



Taller:

"Divulgación de Insumos Técnicos para la Actualización de la Normativa Nacional para Diseño y Construcción en El Salvador"



Universidad Centroamericana
José Simeón Cañas



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE



MINISTERIO DE
OBRAS PÚBLICAS Y
DE TRANSPORTE



Colaboración del
Pueblo Japonés





Plan de acción para implementar el Índice de Gobernabilidad y Políticas Públicas para la Gestión del Riesgo de Desastres (EST1267)



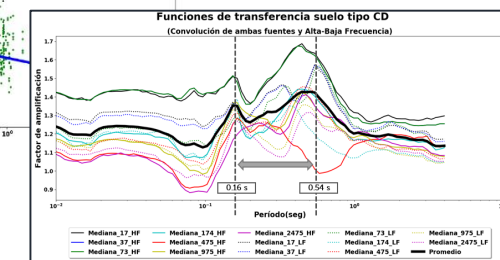
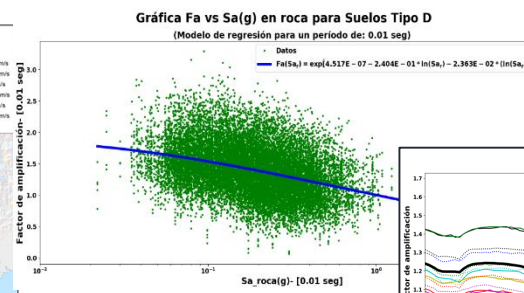
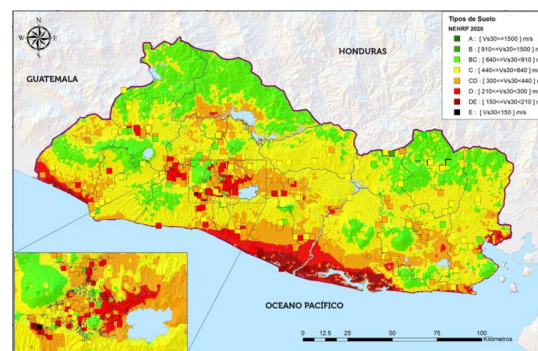
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y DE TRANSPORTE

Caracterización de tipos de suelo y determinación de factores de amplificación a nivel nacional

Presenta: Luis Ernesto Mixco Durán. Ing. Civil, MSc, MBA



MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

Fecha: 07 de septiembre de 2021

Contenido general

1. Justificación de trabajo
2. Amplificación del sitio
3. Antecedentes y estudios realizados a nivel nacional
4. Metodología empleada para caracterización
5. Mapa de zonificación sísmica "homogénea", en términos de V_s30
6. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Empíricos.
7. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Analíticos.
8. Factores de amplificación
9. Conclusiones



Justificación del trabajo

Actualmente,
los códigos
sísmicos

A nivel de país, se siguen utilizando **factores de amplificación** para considerar los **efectos de sitio** sobre espectros de diseño

En los
peores
casos

Estos factores no suelen presentar una **justificación técnica** ni una correspondencia con los tipos de suelo.

En los
mejores
casos

Estos factores si presentan una adecuada **interpretación geotécnica y geológica.**

Únicamente para
proyectos de
gran
envergadura

Suelen recabarse estudios específicos de las propiedades de los suelos y realizar análisis de respuesta de "sitio-específico", mediante **modelaciones analíticas.**

Justificación del trabajo

Con este
proyecto

Se pretende realizar una **valoración** sobre la **caracterización dinámica** de los suelos representativos de El Salvador, a través del uso de **métodos empíricos** (con registros acelerográficos propios de ES) **y analíticos** (simulaciones similares al análisis de sitio-específico) de evaluación de respuesta de sitio.

Fijados al
objetivo

Estos métodos servirán como **insumos técnicos** para la generación de **nuevos factores de amplificación** (que evidencien la verdadera forma espectral de nuestras condiciones)

Plantea
un RETO
enorme

Al considerar los análisis a nivel nacional. Por lo que es necesario **recolectar toda la información** posible para llevar a cabo esta tarea.

Siguientes
pasos

Incrementar las bases de datos e ir reduciendo las escalas de los productos obtenidos, y utilizar los estudios de microzonificación existentes que proporcionarían la conexión entre los resultados de este proyecto y los **mapas de iso-períodos**

Contenido general

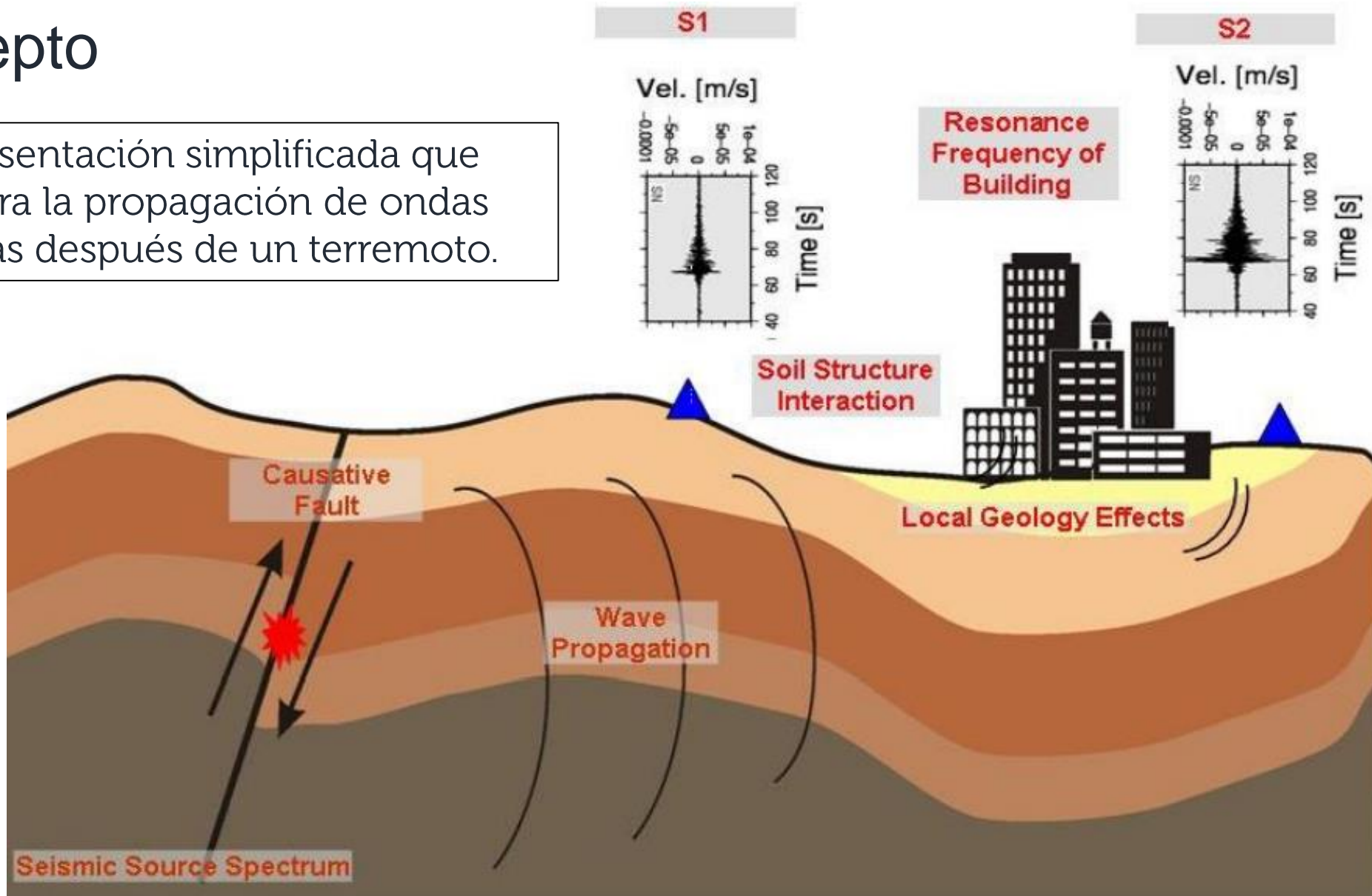
1. Justificación de trabajo
2. Amplificación del sitio
3. Antecedentes y estudios realizados a nivel nacional
4. Metodología empleada para caracterización
5. Mapa de zonificación sísmica "homogénea", en términos de V_s30
6. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Empíricos.
7. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Analíticos.
8. Factores de amplificación
9. Conclusiones



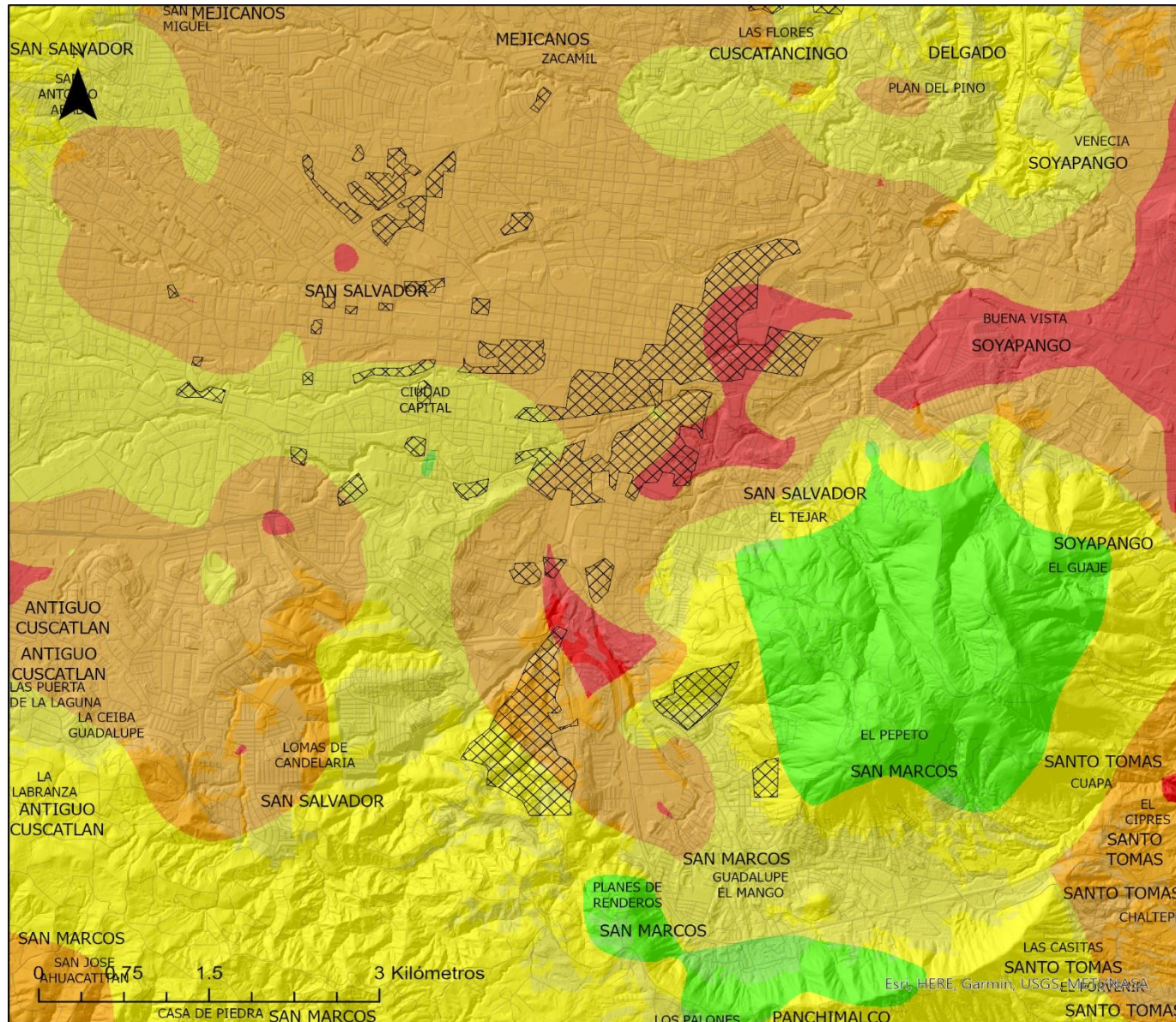
Amplificación del sitio

Concepto

Representación simplificada que muestra la propagación de ondas sísmicas después de un terremoto.



Amplificación del sitio – Relación con daños



Daños_AMSS1986

bandera

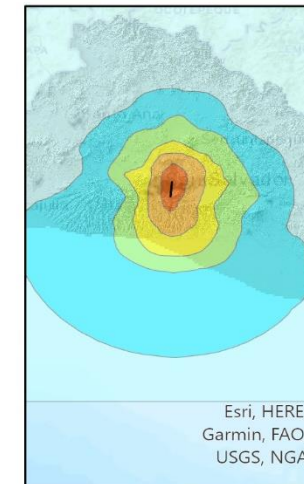
Roja

Mapa Vs30

Value

- Suelo muy blando
- Suelo blando
- Suelo poco duro
- Suelo duro
- Roca blanda

La distribución geográfica de daños por sismos parece correlacionarse directamente con el grado de amplificación causada por las capas sedimentarias superiores del subsuelo, y que afectan en la respuesta estructural de diferentes tipologías o configuraciones constructivas a lo largo del país.



