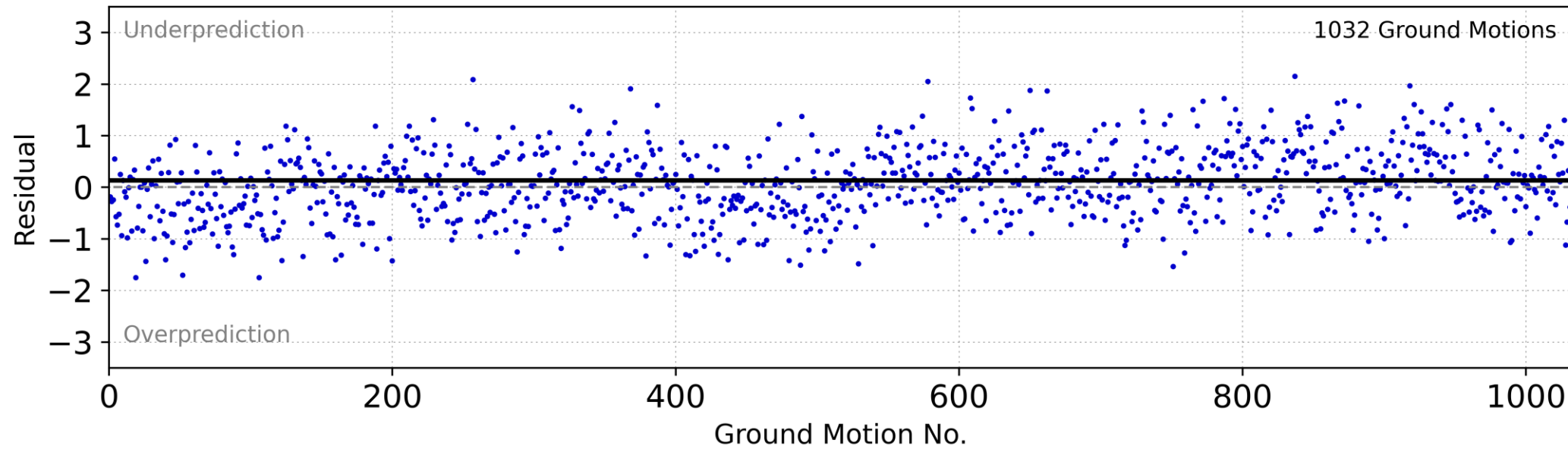
$$\underset{\text{Residual}}{\Delta_{es}} = \ln \underset{\text{IM Observada}}{IM_{Obs,es}} - \ln \underset{\text{IM Simulada}}{IM_{Sim,es}} \rightarrow \Delta_{es} = \underset{\substack{\text{Residual Entre-} \\ \text{Eventos}}}{a} + \underset{\substack{\text{Residual} \\ \text{Restante}}}{\delta B_e} + \underset{\substack{\text{Residual} \\ \text{Sitio-a-Sitio}}}{\delta S_2 S_s} + \delta W_{es}^0$$

Sesgo del Modelo
(Model Bias)

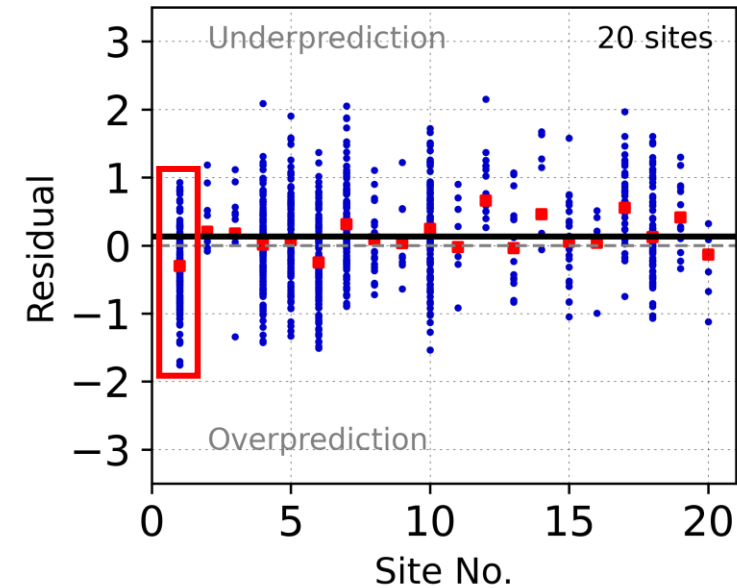
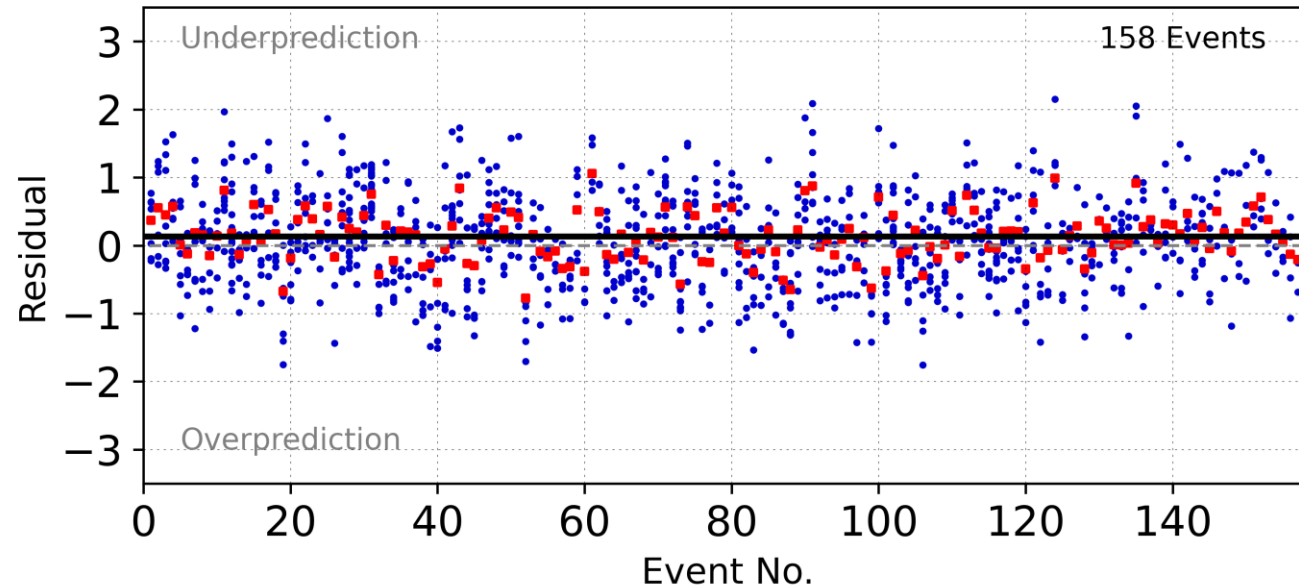
↑

Diferencia sistemática entre las
observaciones y las predicciones
para un enfoque determinado

Análisis Residual

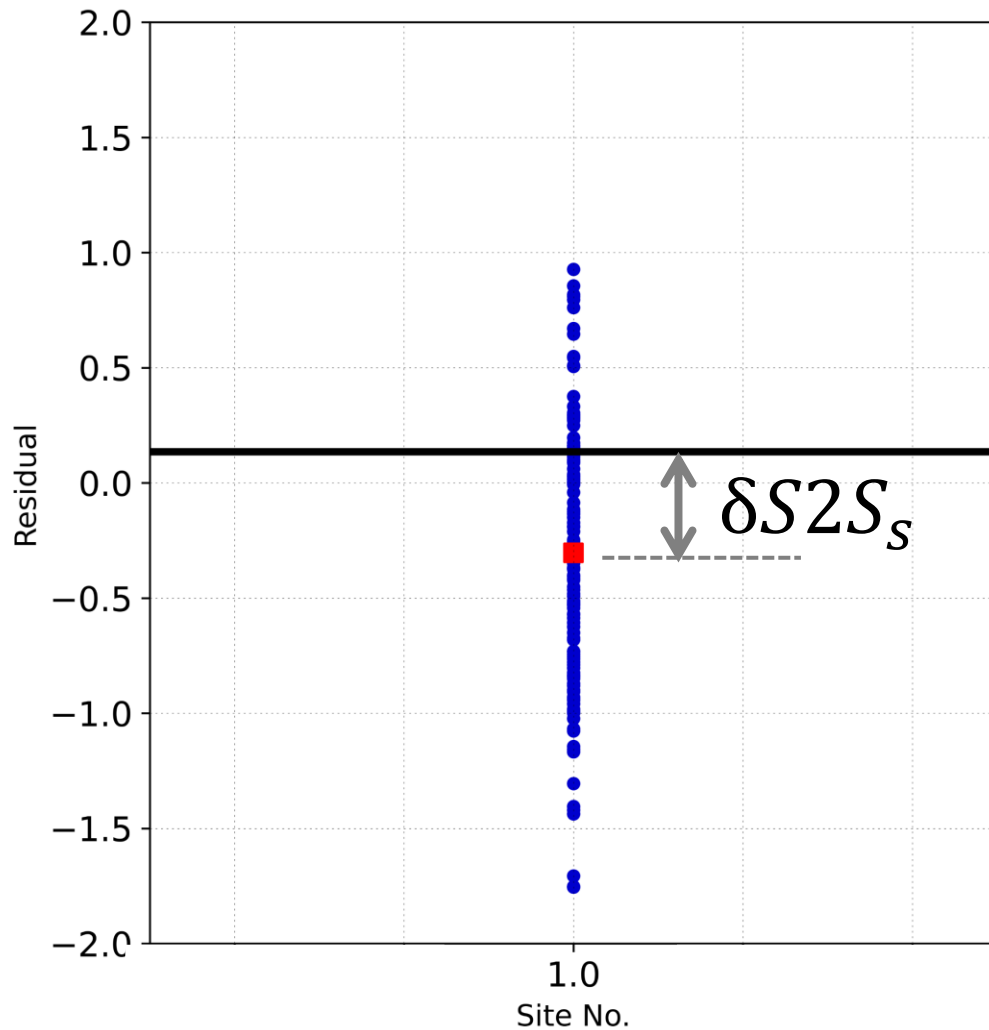


Model bias, a



Model bias, a

Análisis Residual



$$\Delta_{es} = a + \delta B_e + \delta S2S_s + \delta W_{es}^0$$

Residual Entre-Eventos

Sesgo del Modelo (Model Bias)

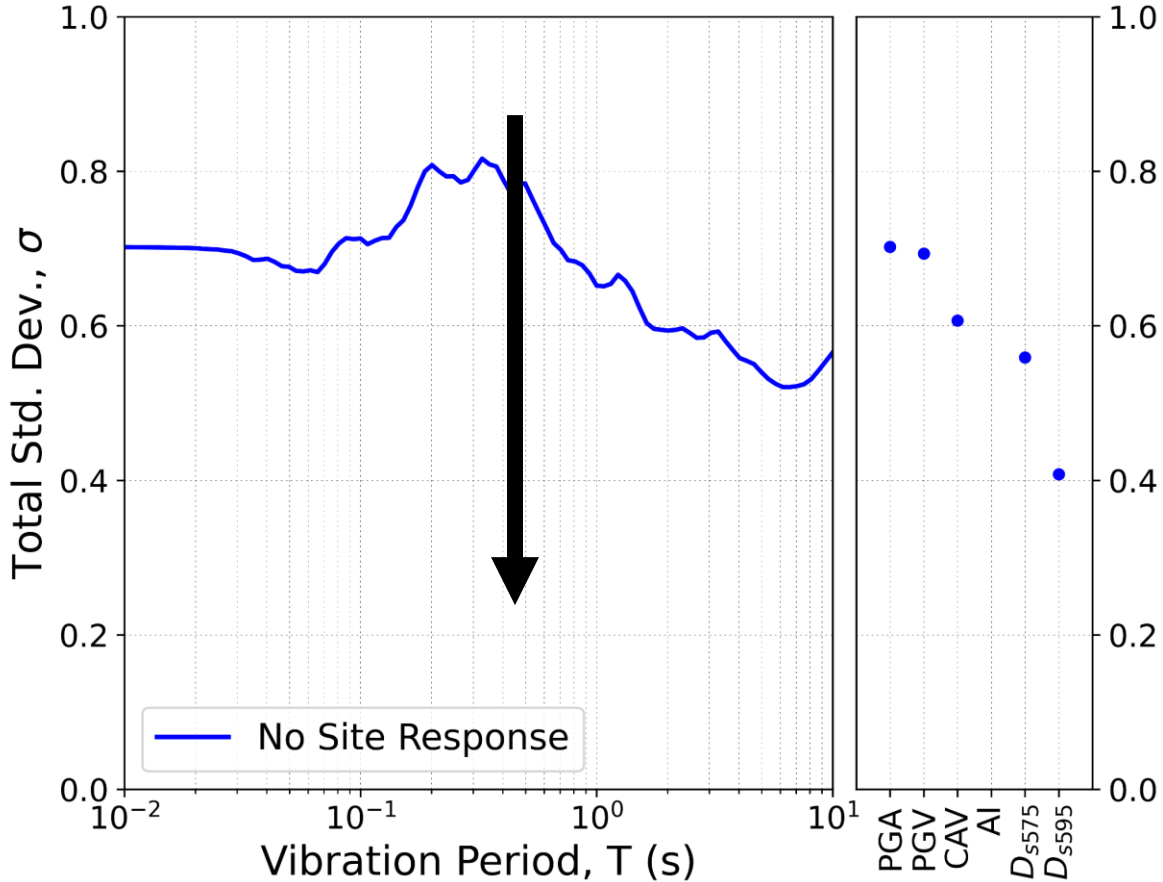
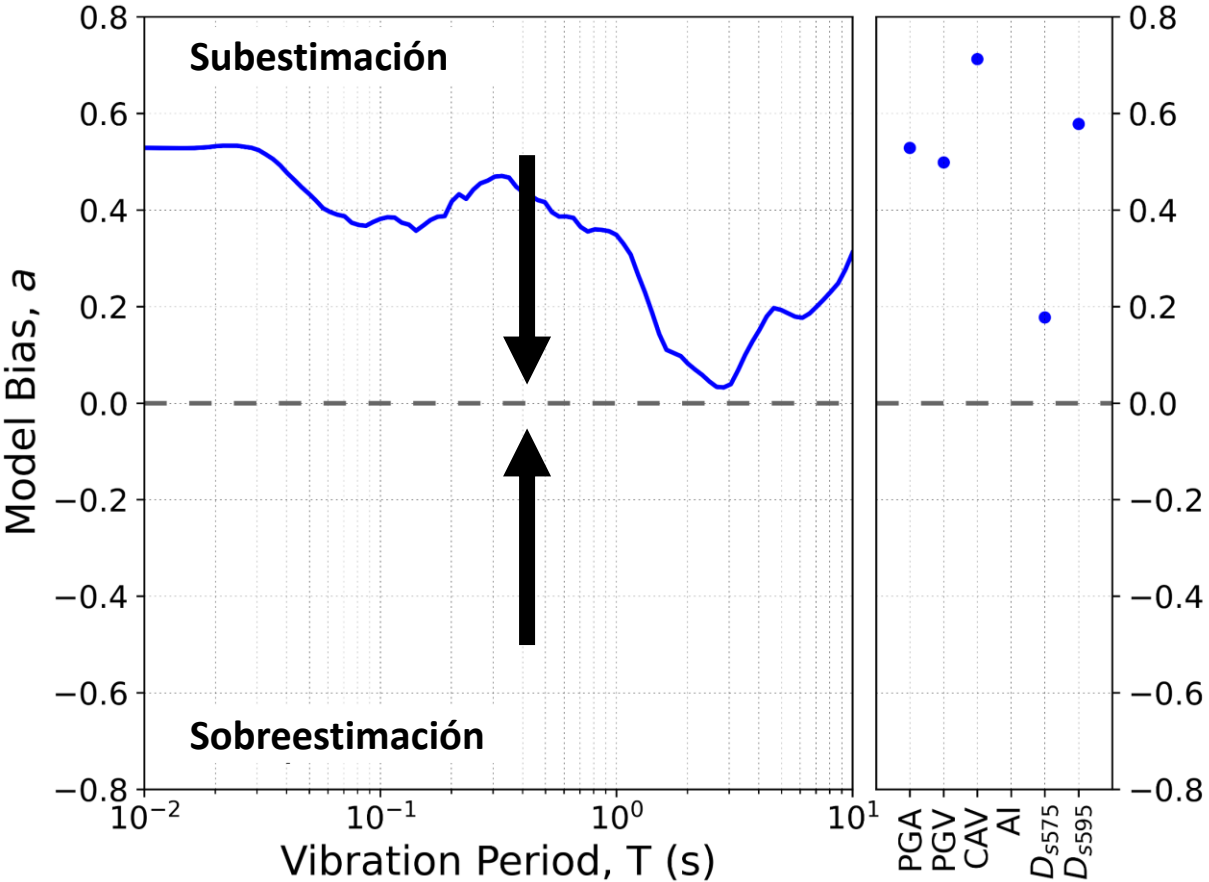
Residual Sitio-a-Sitio