* *Depende de período estructural amplificado*

Amplificación del sitio – Relación con daños

Factores que más influyen

FACTORES GEOLÓGICOS

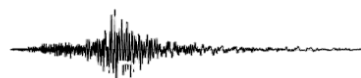


Modifican la señal sísmica

- Duración
- Contenido frecuencial
- Amplitud



FACTORES TOPOGRÁFICOS



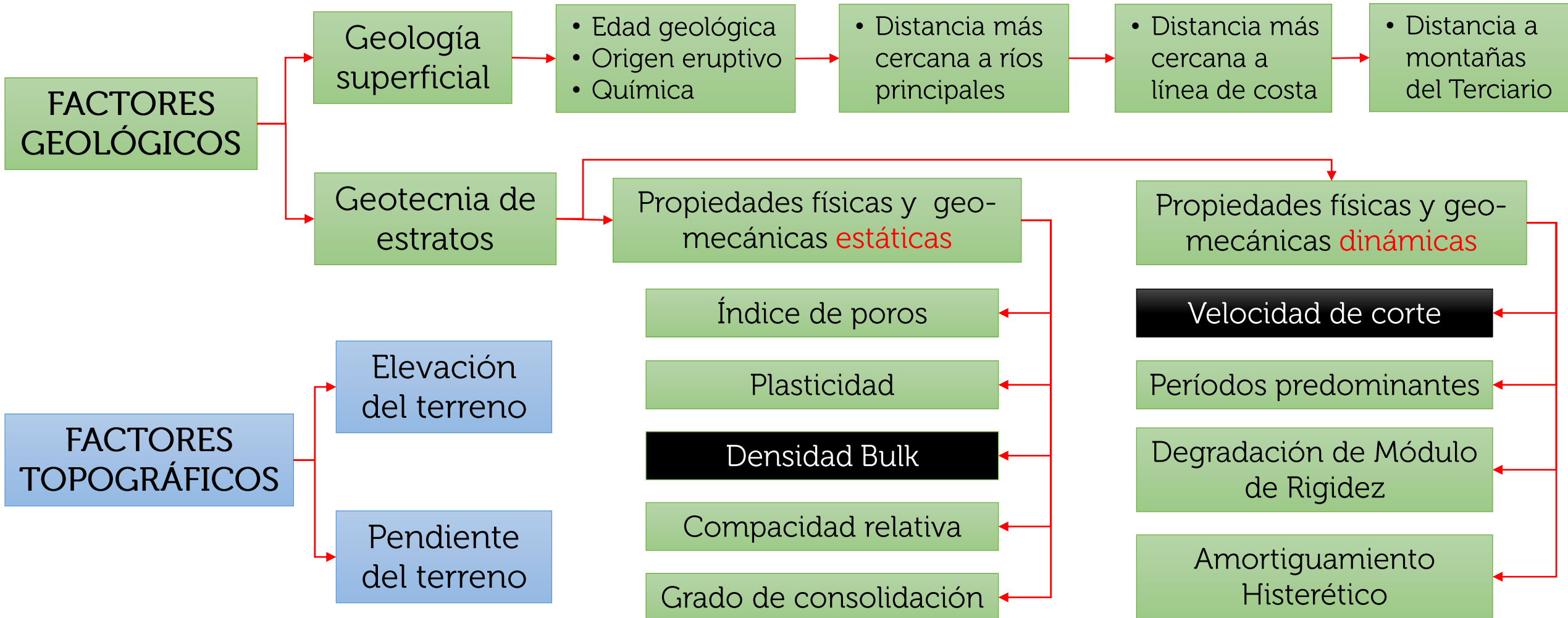
Fuente: 2001. Diario de Hoy



Fuente: SNET 2001.
Foto tomada durante réplica de terremoto 13 de enero de 2001

Amplificación del sitio – Relación con daños

Factores que más influyen

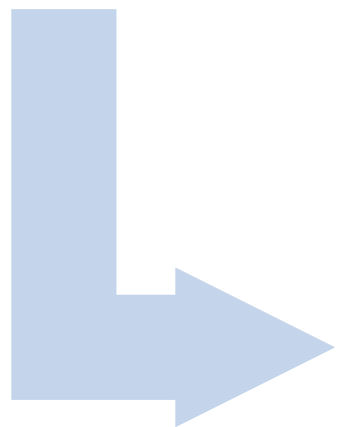


Contenido general

1. Justificación de trabajo
2. Amplificación del sitio
3. Antecedentes y estudios realizados a nivel nacional
4. Metodología empleada para caracterización
5. Mapa de zonificación sísmica "homogénea", en términos de V_s30
6. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Empíricos.
7. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Analíticos.
8. Factores de amplificación
9. Conclusiones



Antecedentes y estudios realizados a nivel NACIONAL



Norma Técnica de Diseño por Sismo de ES - 1994



Antecedentes y estudios realizados

A nivel nacional : macro-zonificación – NTDS 1994

No hay muchos detalle sobre la base de esta tabla de clasificación de sitios, sin embargo, parece que **fueron calibrados según condiciones del país**

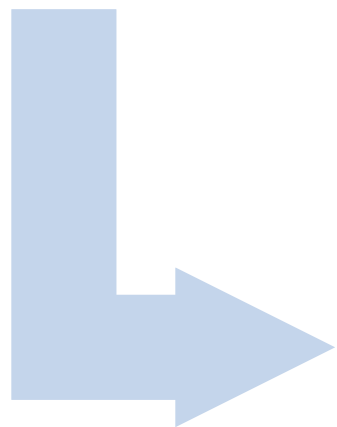
No se sabe si se utilizó información de caracterización dinámica de suelos del **estudio de ITALTEKNA, '89**

Se sabe que se compilaron datos geotécnicos y geológicos de calicatas y pozos; **pero No como se utilizaron**

Tipo	Descripción	C _o	T _o
S1	<ul style="list-style-type: none"> Un suelo similar a una roca, caracterizado por una velocidad de ondas sísmicas de corte superior a 500 m / s. Condiciones rígidas o densas del suelo donde la profundidad es inferior a 30 m. 	2.5	0.3
S2	<ul style="list-style-type: none"> Suelo con condiciones rígidas, tan rígidas o densas donde la profundidad del suelo es de 30 m o menos. 	2.75	0.5
S3	<ul style="list-style-type: none"> Un perfil de suelo con un espesor de entre 4 y 12 metros de arcillas suaves con o sin capas intermedias de suelos no cohesivos. 	3.0	0.6
S4	<ul style="list-style-type: none"> Perfil de suelo, caracterizado por una velocidad de onda sísmica de corte por debajo de 150 m / s, con una capa de arcilla blanda o suelo no cohesivo de más de 12 m de espesor. 	3.0	0.9

Fuente: NTDS, 1994

Antecedentes y estudios realizados a nivel NACIONAL



Proyecto ANDES – 2005:
Método de Evaluación del Riesgo y Prevención de
Deslizamientos Catastróficos Inducidos por
Terremotos

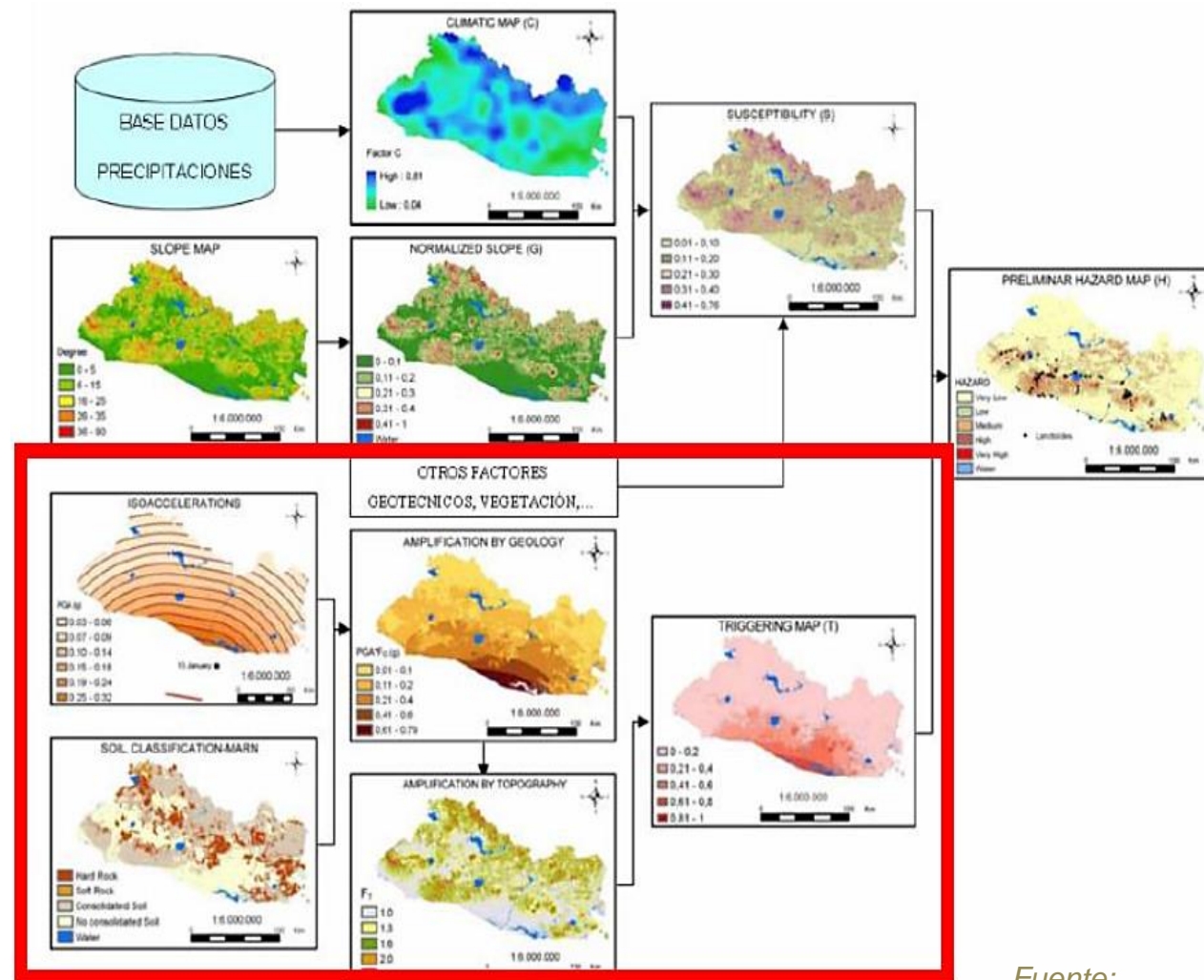


Antecedentes y estudios realizados

A nivel nacional : macro-zonificación – ANDES, 2005

Consideración de la amplificación del terreno y su relación con las PGA de terremoto del 13 de enero 2001.

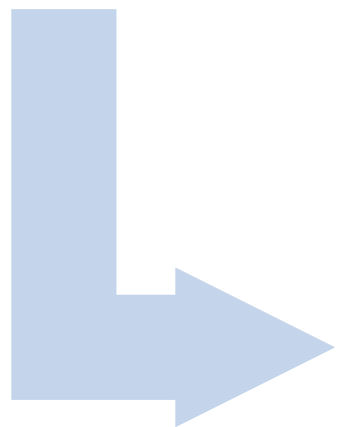
Esta metodología considera tanto el efecto topográfico como el geológico



CLASE	FUNCIÓN DE AMPLIFICACIÓN
I	Amplificación=1.00
II	Amplificación=0.66*Aceleración+1.33
III	Amplificación =0.24*Aceleración+1.62
IV	Amplificación =2.44

Pendiente	Valor de Amplificación
0° - 5°	Amplificación =1.00
6° - 10°	Amplificación =1.50
11° - 20°	Amplificación =2.00
21° - 35°	Amplificación =2.50
35° - 90°	Amplificación =3.00

Antecedentes y estudios realizados a nivel NACIONAL



Proyecto del Climate & Development Knowledge Network (CDKN) – 2016:
Fortalecimiento Institucional, Integración de Factores Climáticos y Vulnerabilidad Climática en El Salvador.

Antecedentes y estudios realizados

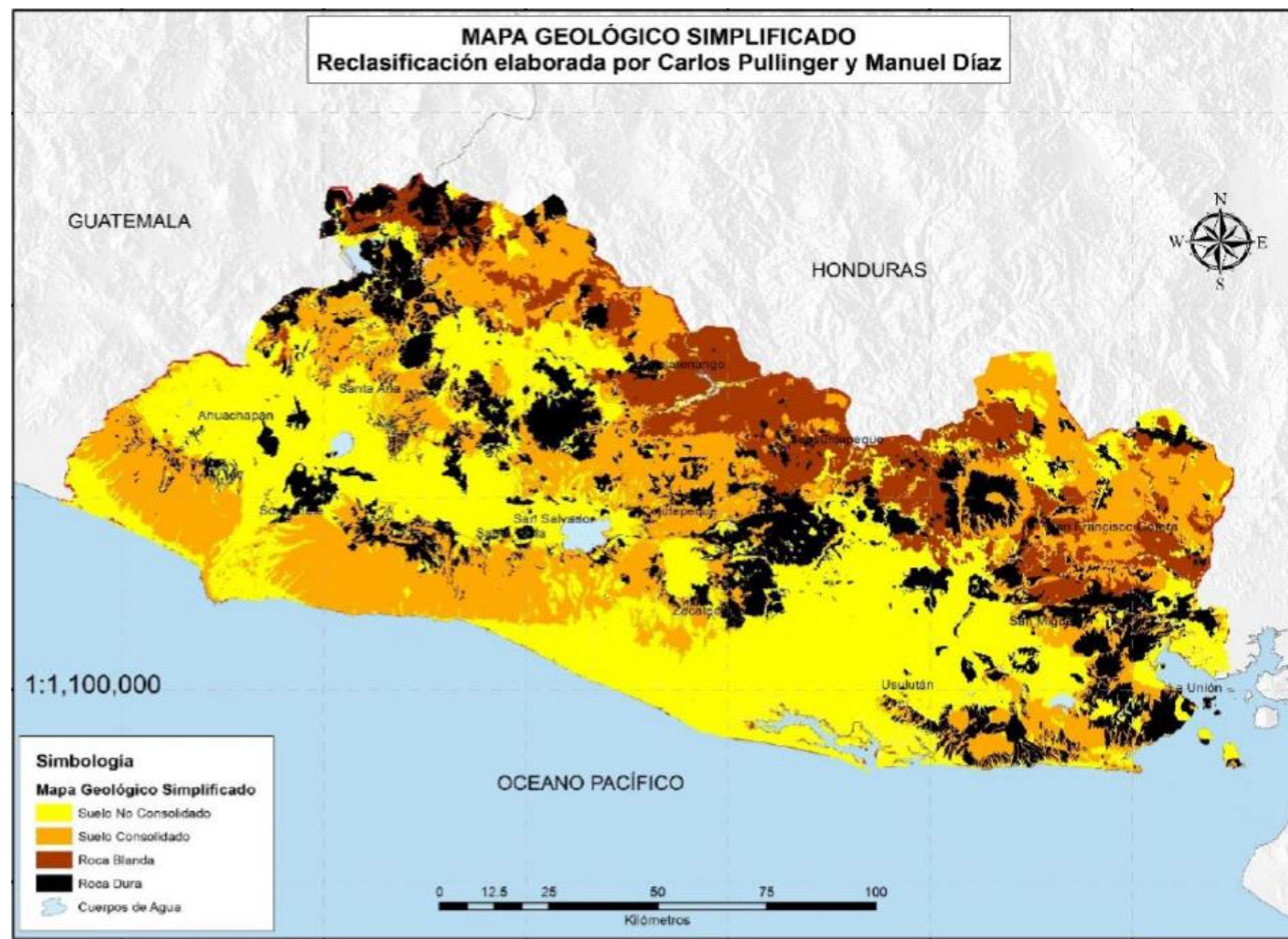
A nivel nacional : macro-zonificación – CDKN, 2016

Se proponen ciertos factores de amplificación **para PGA** acordes a un **mapa geológico simplificado**