Desviación sistemática del residual de un sitio dado del sesgo del modelo

a

Sesgo del Modelo y Variabilidad Total

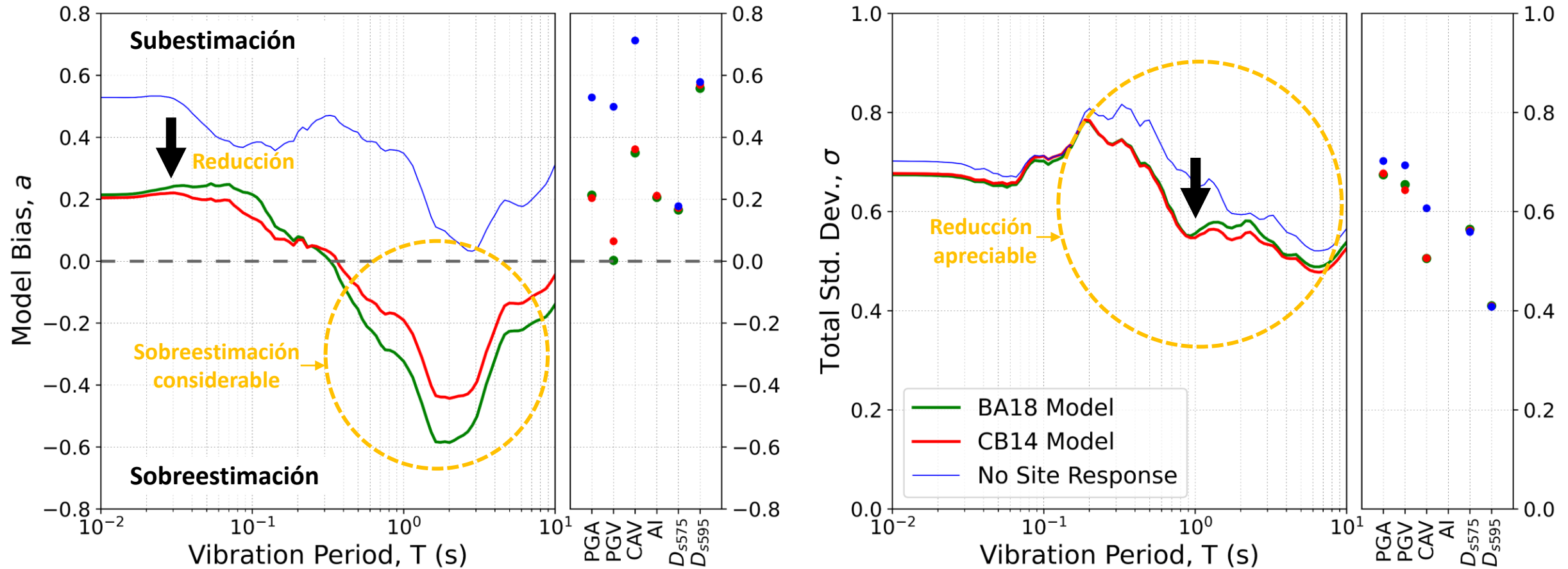
Sin Modelación de Efectos de Sitio Superficiales ($V_{s,min} = 500 \text{ m/s}$)



↑
(Aceleraciones Espectrales)

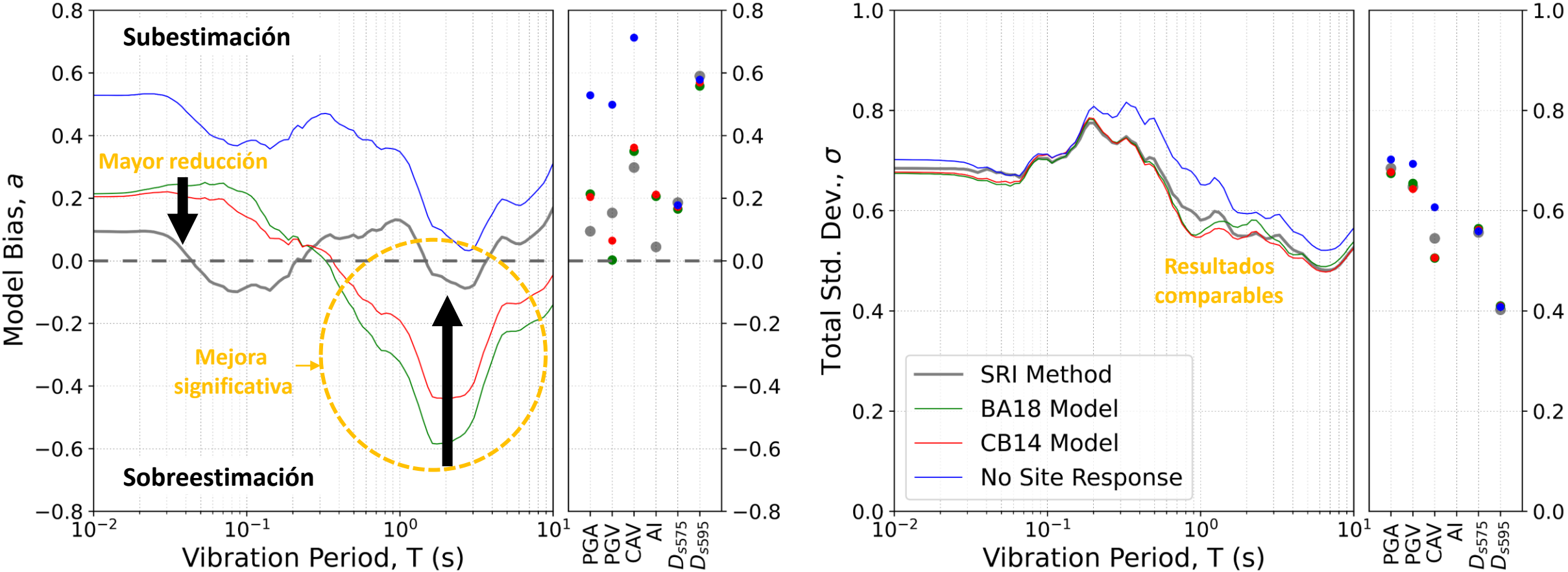
Sesgo del Modelo y Variabilidad Total

Enfoque Estándar (basado en V_{s30}): Factor de Sitio Empírico



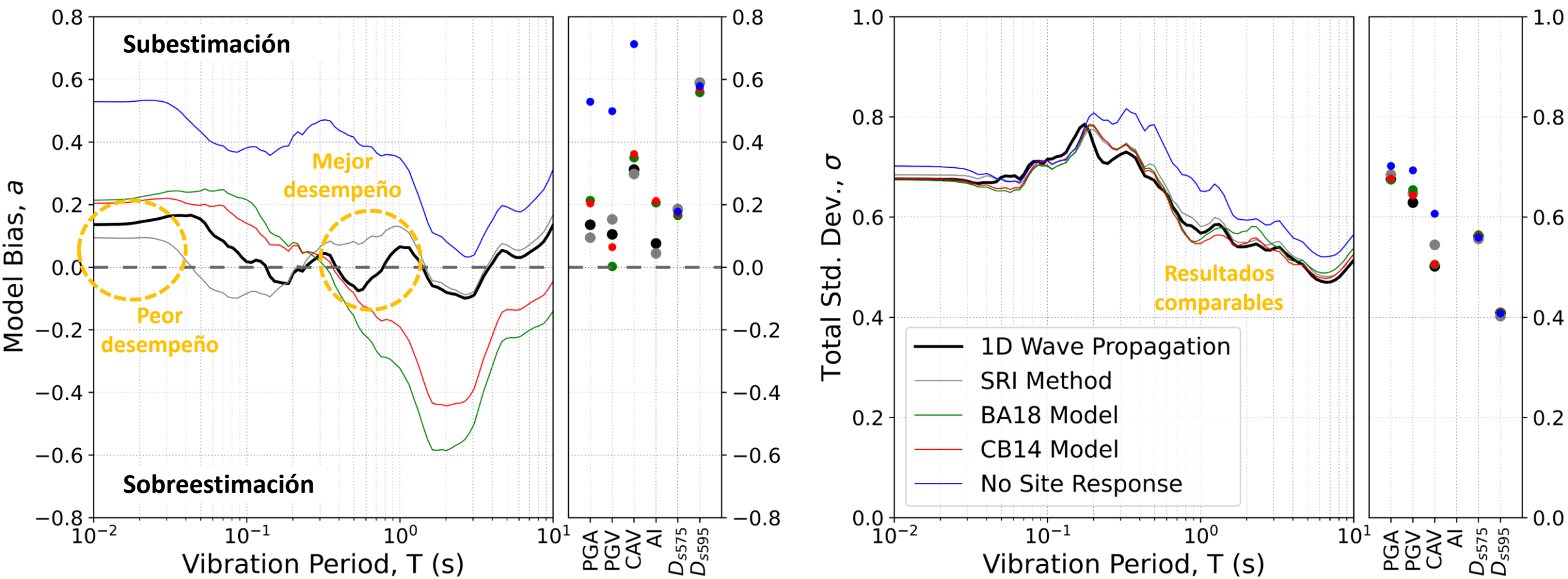
Sesgo del Modelo y Variabilidad Total

Enfoque Alternativo 1: Método SRI



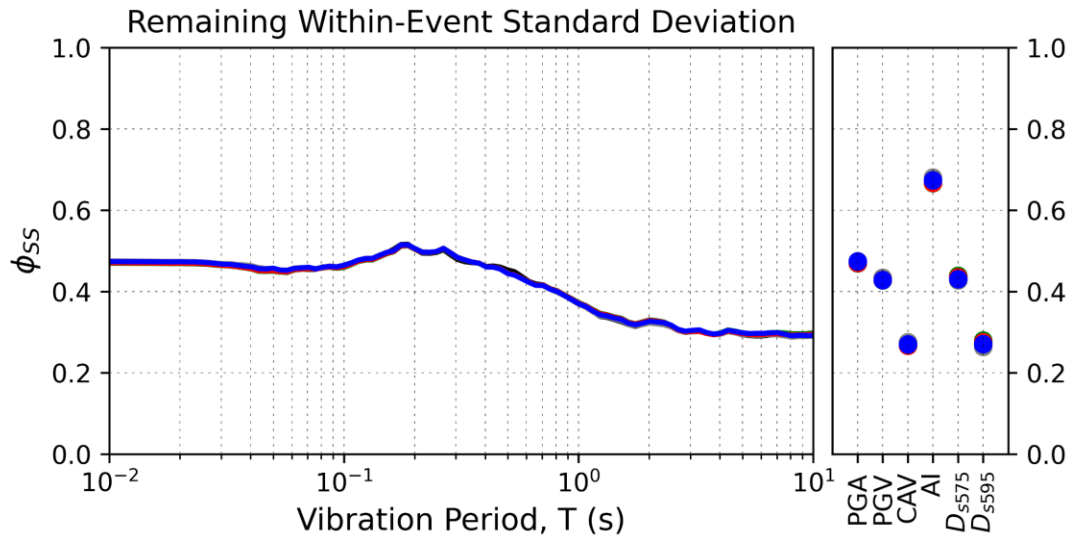
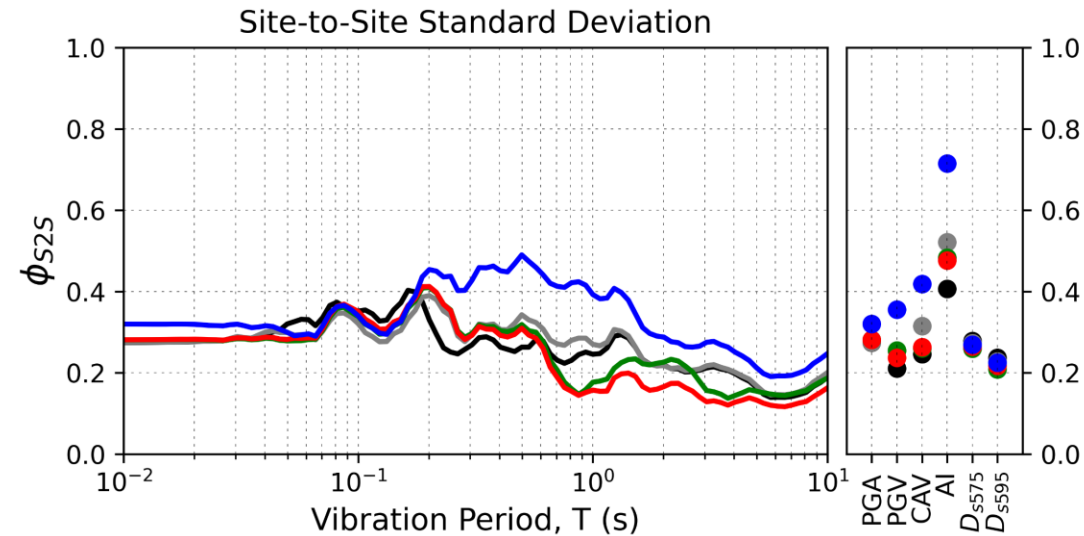
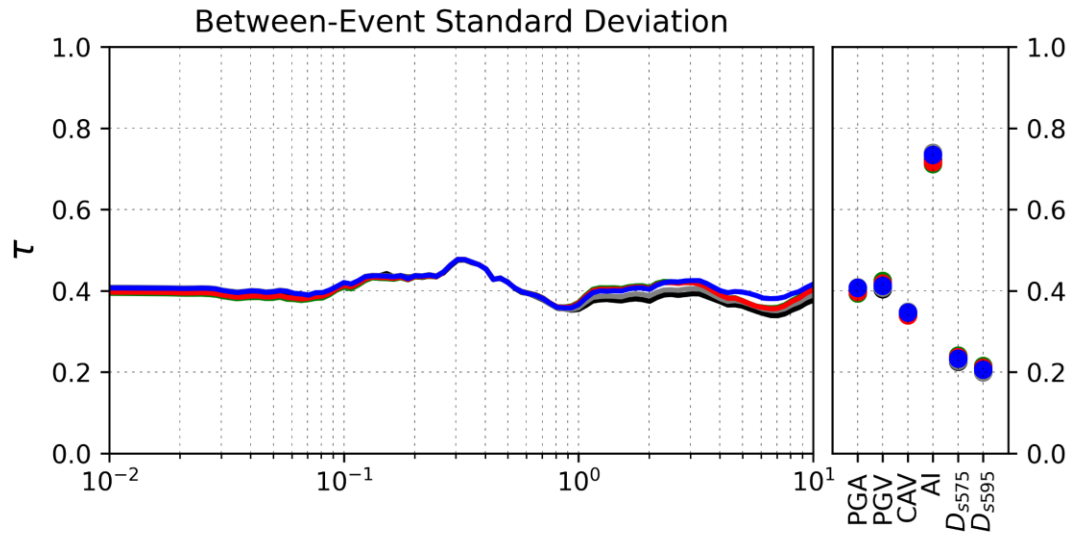
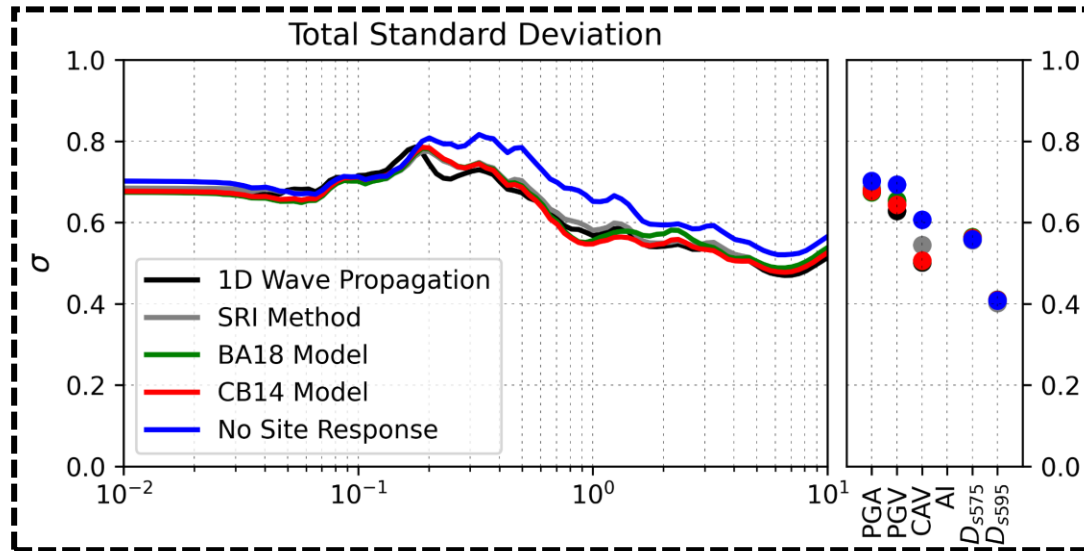
Sesgo del Modelo y Variabilidad Total