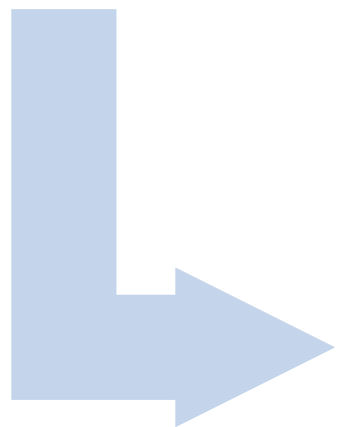
Estos factores se obtienen mediante **la correlación** las unidades simplificadas con las clases de sitios del NEHRP'97

Clase de amplificación	Clase equivalente de Sitio NEHRP ¹	Factor
Bajo (roca)	B	1,0
Medio	C	1,2
Alta	D	1,5

Fuente: CDKN, 2016



Antecedentes y estudios realizados a nivel NACIONAL



**Tesis doctoral de Ignacio García
(UPM) – 2016:**

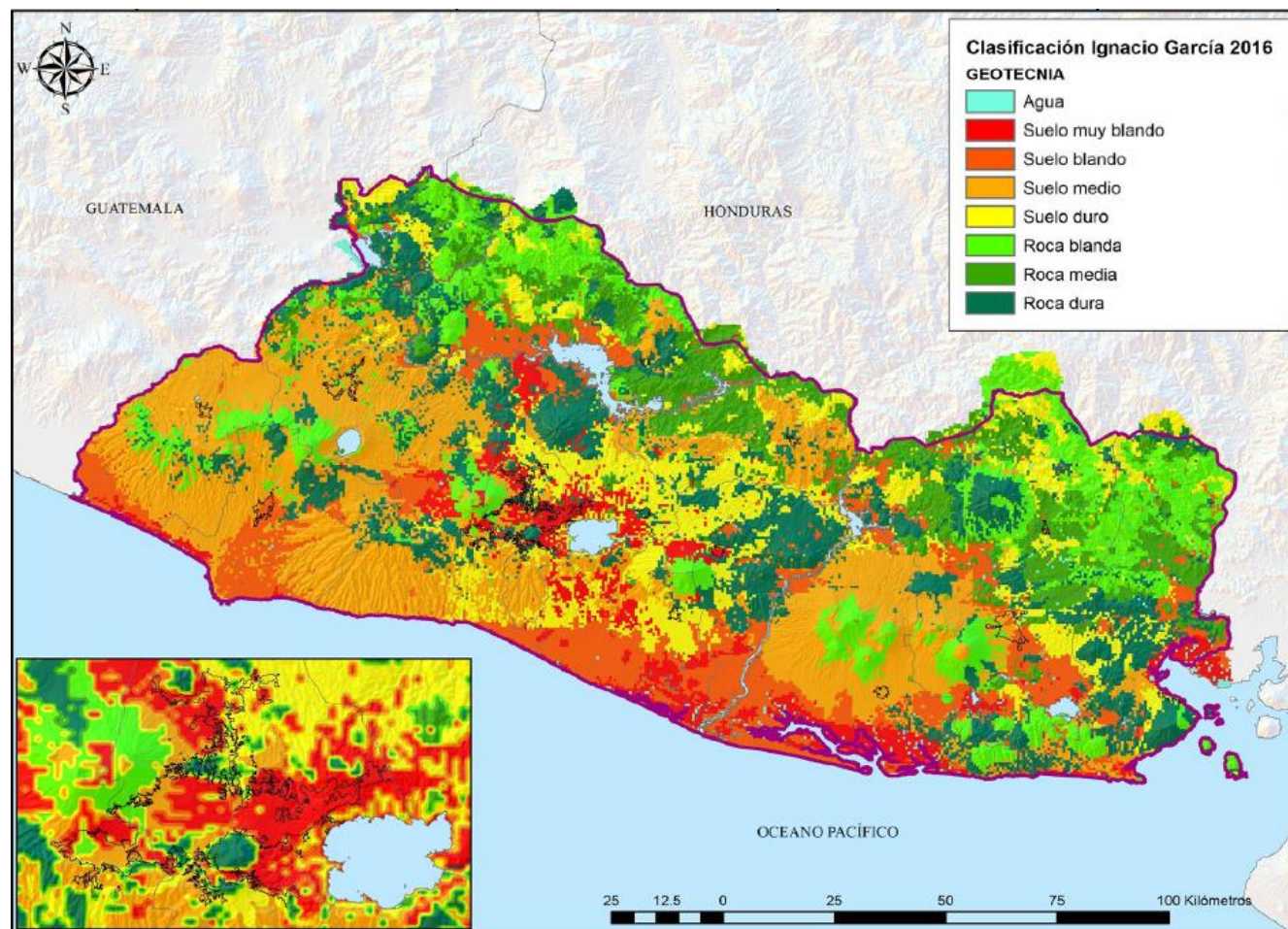
Factores geológicos-geotécnicos que controlan los deslizamientos inducidos por terremotos.

Antecedentes y estudios realizados

A nivel nacional : macro-zonificación – Ignacio García, 2016

Se realizó **una reclasificación** desde un punto de vista geotécnico tomando como base el mapa geológico de El Salvador.

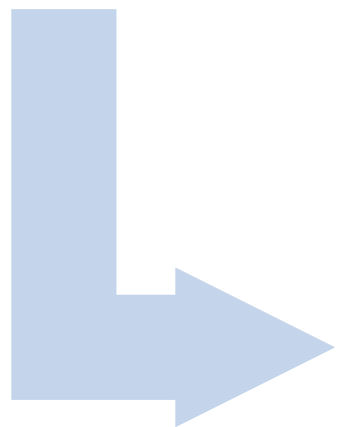
Se utilizaron un conjunto de **datos geotécnicos y criterios geológicos** para generar factores sobre la PGA.



No	Grupo litológico-geotécnico	Vs (m/s)			Ensayo Down-hole	Factor de amplificación		
		Mín	Med	Max		Mín	Med	Max
1	Roca dura	760	1130	1500	-	1	1	1
2	Roca media	760	1130	1500	-	1	1	1
3	Roca blanda	360	560	760	390-620	1	1	1
4	Suelo duro	250	300	350	-	1.3	1.7	1.7
5	Suelo medio	200	275	350	120-370	1.6	1.6	2
6	Suelo blando	100	150	200	-	1.6	1.8	2
7	Suelo muy blando	< 100	< 100	< 100	110	2	2.6	3
8	Suelo no consolidado	< 100	< 100	< 100	-	1	1	1

Fuente: Ignacio García, 2016

Antecedentes y estudios realizados a nivel NACIONAL



**Proyecto del Banco Mundial con
MINED y MARN-2018:**

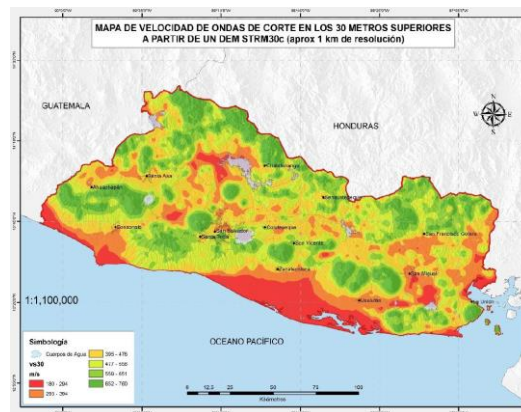
**Asesoría técnica para la Librería Global de
Infraestructura Escolar: El Salvador.**

Antecedentes y estudios realizados

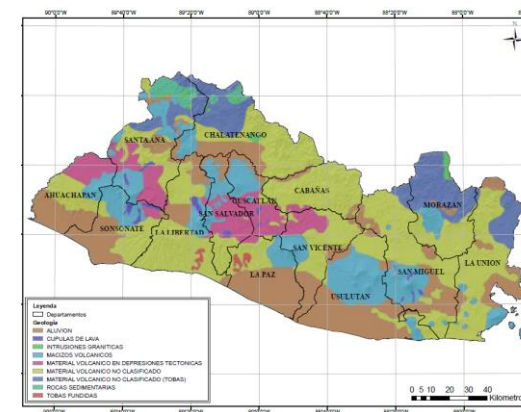
A nivel nacional : macro-zonificación – Banco Mundial, 2018

Metodología basada en construir **perfiles de suelo estocásticos** para cada tipo de suelo y análisis probabilista de la respuesta del suelo, vía **simulaciones MonteCarlo**

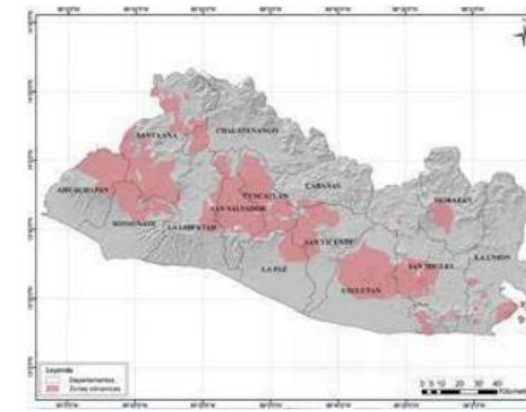
Se definieron zonas sísmicas homogéneas, utilizando el **mapa Vs30 del USGS** y **estudios locales** para redefinir zonas con suelos blandos.



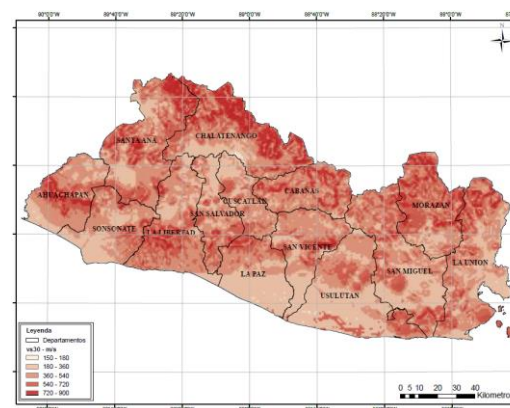
Mapa Vs30 - USGS



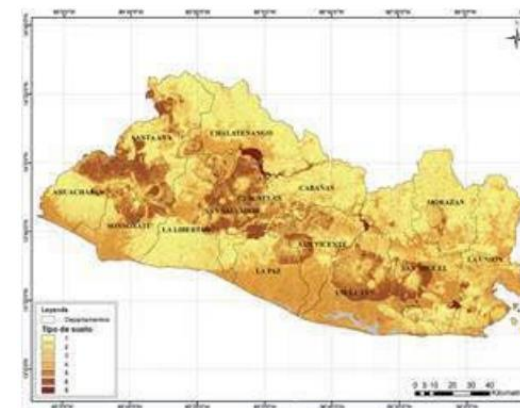
Geología superficial



Unidades geológicas volcánicas



Mapa de Vs30 modificado



Identificación de 8 tipos de suelo

- 1: Vs30 < 180 m/s
- 2: 180 < Vs30 < 240 m/s
- 3: 240 < Vs30 < 300 m/s
- 4: 300 < Vs30 < 360 m/s
- 5: 360 < Vs30 < 490 m/s
- 6: 490 < Vs30 < 620 m/s
- 7: 620 < Vs30 < 760 m/s
- 8: Vs30 > 760 m/s

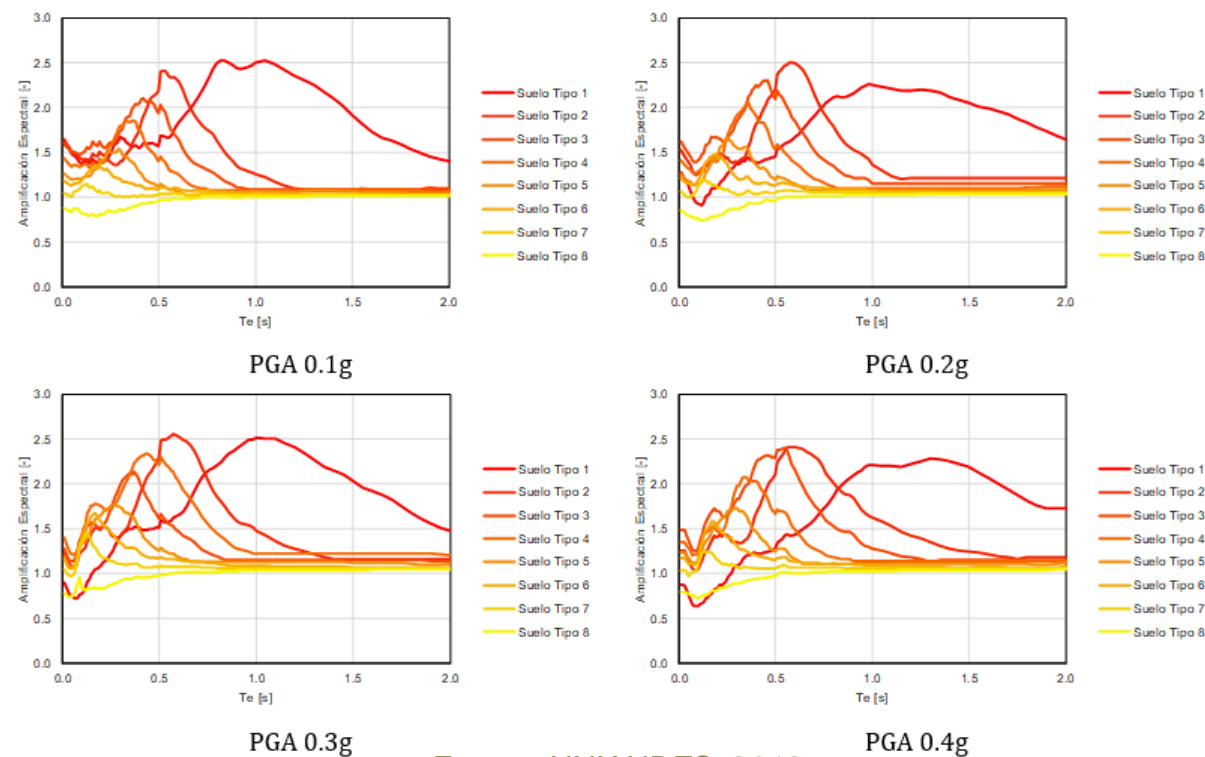
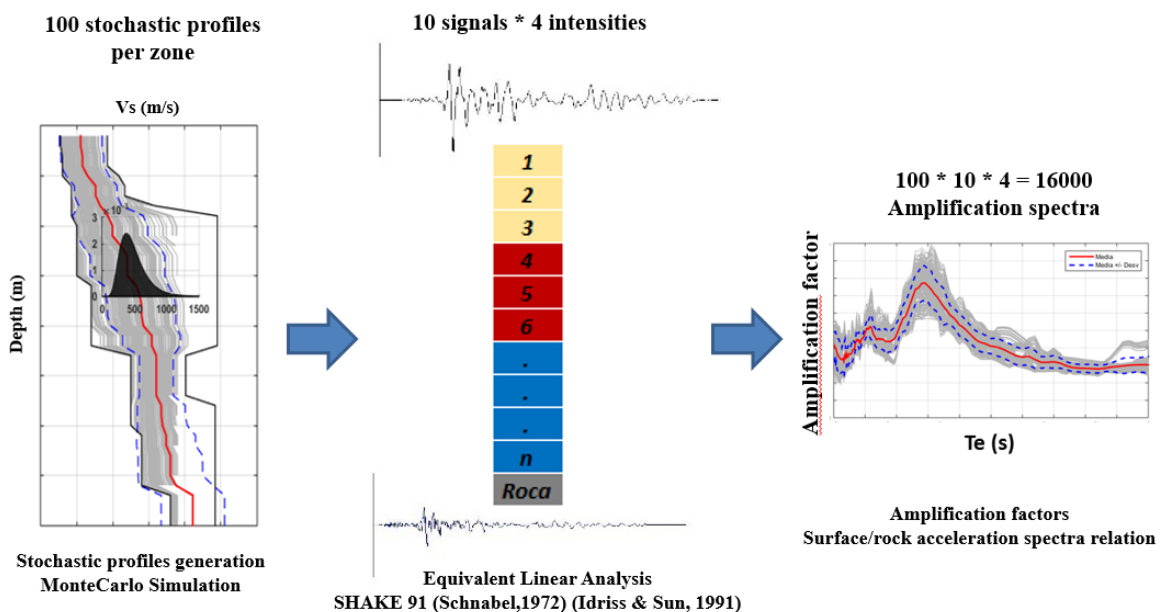
Fuente: UNIANDES, 2018

Antecedentes y estudios realizados

A nivel nacional : macro-zonificación – Banco Mundial, 2018

Para cada perfil, se tiene en cuenta la **no linealidad del suelo** a través del software SHAKE-91, y se integran los resultados con MonteCarlo.

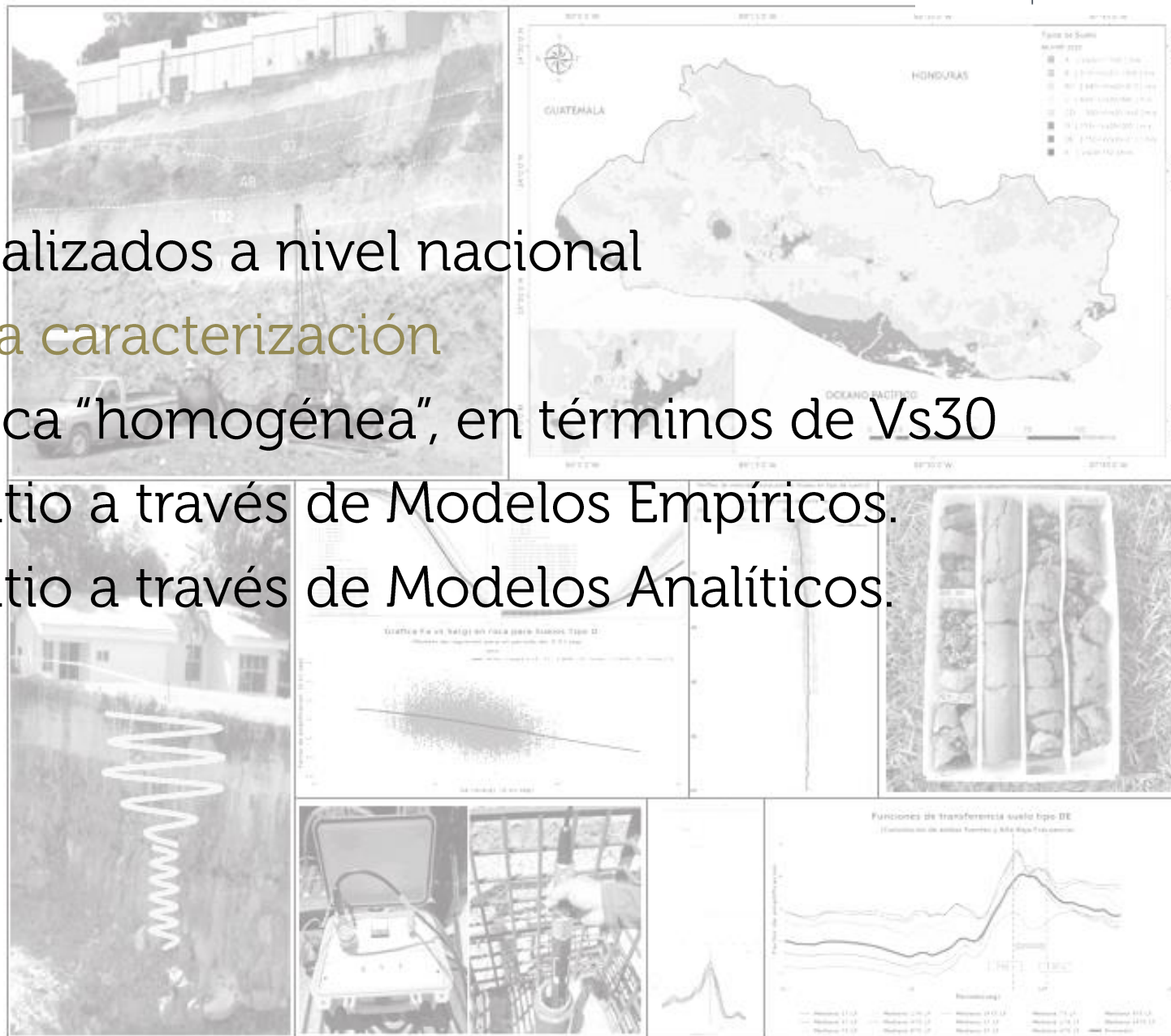
Se generan funciones de transferencia **solamente para la medida de intensidad PGA**, con 4 niveles (0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 g)



Fuente: UNIANDES, 2018

Contenido general

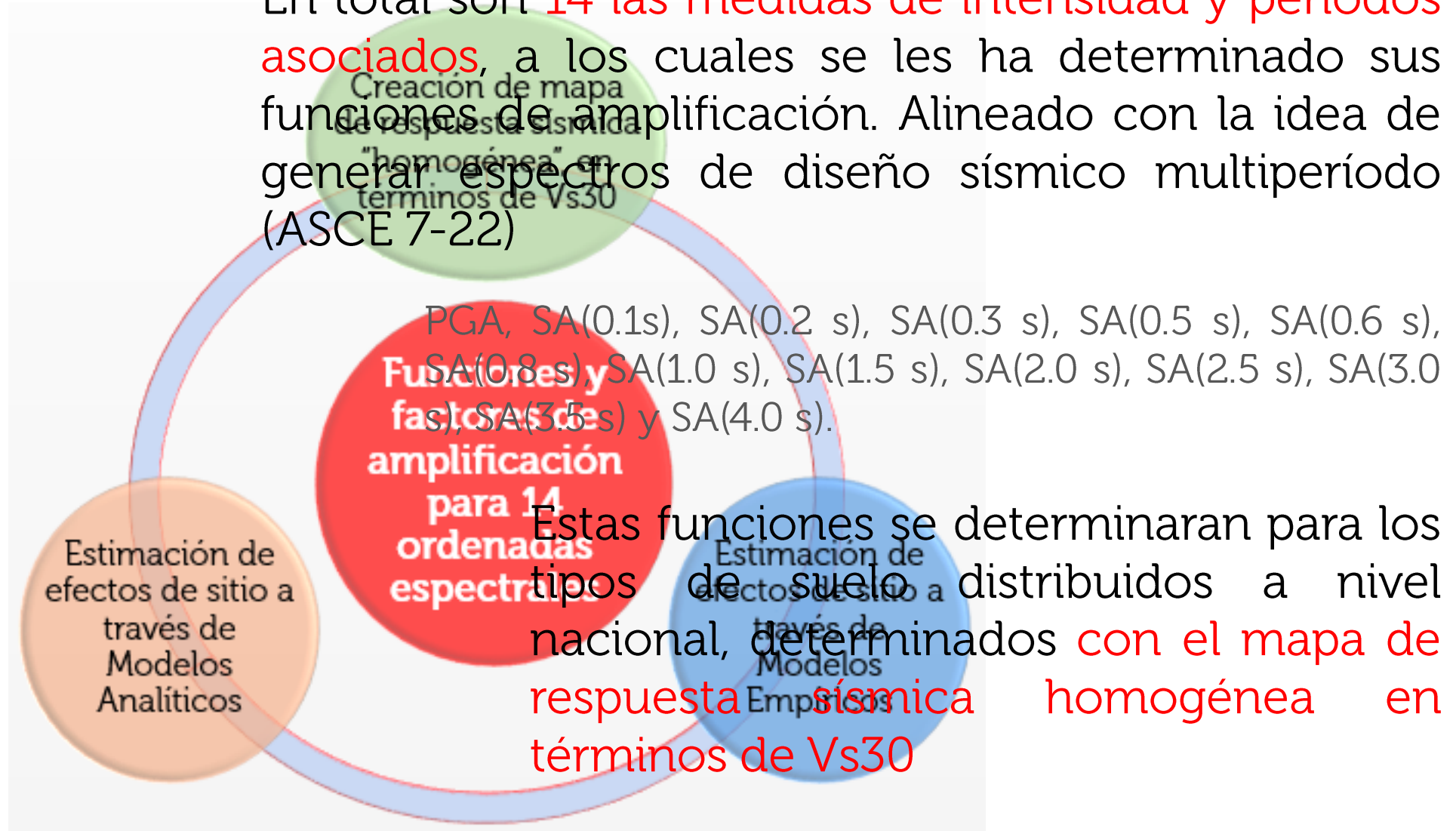
1. Justificación de trabajo
2. Amplificación del sitio
3. Antecedentes y estudios realizados a nivel nacional
4. Metodología empleada para caracterización
5. Mapa de zonificación sísmica "homogénea", en términos de V_s30
6. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Empíricos.
7. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Analíticos.
8. Factores de amplificación
9. Conclusiones



Metodología general para caracterización

A nivel nacional

En total son **14 las medidas de intensidad y períodos asociados**, a los cuales se les ha determinado sus funciones de amplificación. Alineado con la idea de generar espectros de diseño sísmico multiperíodo (ASCE 7-22)




Contenido general

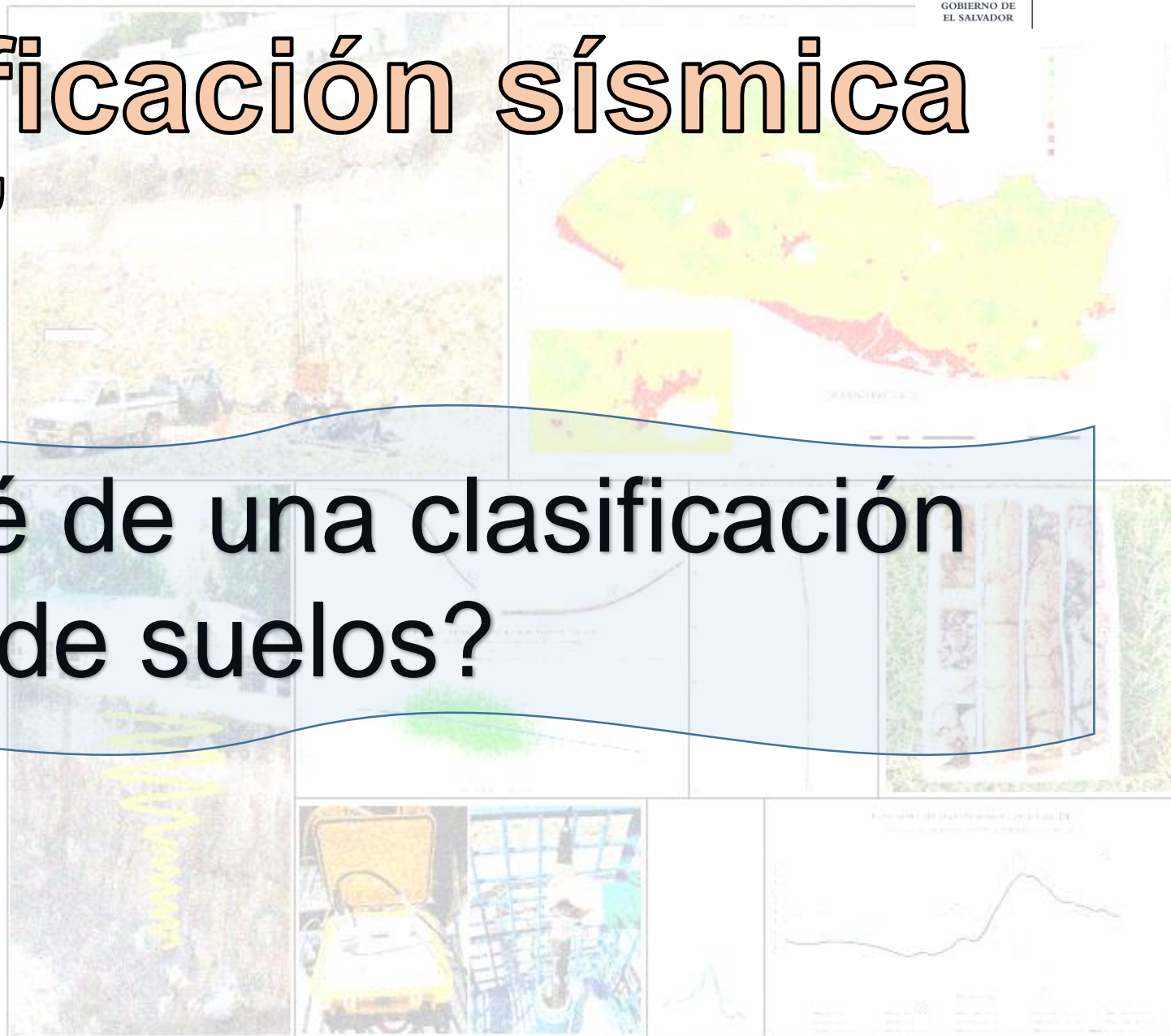
1. Justificación de trabajo
2. Amplificación del sitio
3. Antecedentes y estudios realizados a nivel nacional
4. Metodología empleada para caracterización
5. Mapa de zonificación sísmica "homogénea", en términos de V_s30
6. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Empíricos.
7. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Analíticos.
8. Factores de amplificación
9. Conclusiones



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”



¿El porqué de una clasificación
de suelos?