Enfoque Alternativo 2: Análisis de Respuesta de Sitio 1D



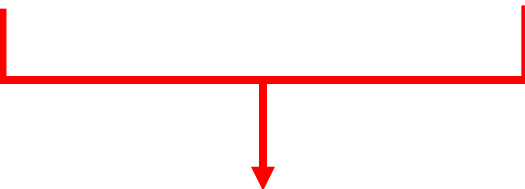
Descomposición de la Variabilidad

$$\boxed{\sigma^2} = \tau^2 + \phi_{S2S}^2 + \phi_{SS}^2$$

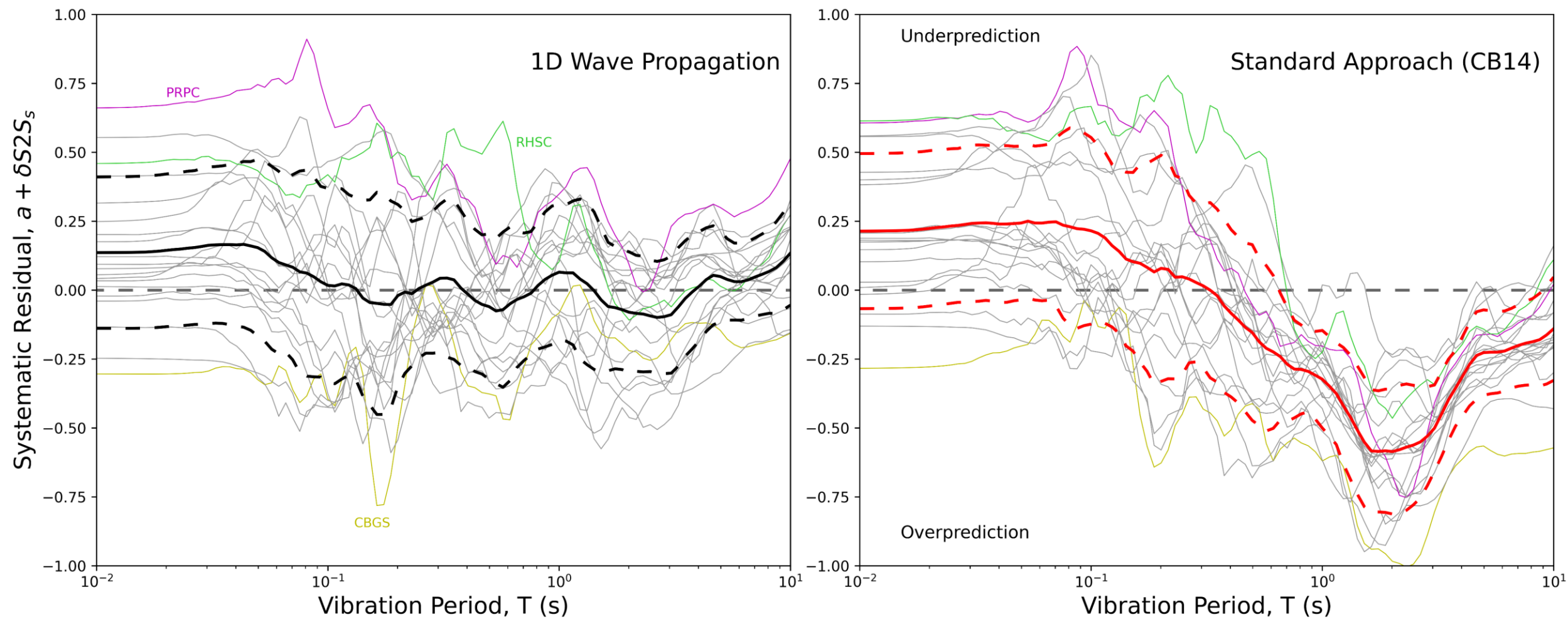


Resultados Desagregados por Sitio

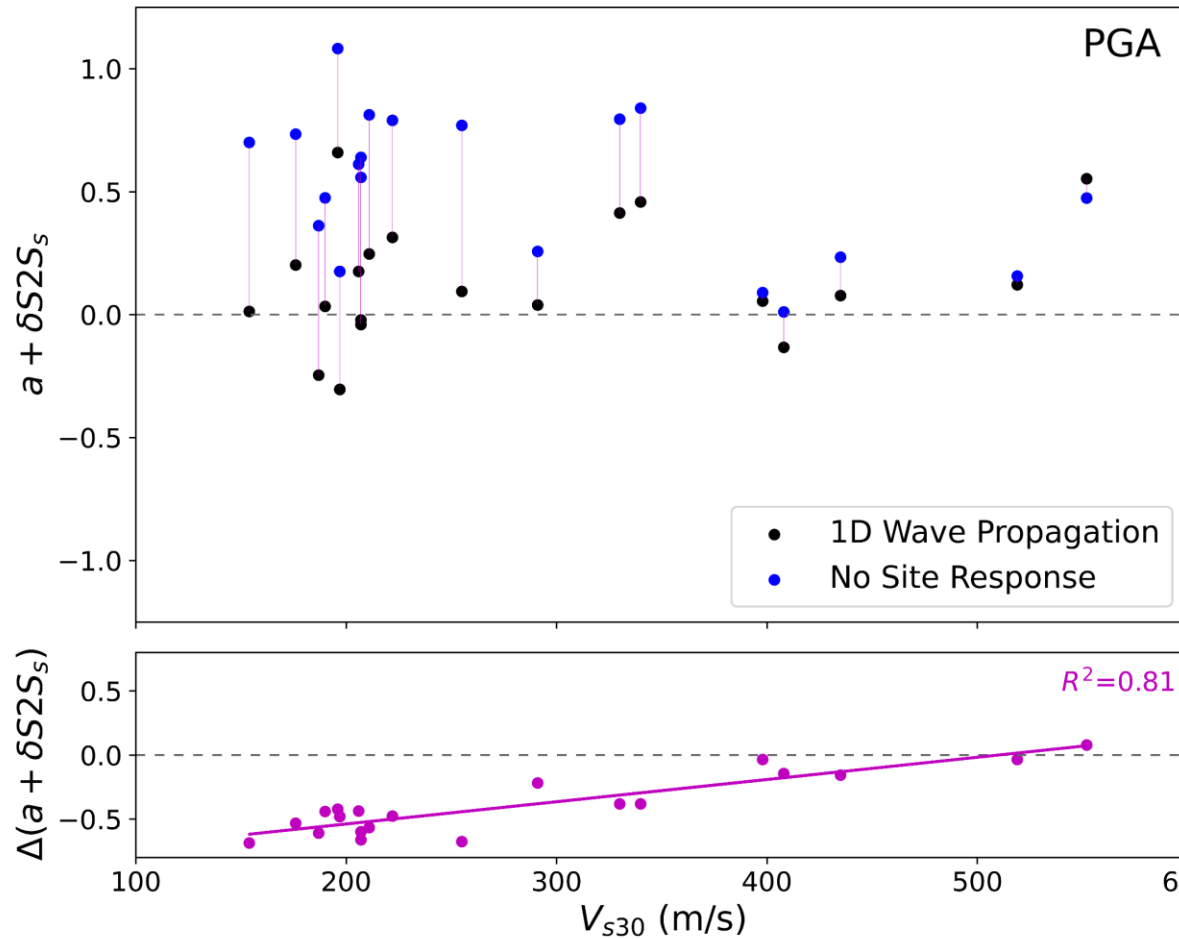
Pregunta de Investigación: ¿**Bajo qué condiciones** podemos mejorar las predicciones al utilizar métodos que incorporen más información sitio-específica?