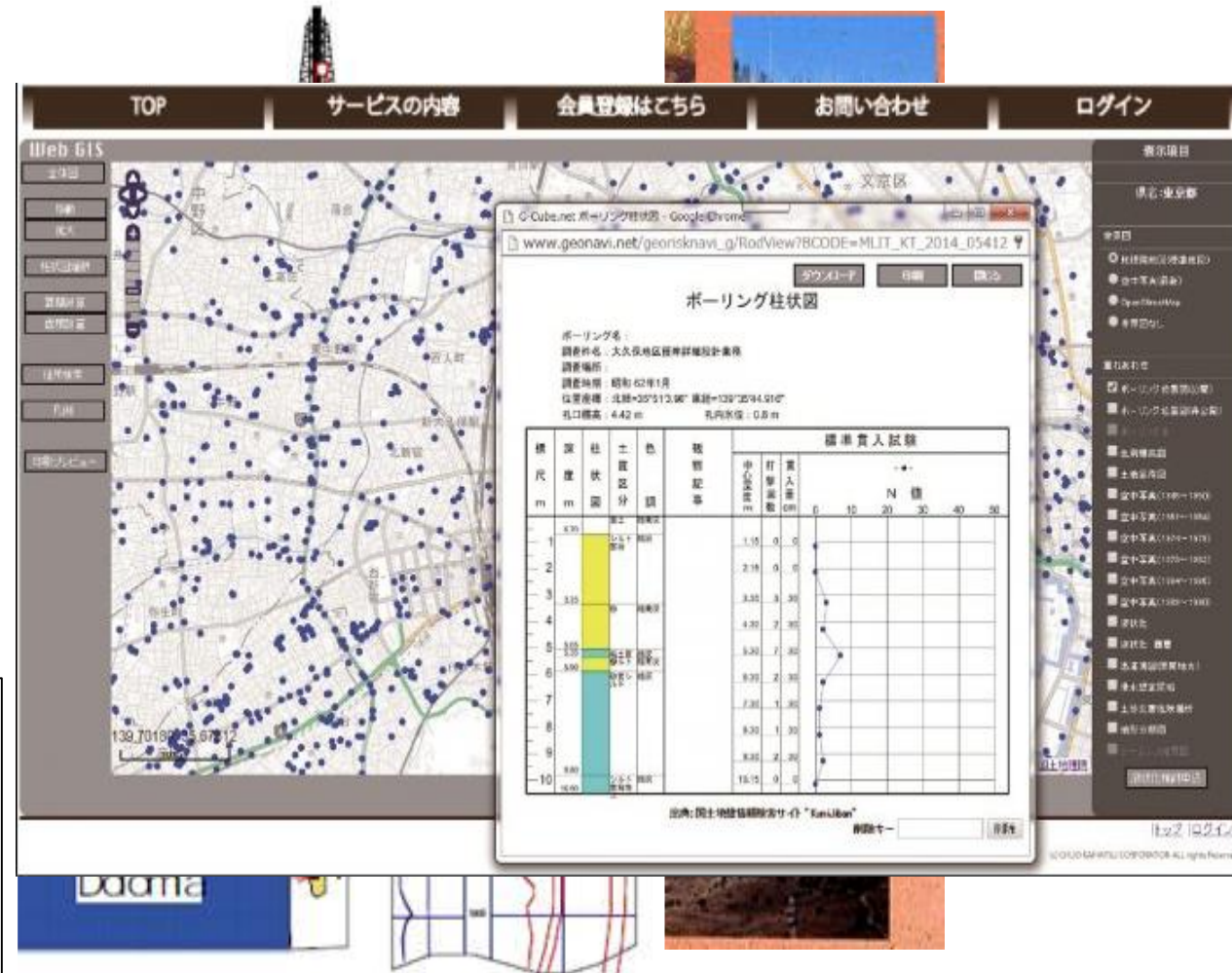
Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

¿El porqué de una clasificación de suelos?

Los depósitos de suelo presentan un alto grado de variación, a nivel **geográfico** como en **profundidad**.

Limitación en el presupuesto en proyectos, la definición del perfil del suelo resulta ser extremadamente costosa y poco confiable.

La información geotécnica disponible es insuficiente para representar con detalle las condiciones de los depósitos de suelo en la zona de estudio.



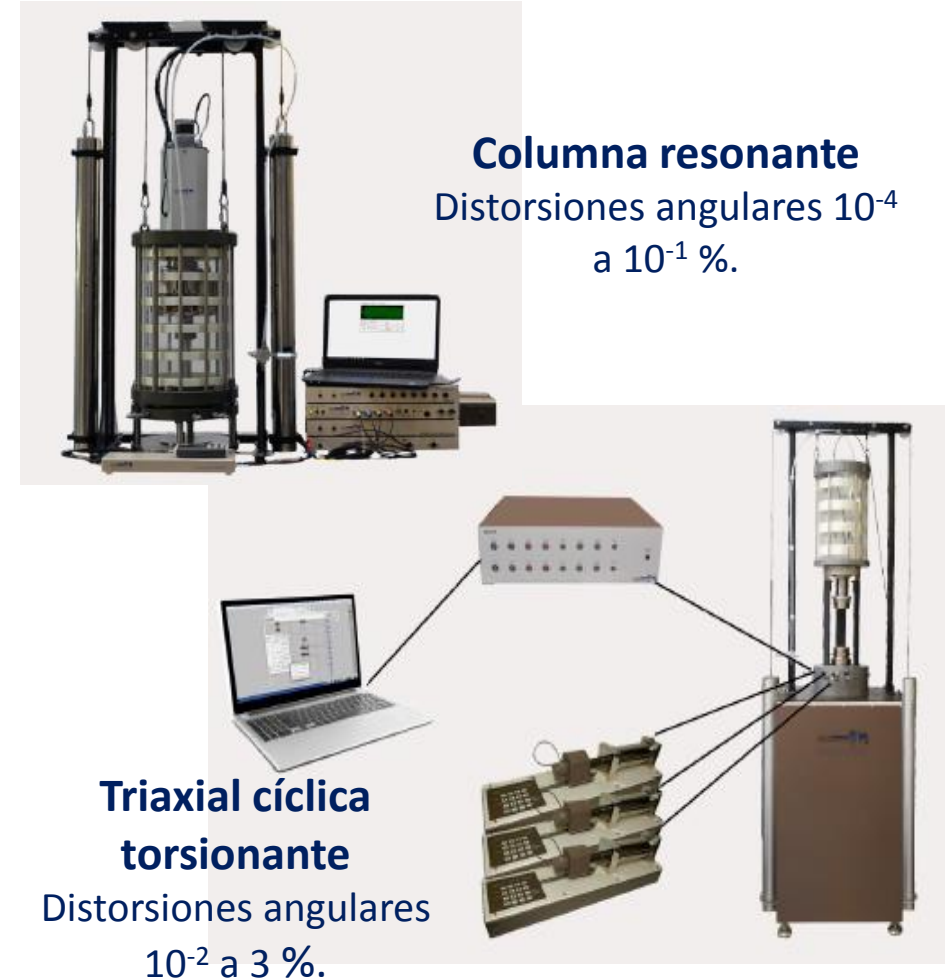
Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

¿El porqué de una clasificación de suelos?

Complejidad en la obtención de los **parámetros dinámicos in situ**, debido a:

- a) falta de equipo de laboratorio
- b) áreas de análisis demasiado extensas,
- c) variaciones bruscas de los materiales
- d) dificultades de interpretación mediante las correlaciones empíricas.

Esto evidencia **la importancia de considerar la incertidumbre en la estratigrafía y propiedades geotécnicas**



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

¿El porqué de una clasificación de suelos?

Existen dos métodos para la estimación de la amplificación de sitio:

Métodos empíricos

Utilizando las señales de registros acelerográficos, situados tanto en lugares con suelos poco consolidados como en suelos competentes; que permitan su calibración.

Métodos analíticos

Son modelaciones numéricas más complejas ya que se necesita información más precisa del comportamiento dinámico de una columna de suelo.

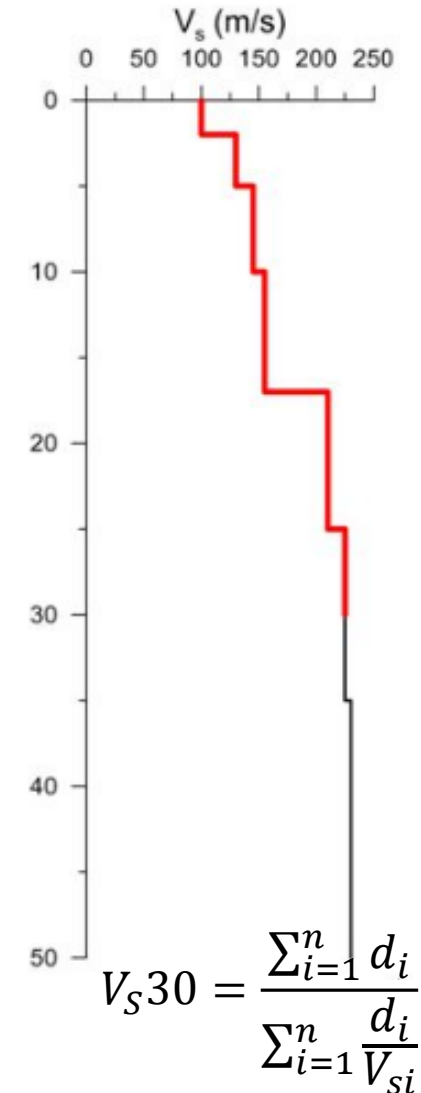
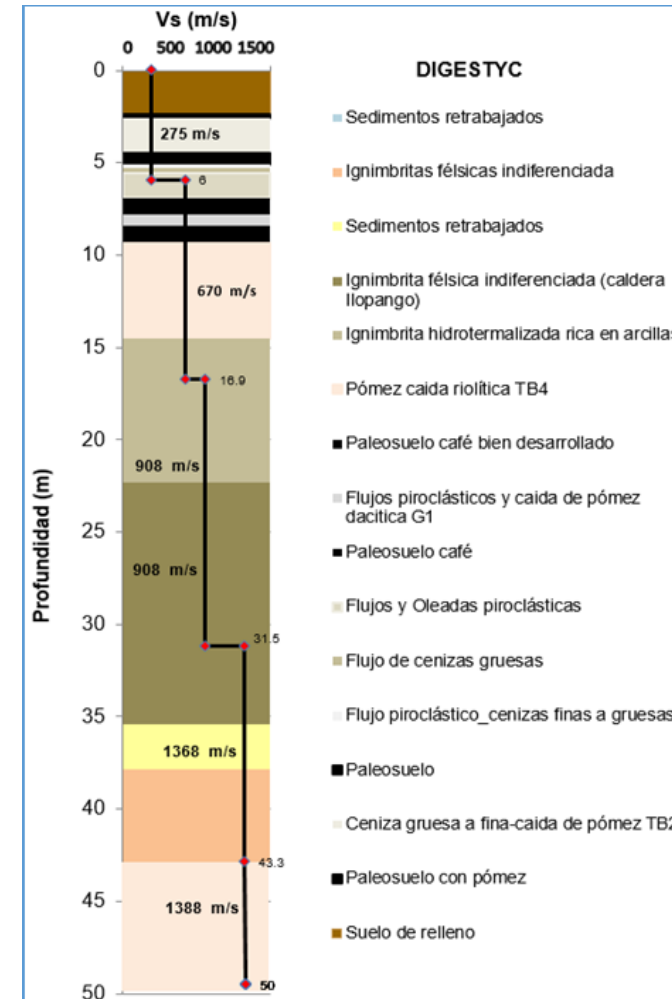
Previamente a la aplicación de dichos métodos, es necesario la realización de una **clasificación o agrupación de los materiales geológicos superficiales en categorías de respuesta sísmica similar.**

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

¿El porqué de una clasificación de suelos?

Se ha decidido hacerlo en términos del parámetro correspondiente al promedio de velocidades de ondas de corte de las capas de suelo ubicadas desde la superficie hasta 30 metros debajo. Conocido como V_s30^* .

Se estima que el suelo dentro de esta profundidad: es el que afecta en mayor medida el comportamiento de las estructuras que se edifiquen sobre él.



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

¿El porqué de una clasificación de suelos?

Es evidente que no se puede simplemente copiar los valores establecidos por el NEHRP y ASCE 7.

No	Clases de Suelo		Criterio Geotécnico (promedio de 30 m superiores)				
	Tipo	Descripción	Vs (m/s)	Vs (m/s) Media Geométrica	N or Nch	Su (psf)	
1	A	Roca dura	>	1500		NA	NA
2	B	Roca media		760.0 1500.0	1070	NA	NA
3	C	Roca blanda y suelo muy denso		360.0 760.0	523	> 50	> 2000
4	D	Suelo rígido		180.0 360.0	255	15 to 50	1000-2000
5	E	Suelo blando arcilloso	<	180.0		< 15	< 1000
6	F	Suelos que requieren análisis de respuesta del sitio de acuerdo con la Sección 21.1		Ver Sección 20.3.1			

Fuente: Traducido desde NEHRP 2003
Utilizada en el ASCE 7-16

Table 11.4-1 Short-Period Site Coefficient, F_a

Site Class	Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE _R) Spectral Response Acceleration Parameter at Short Period					
	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.5$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.0$	$S_S = 1.25$	$S_S \geq 1.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	2.4	1.7	1.3	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8
F	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8

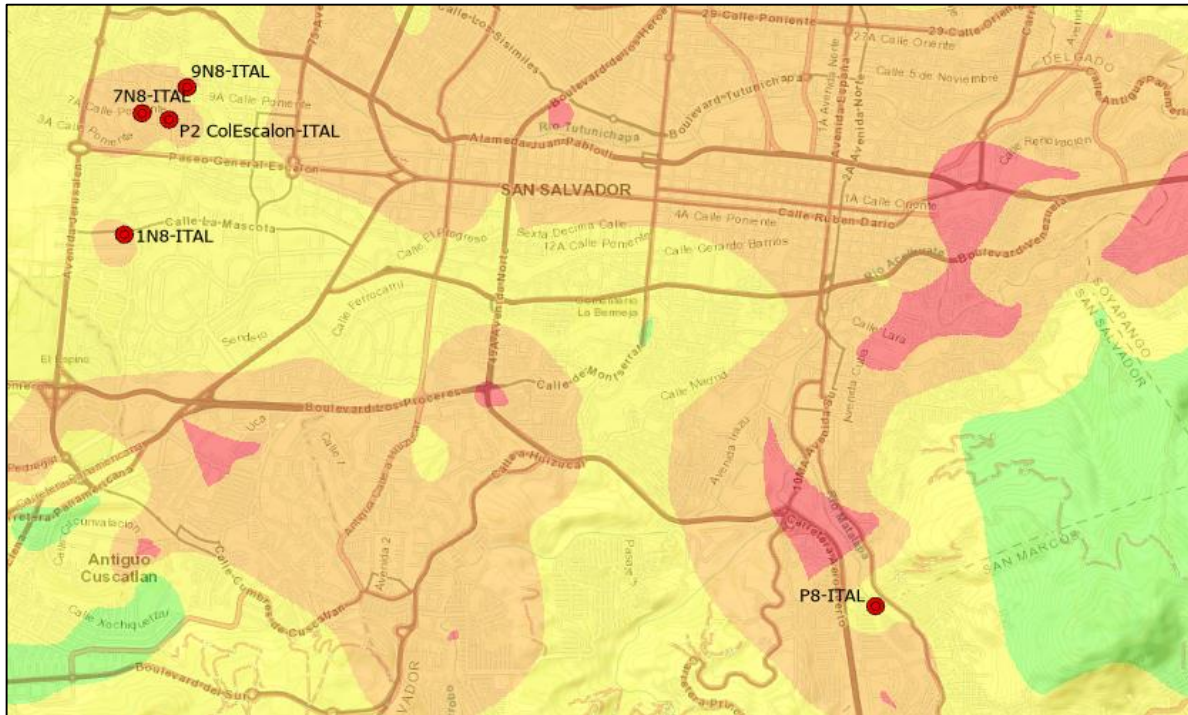
Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of S_S .