$$\Delta_{es} = \underbrace{a}_{\text{Sesgo del modelo (Model bias)}} + \underbrace{\delta B_e}_{\text{Residual entre-eventos}} + \underbrace{\delta S2S_s}_{\text{Residual sitio-a-sitio}} + \underbrace{\delta W_{es}^0}_{\text{Residual restante}}$$

$$a + \delta S2S_s$$

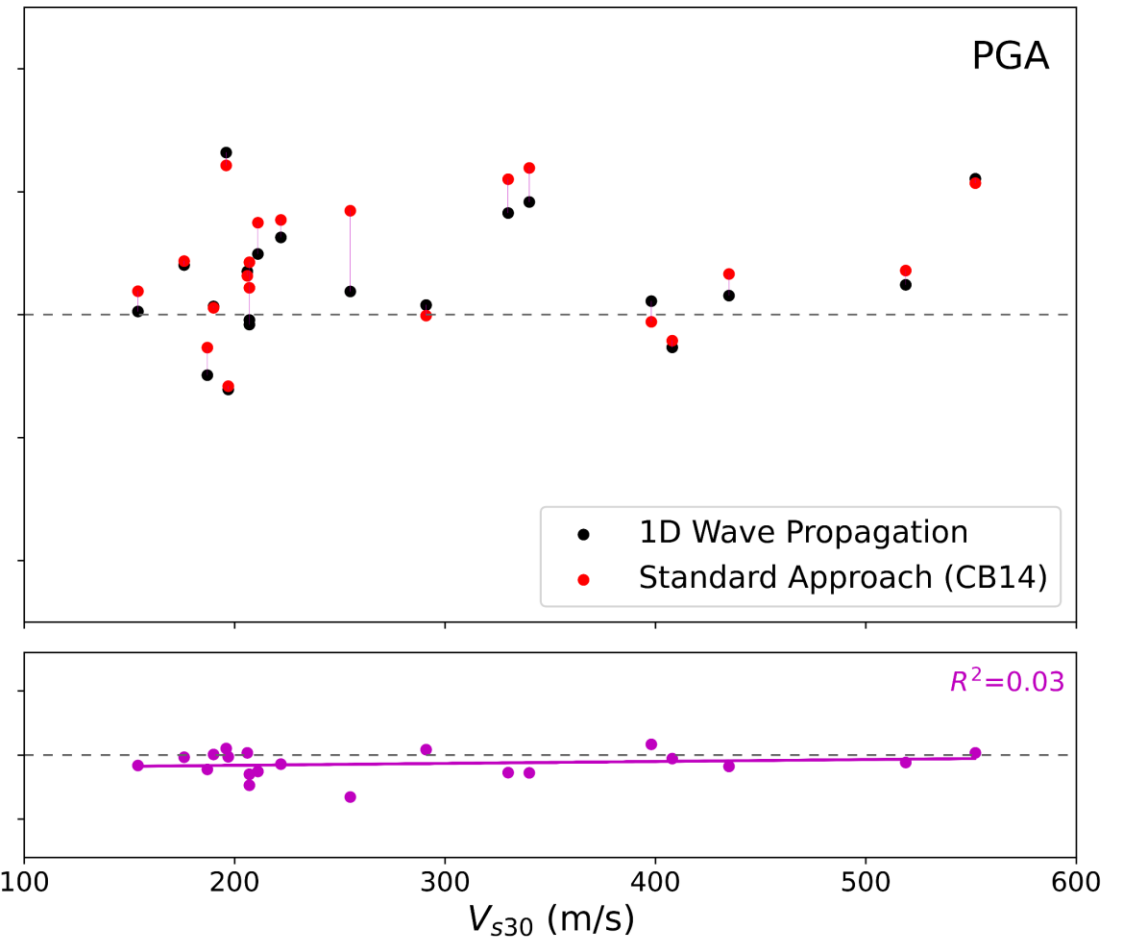
Resultados Desagregados por Sitio



¿Ayuda V_{s30} a responder la pregunta?

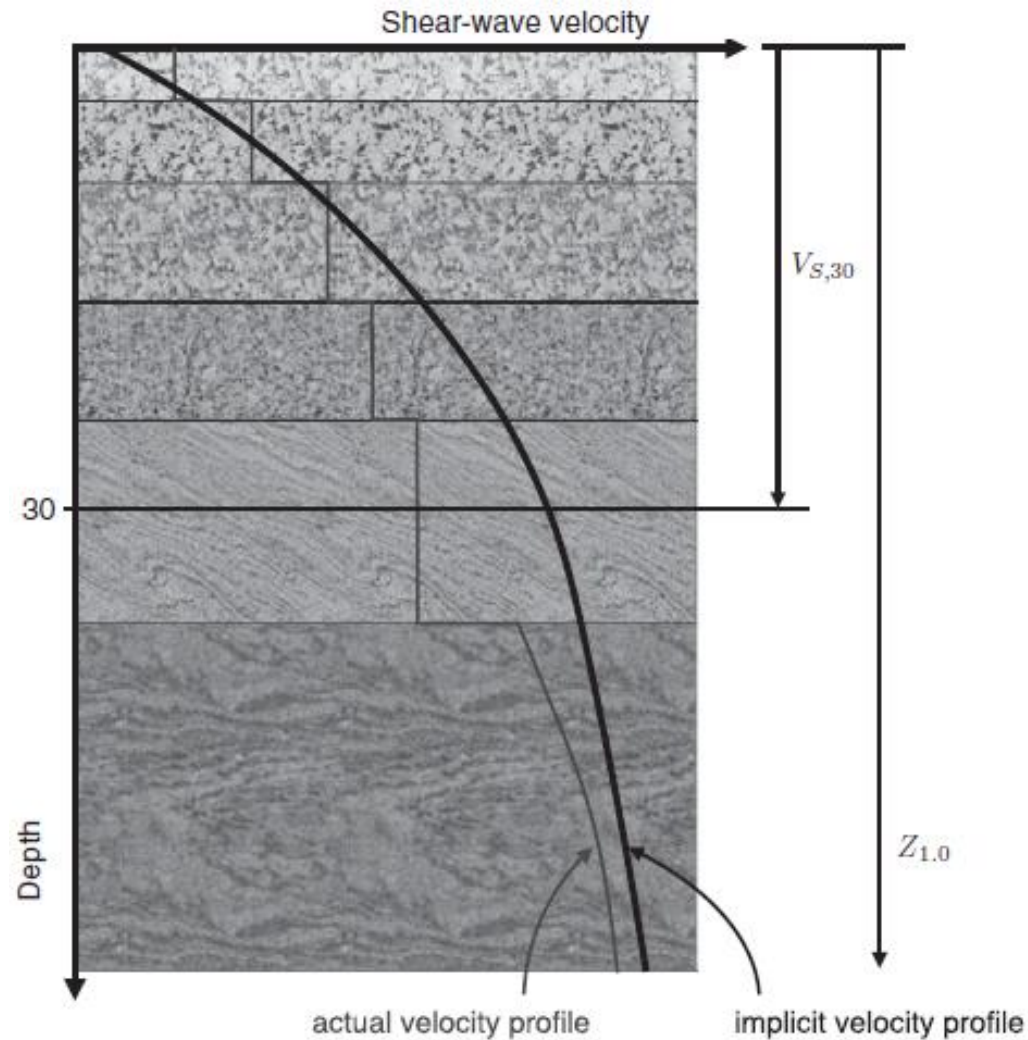


V_{s30} es un buen predictor



V_{s30} es un mal predictor...