Fuente: ASCE 7-16

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

¿El porqué de una clasificación de suelos?

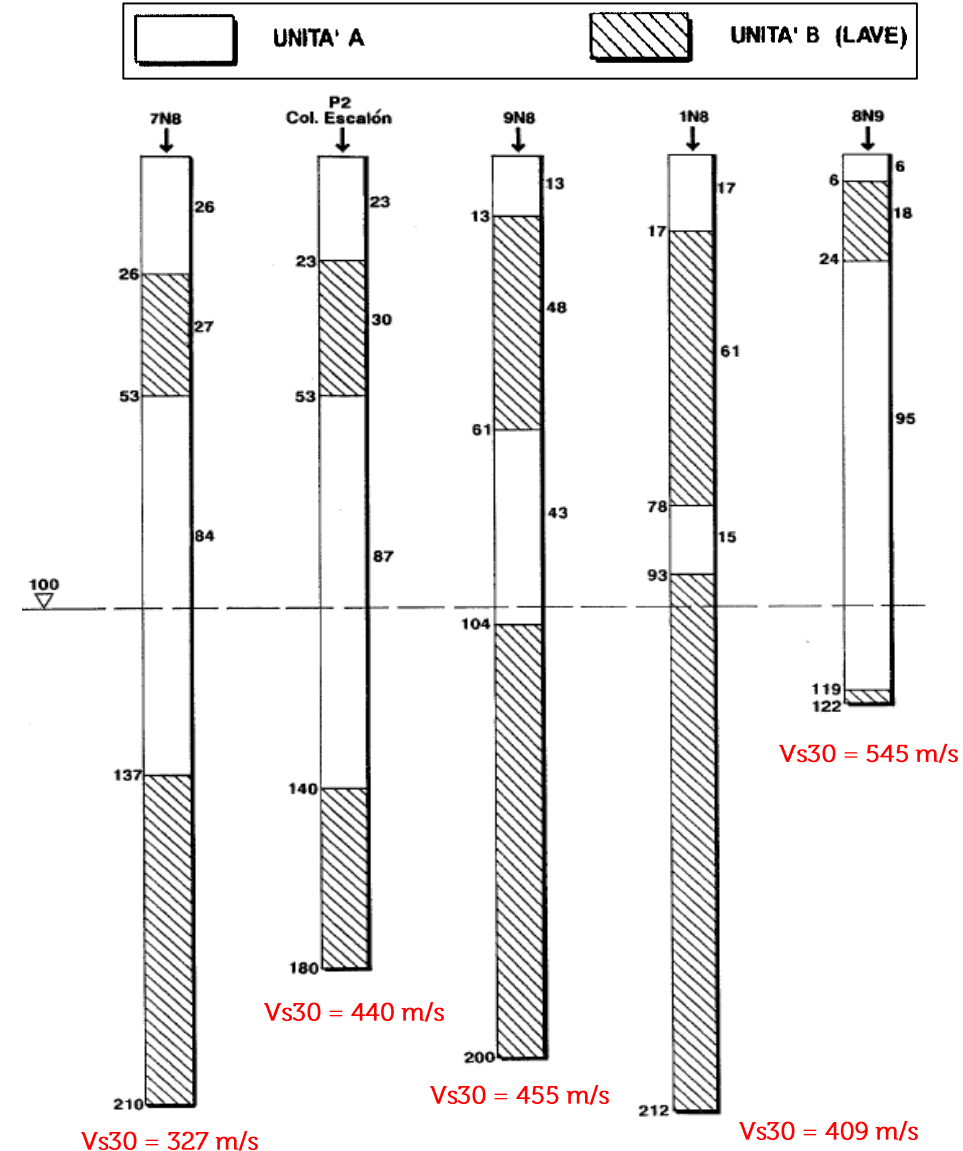
Nuestra configuración geotécnica y geológica **es diferente a la de Estados Unidos**. Ej. Patrón de intercalación de sedimentos y lavas en SS, dentro los primeros 30 metros.



Tipos de Suelo NEHRP 2020

- A : [$V_{s30} \geq 1500$] m/s
- B : [$910 \leq V_{s30} < 1500$] m/s
- BC : [$640 \leq V_{s30} < 910$] m/s
- C : [$440 \leq V_{s30} < 640$] m/s
- D : [$210 \leq V_{s30} < 440$] m/s
- DE : [$150 \leq V_{s30} < 210$] m/s
- E : [$V_{s30} < 150$] m/s

Fuente: ITALTEKNA Consultant.



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

¿El porqué de una clasificación de suelos?

Los factores de amplificación del **ASCE 7-16** han sido obtenidos propiamente **con métodos analíticos y empíricos**

The site coefficients, F_a and F_v , presented, respectively, in Tables 11.4-1 and 11.4-2 for the various site classes are based on **analysis of strong-motion data** and on **numerical simulations of nonlinear site response**. The development of the factors that were in place from the 1994 *NEHRP Provisions* through ASCE 7-10 is described in Dobry et al. (2000) and the references therein.

Fuente: Extracto de capítulo 11 de Comentarios de ASCE 7-16, pág.. 531

Por lo que por practicidad, podemos usar las clases **ya tipificadas (con sus rangos) y adecuarlas con nuestros propios datos de velocidad de corte compilados para el territorio salvadoreño.**

Table 11.4-1 Short-Period Site Coefficient, F_a

Site Class	Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE _R) Spectral Response Acceleration Parameter at Short Period					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	2.4	1.7	1.3	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8
F	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8

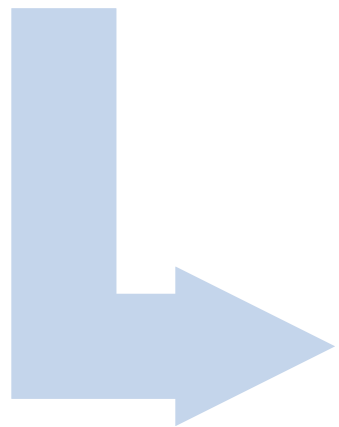
Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of S_s .

Table 11.4-2 Long-Period Site Coefficient, F_v

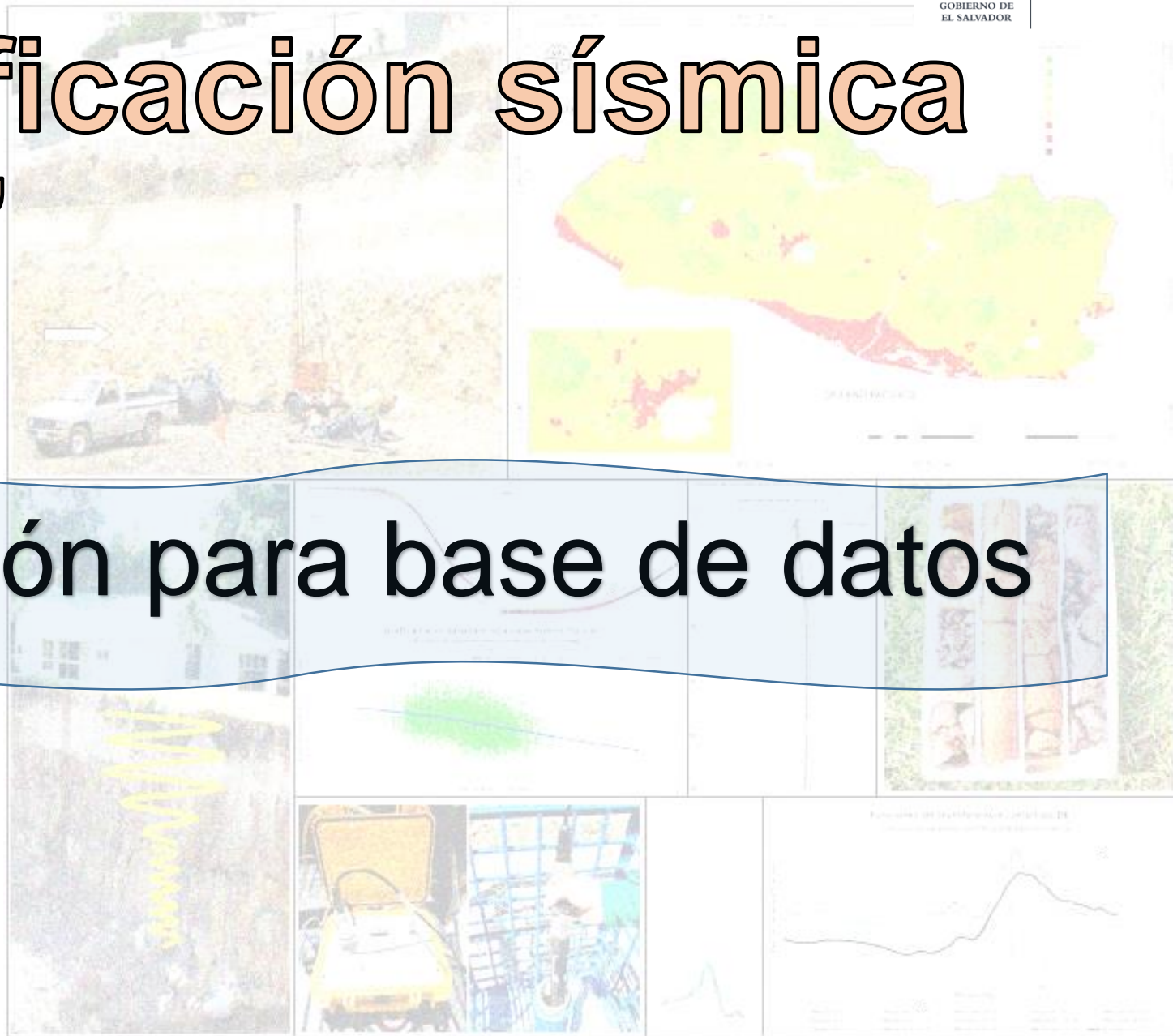
Site Class	Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE _R) Spectral Response Acceleration Parameter at 1-s Period					
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 = 0.5$	$S_1 \geq 0.6$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
D	2.4	2.2 ^a	2.0 ^a	1.9 ^a	1.8 ^a	1.7 ^a
E	4.2	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8
F	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8

Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of S_1 .
^aAlso, see requirements for site-specific ground motions in Section 11.4.8.

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”



Información para base de datos



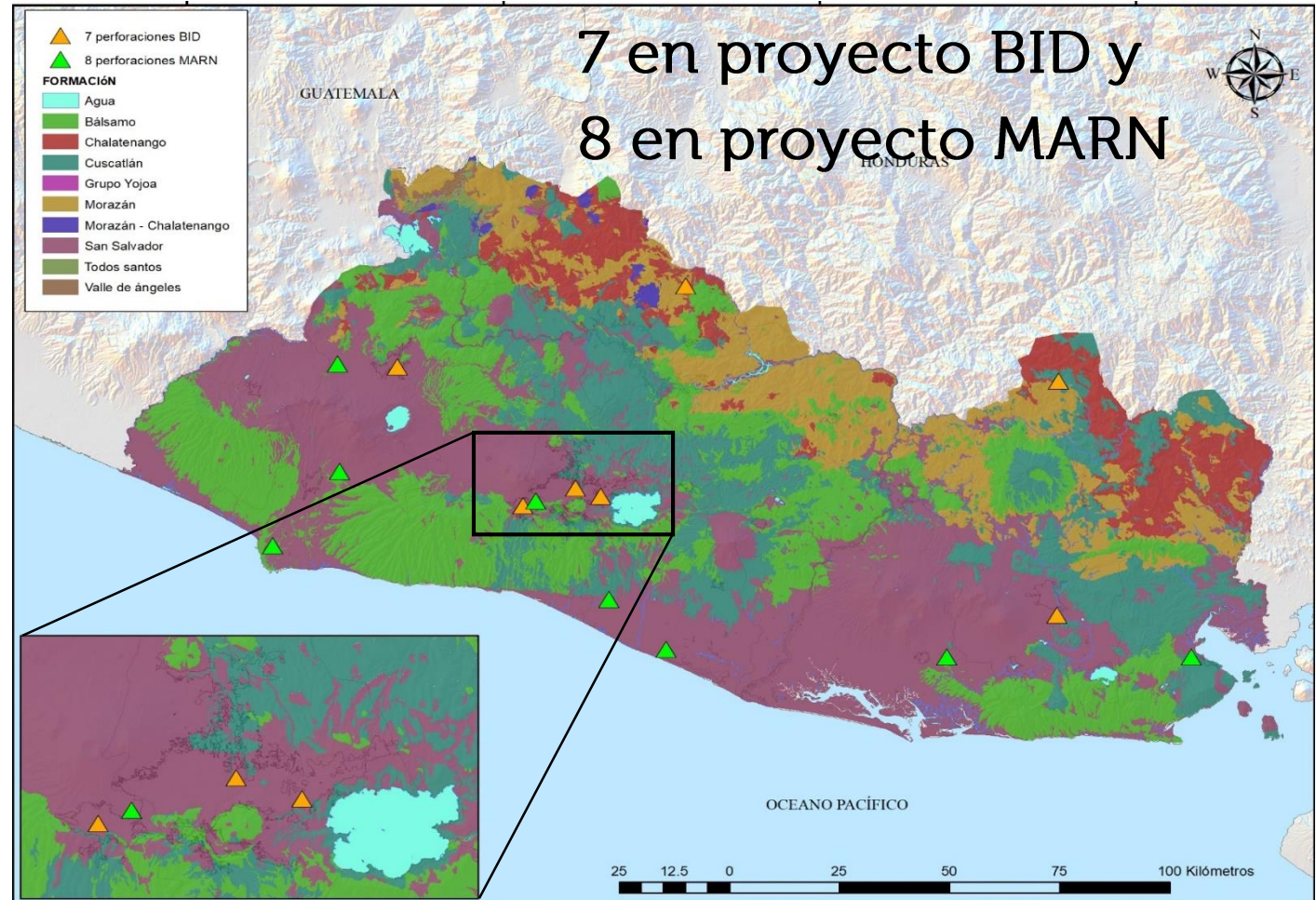
Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Información para base de datos