Aprendiendo de las Limitaciones del Enfoque Estándar...



Existen múltiples perfiles con el mismo $V_{S,30}$

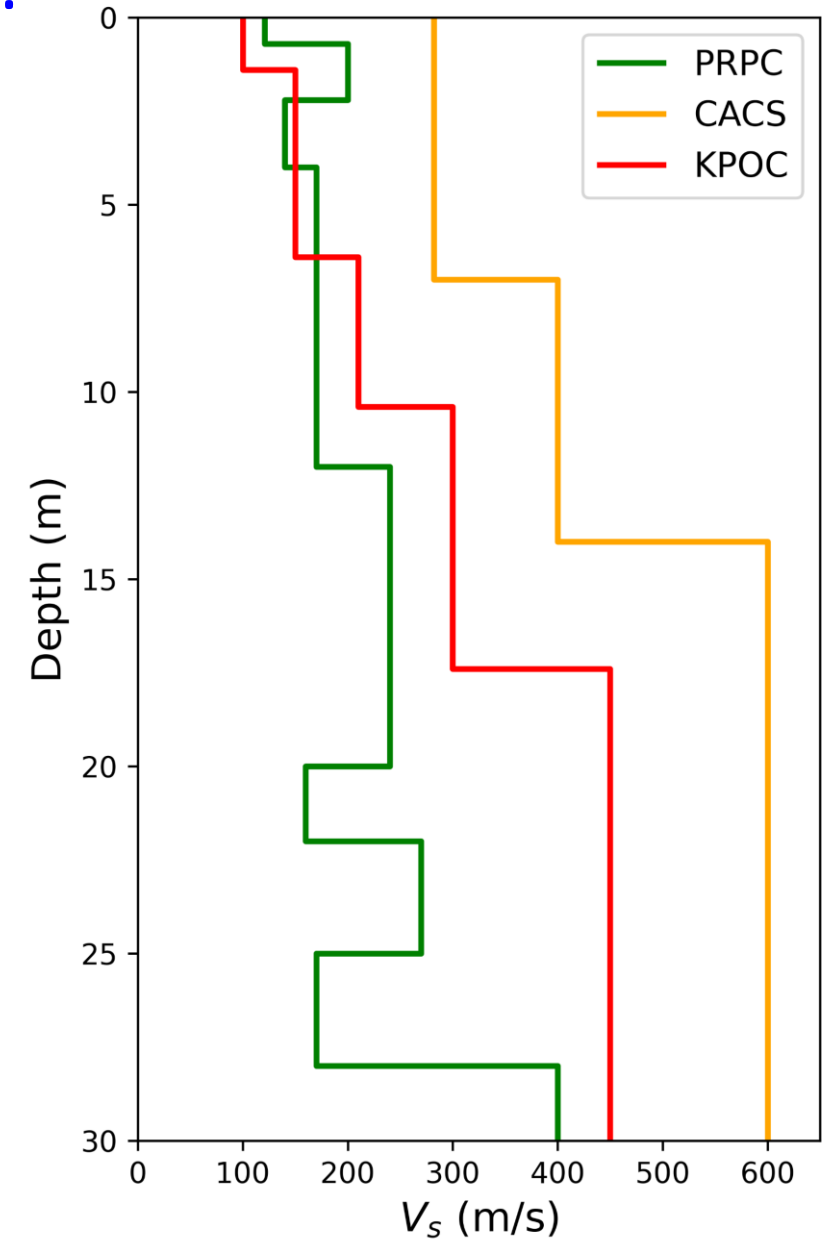
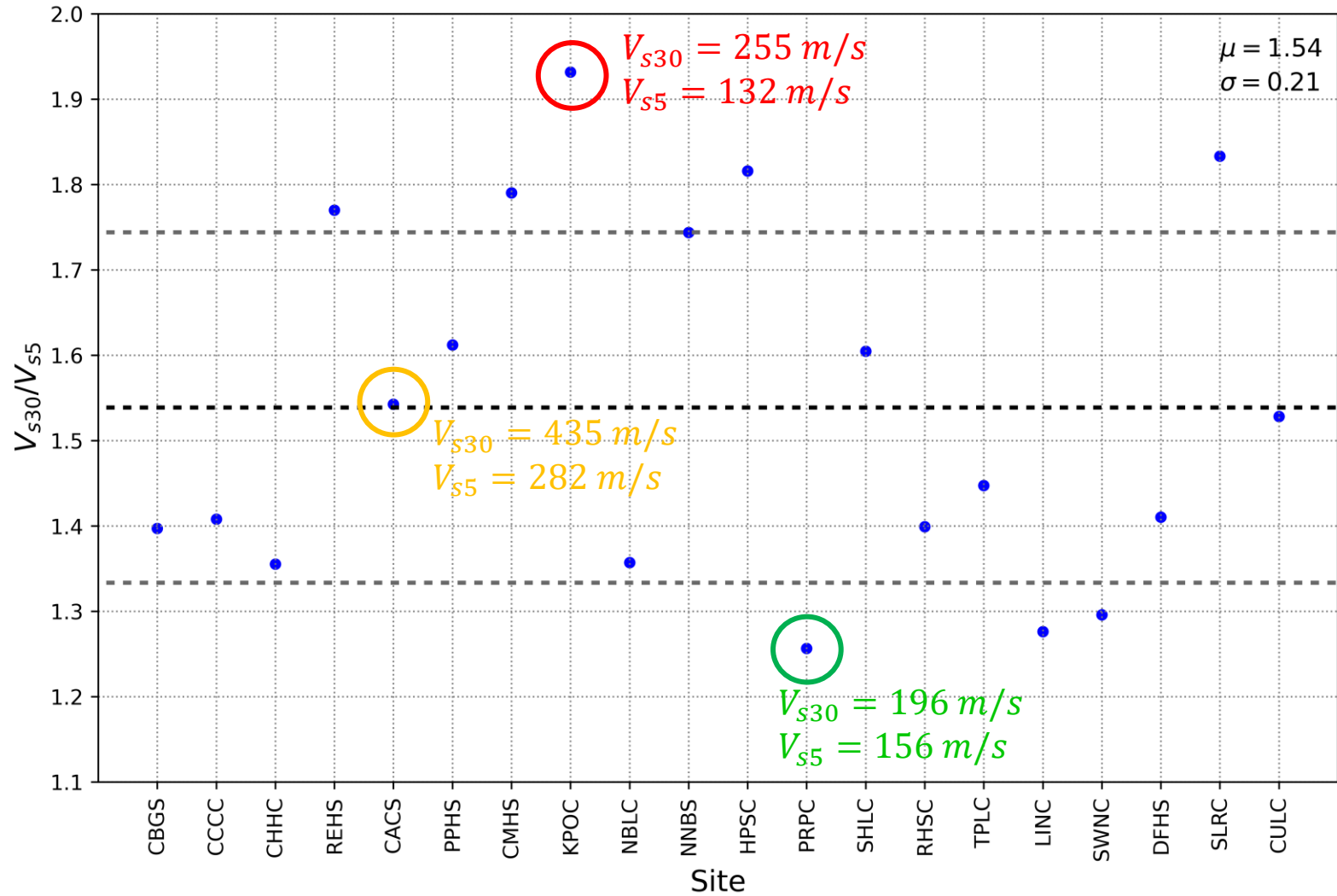
Existe un “perfil implícito” en el modelo empírico por cada $V_{S,30}$



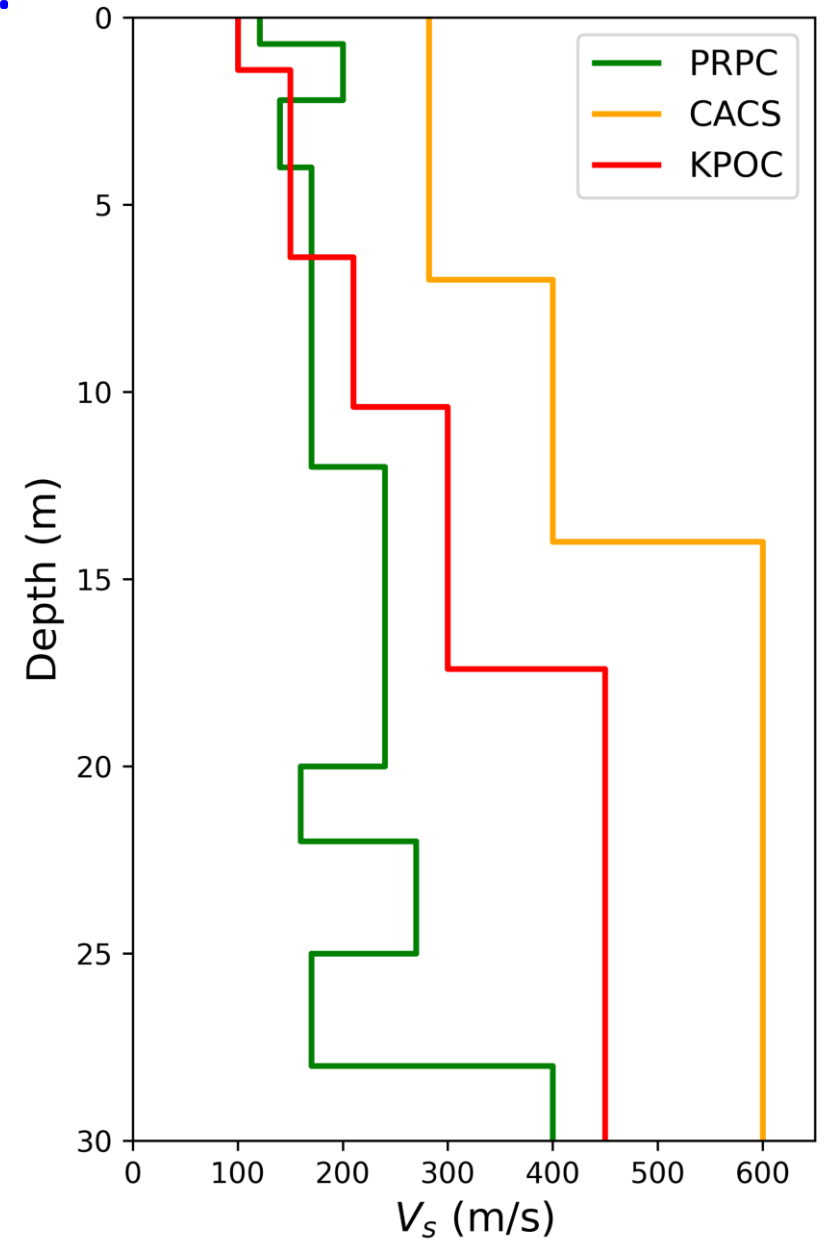
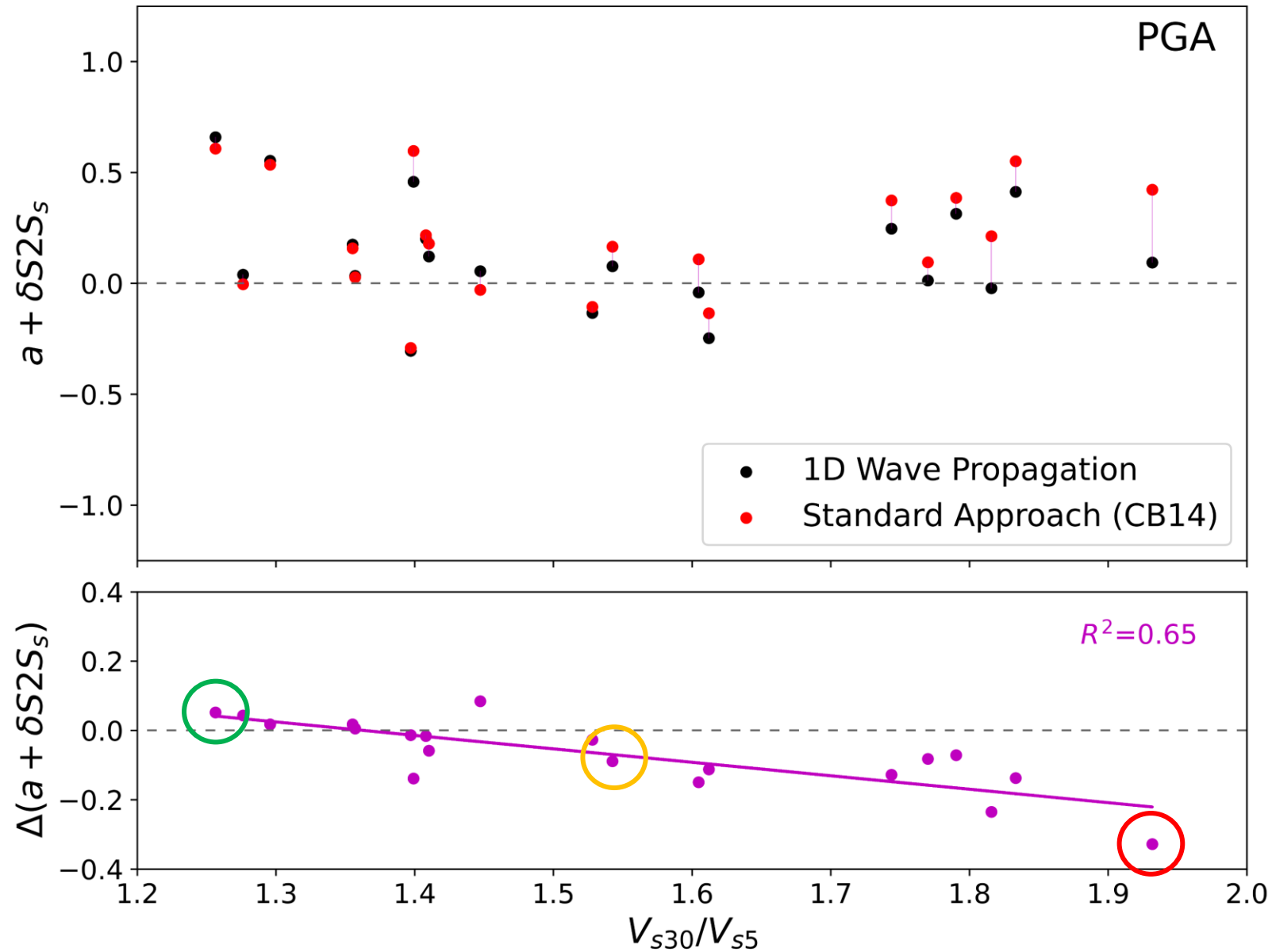
A diferencia de $V_{S,30}$, un parámetro como $V_{S,30}/V_{S,5}$ describe la forma del perfil de velocidad

Baker et al. (2021)

¿Ayuda V_{s30}/V_{s5} a responder la pregunta?



¿Ayuda V_{s30}/V_{s5} a responder la pregunta?



Comentarios Finales

- En general, la modelación de efectos de sitio superficiales con cualquiera de los métodos estudiados **mejoró la exactitud y precisión de las simulaciones**
- El uso de los dos métodos alternativos estudiados resultó en **una reducción significativa del sesgo del modelo** relativo al enfoque estándar (basado en Vs30), sin embargo, **la variabilidad en el residual resultó ser similar**
- Una mirada más detallada a los resultados desagregados indica que el beneficio de usar los enfoques alternativos es muy dependiente de las características del sitio

Modelación de Efectos de Sitio en Simulaciones del Movimiento Sísmico del Terreno: Aprendiendo de Pequeños Terremotos en Nueva Zelanda

Felipe Kuncar¹

Brendon Bradley¹, Chris de la Torre¹, Adrian Rodriguez-Marek²,
Chuanbin Zhu¹, Robin Lee¹

¹University of Canterbury, Nueva Zelanda

²Virginia Tech, Estados Unidos