15 nuevas perforaciones en formaciones geológicas diferentes con ensayos Downhole

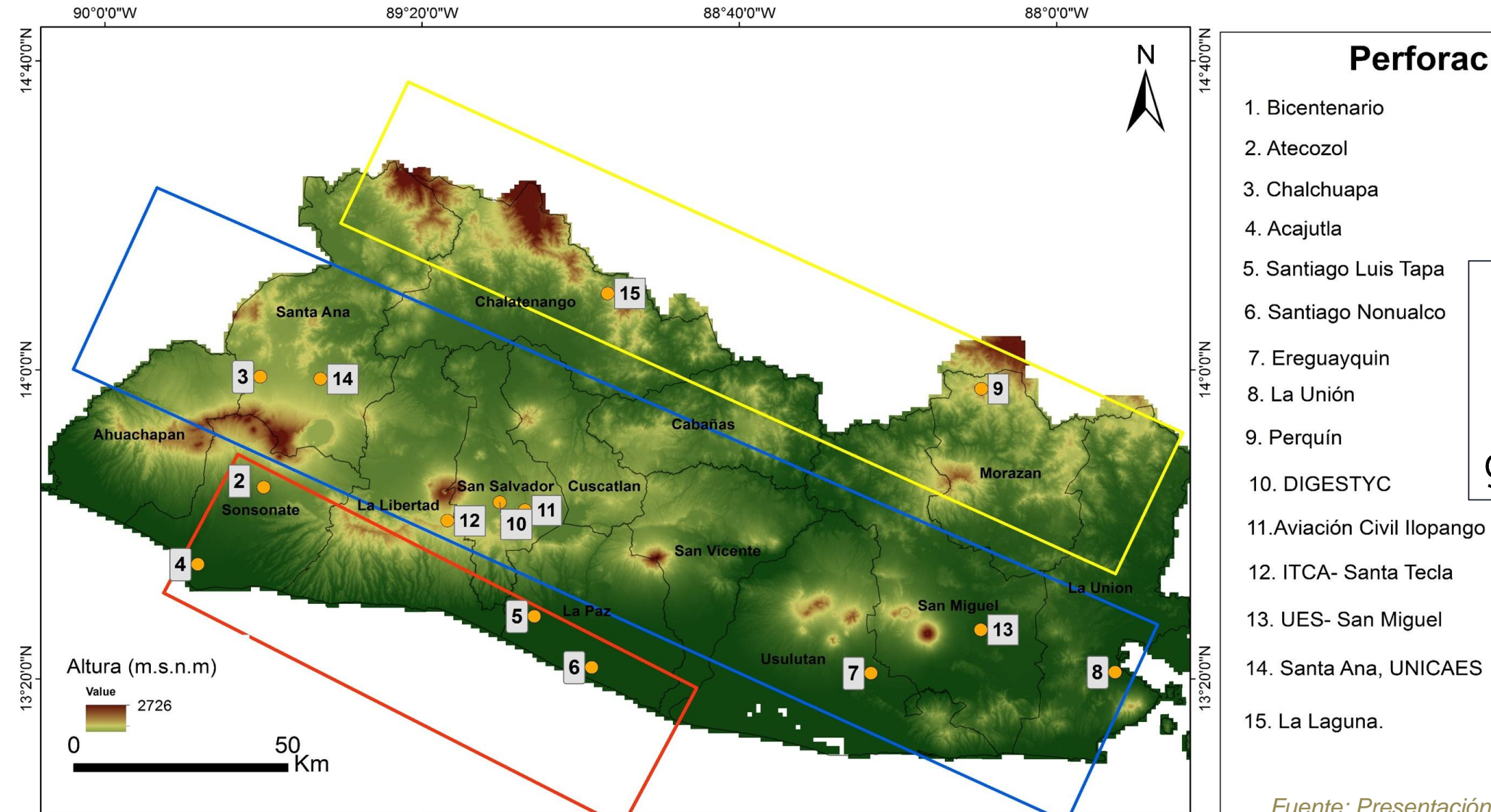
Se debe contar con la mayor información posible que relacione el comportamiento elástico o inelástico.

Esta información se concentra en reunir la mayoría de mediciones de velocidades de las ondas de corte polarizadas (SH) **recabadas a partir de ensayos sísmicos-geofísicos como lo son Downholes**



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Información para base de datos



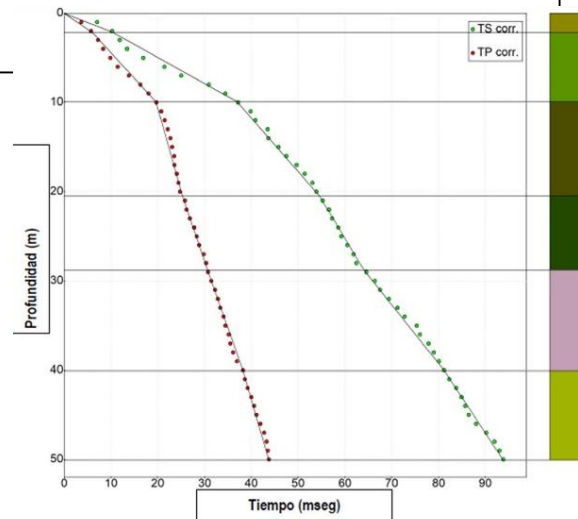
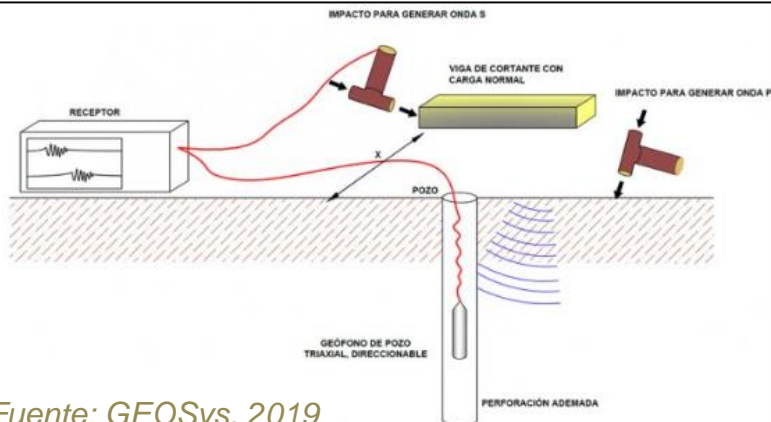
Distribución de los sondeos por zonas geomorfológicas

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Información para base de datos

Se ejecutó un reconocimiento geológico tanto de las muestras obtenidas en la perforación como en los alrededores de la zona que se está estudiando

Estos ensayos ayudan a recrear la estructura del subsuelo por medio de la propagación de las velocidades de las ondas de compresión P y las ondas de corte S.



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Información para base de datos

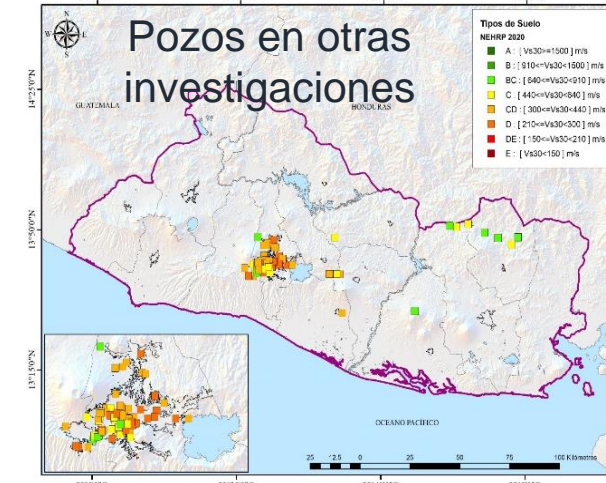
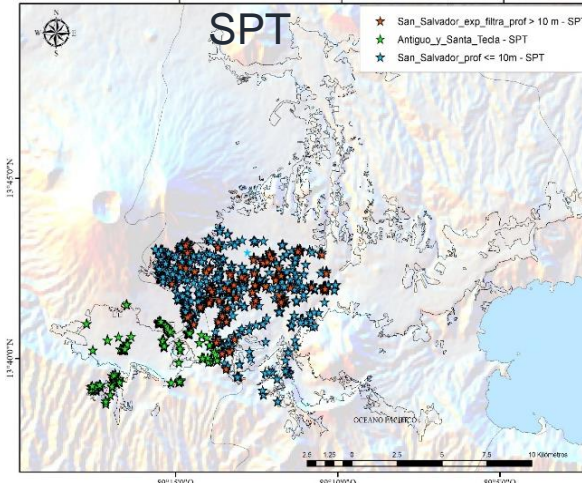
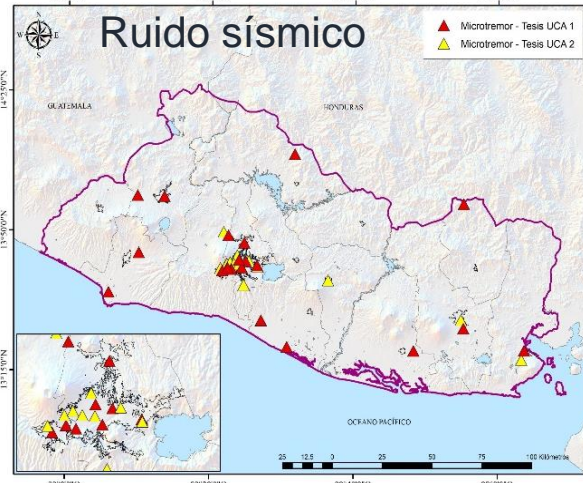
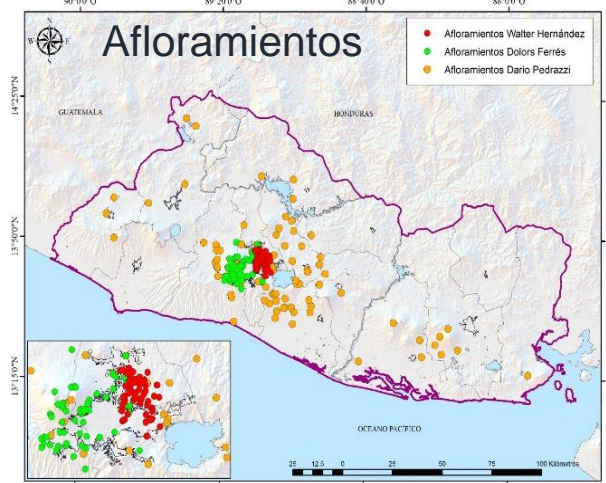
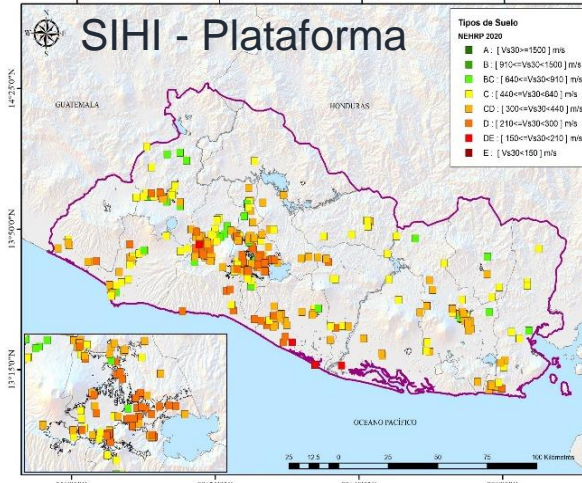
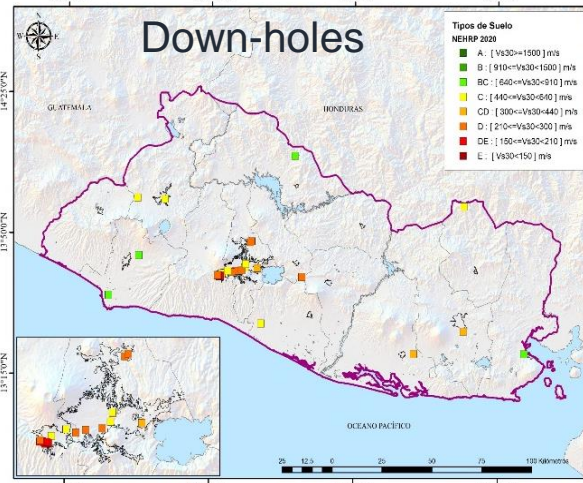
1. Proceso de búsqueda y compendio de información:

Vs medición directa

- 34 Down-holes.

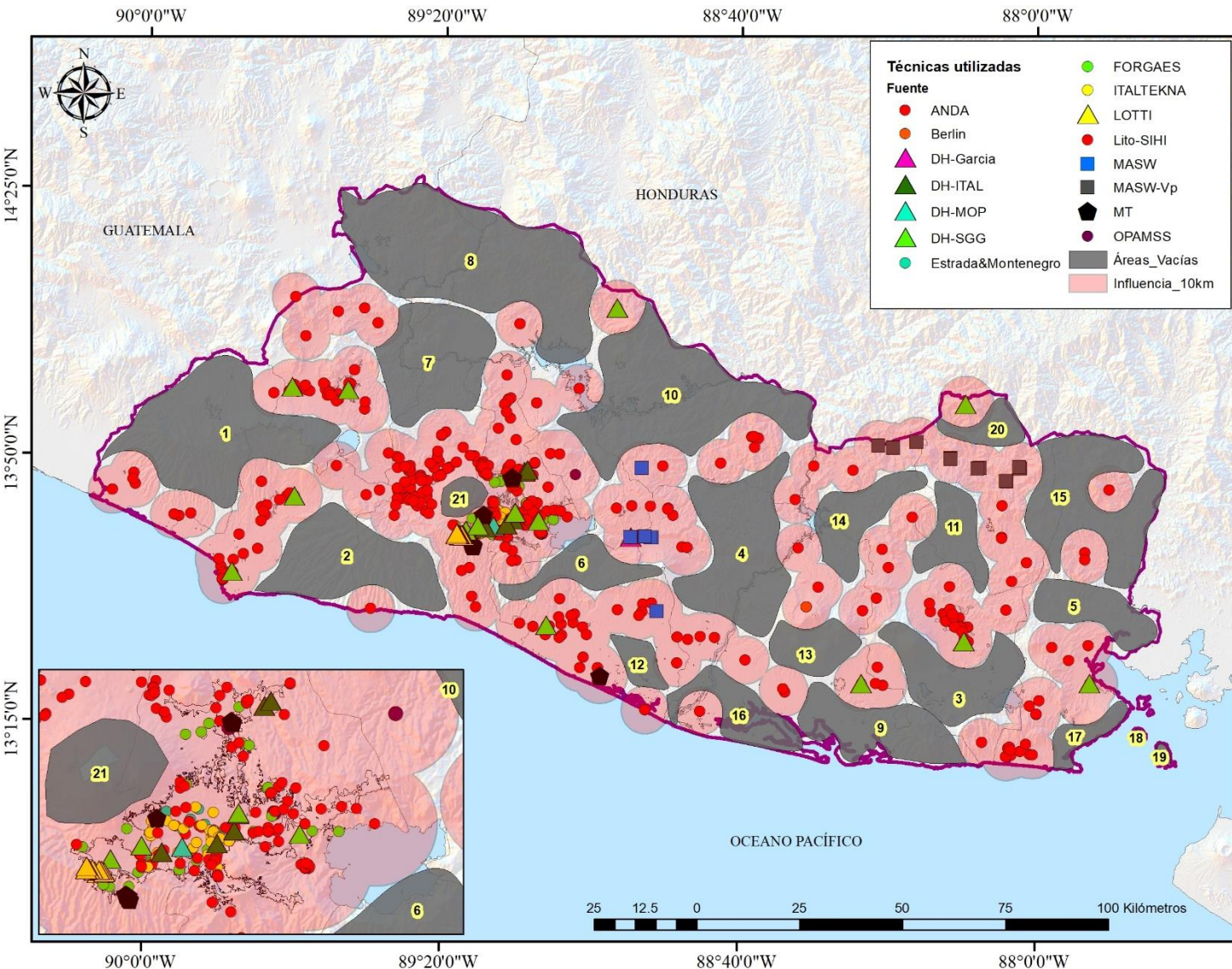
Vs inferido de geología y ruido sísmico

- 353 pozos con información geológica en profundidad,
- 150 afloramientos,
- 33 mediciones de microtrepidación,
 - 426 SPT y
- 122 Pozos en otras investigaciones.



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Información para base de datos



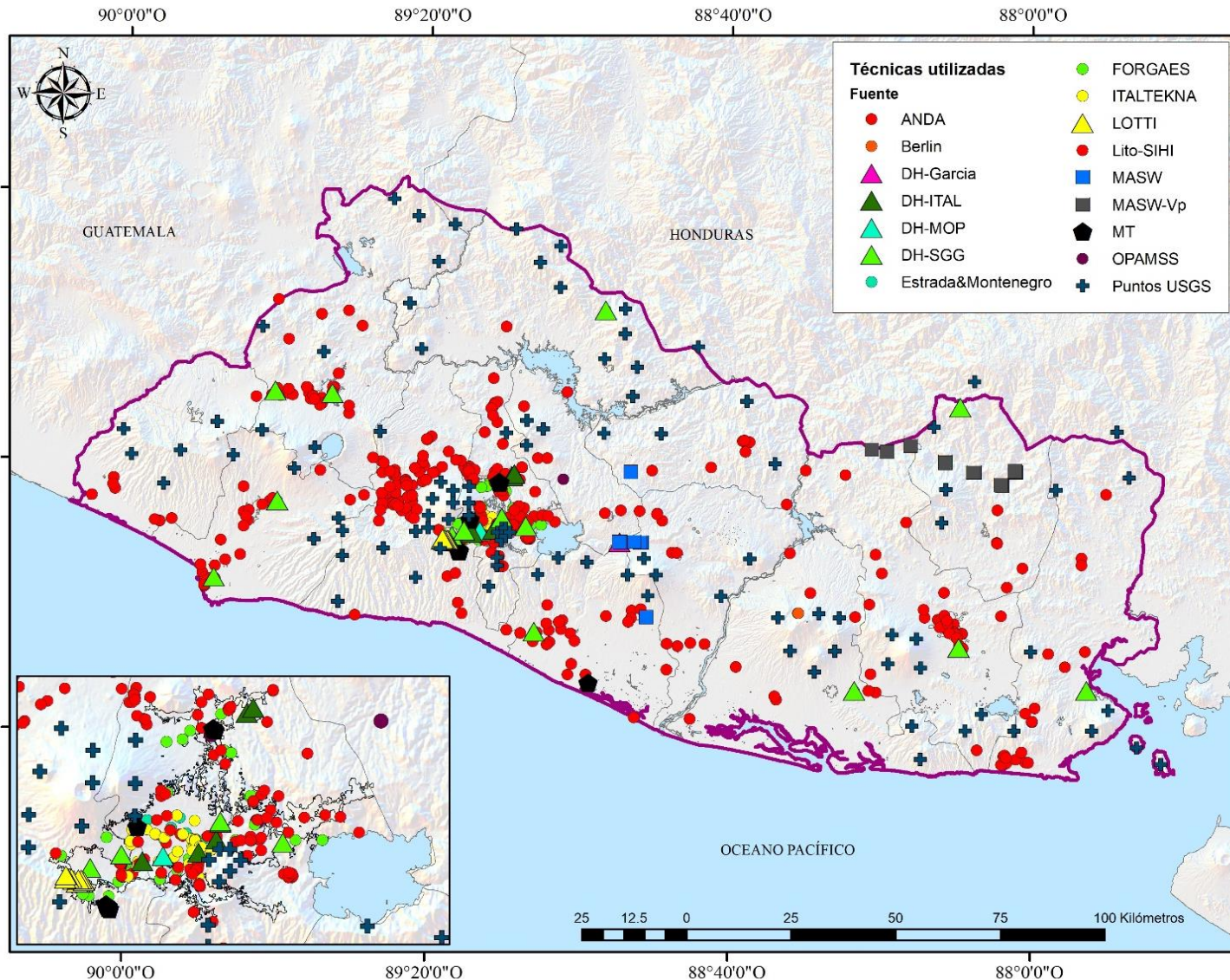
2. Identificación de vacíos de información en el territorio

Se agregaron algunos **valores de Vs30** calculados a partir de las pendientes del terreno.

Se tuvo cuidado en los lugares, como los grábenes, donde se sabe que no existen afloramientos rocosos y que corresponden a **zonas de depósitos de productos volcánicos no consolidados**

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Información para base de datos



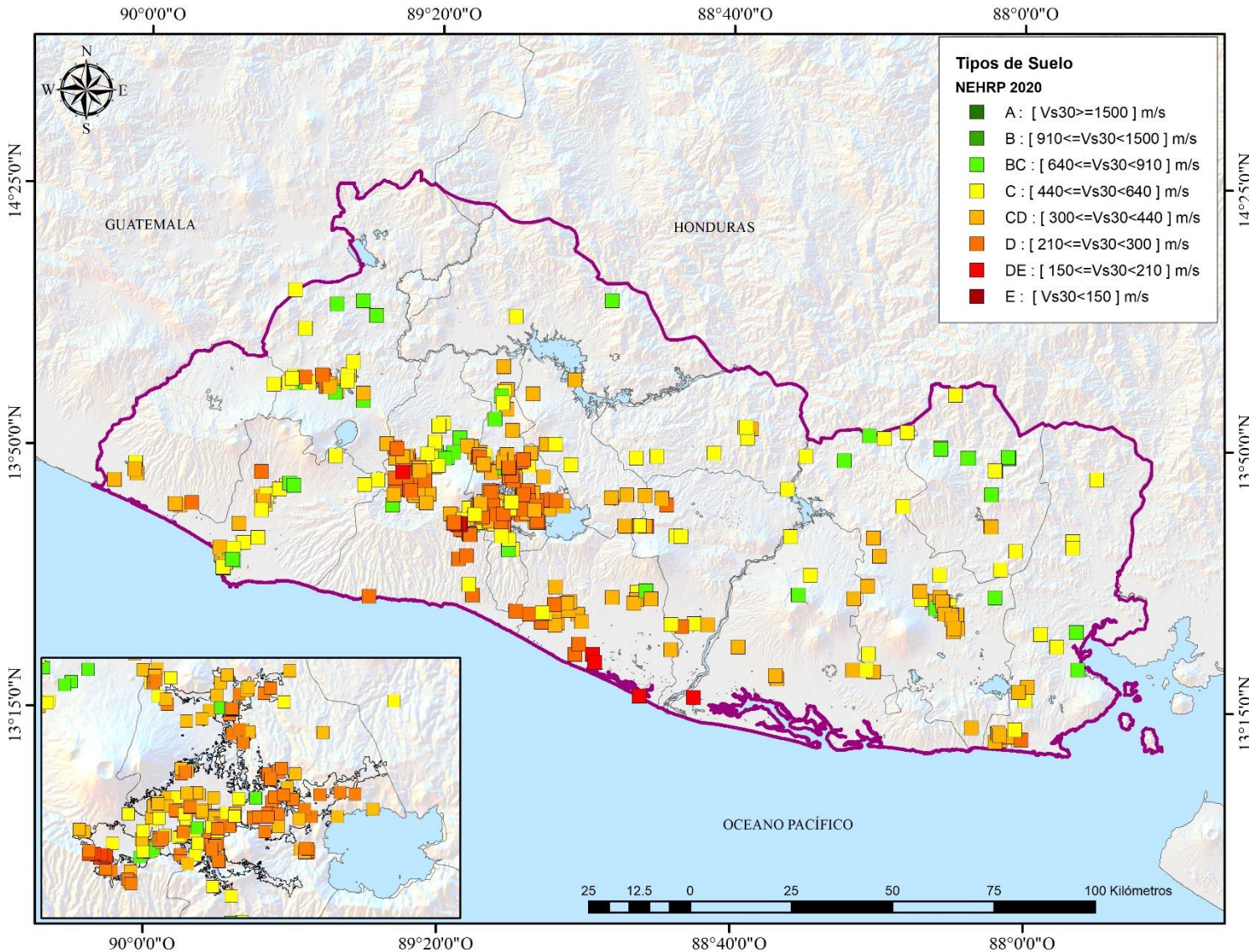
3. Dentro de la información recopilada, fue evidente la calidad de la misma, la cual se tomó en consideración al momento de ser utilizada. Algunos puntos fueron removidos.

Tabla 2. Asignación de pesos a técnicas utilizadas para determinar el valor de V_{s30}

Técnica	Calidad	Pesos Varianza de medida inversa (1/Calidad ²)
Down-hole	1	1
MASW	1.15	0.756
MT	1.15	0.756
MASW-Vp	1.25	0.640
Perfiles geológicos	1.30	0.592
USGS	2.50	0.160

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

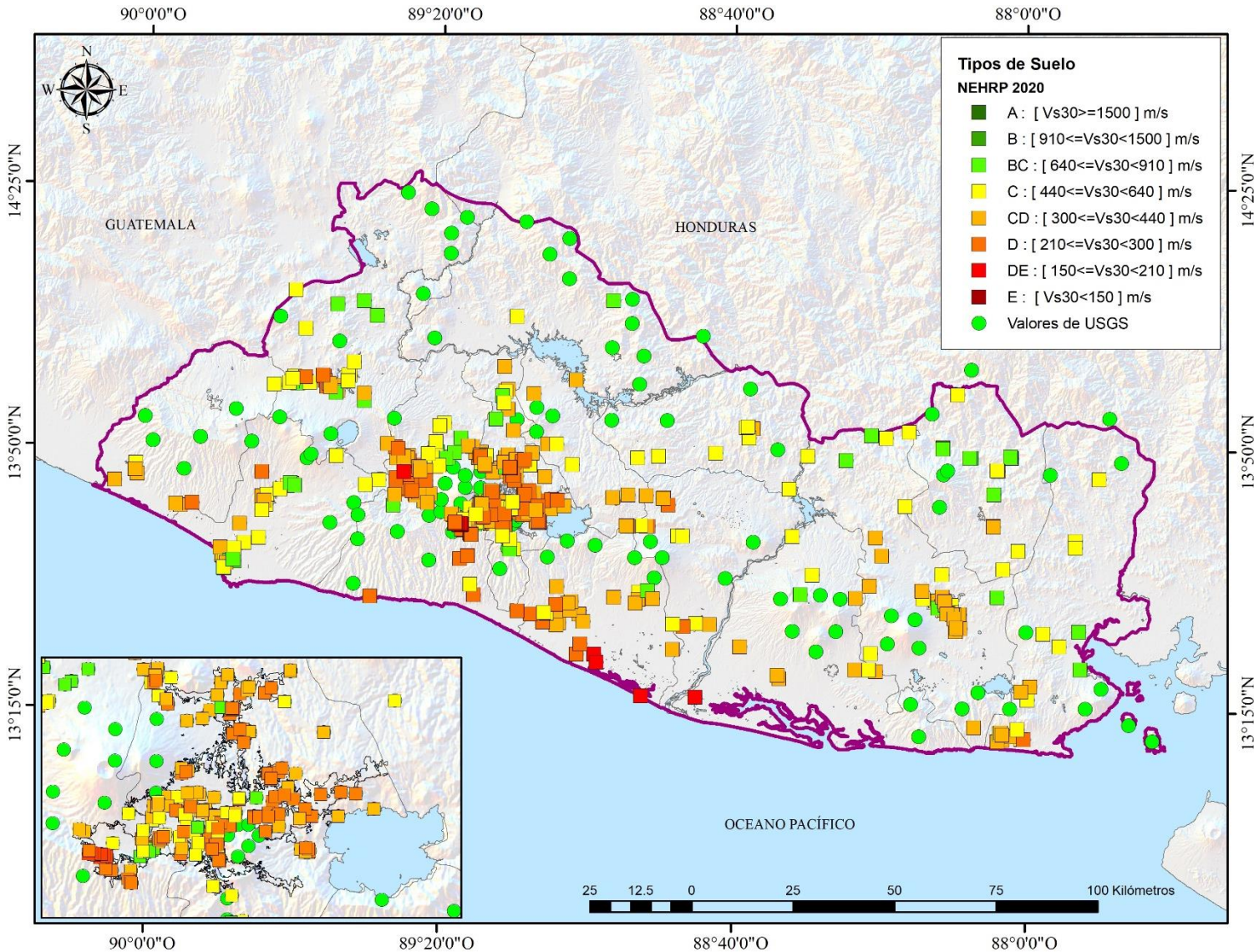
Información para base de datos



Se recopilaron un total de **519 puntos a nivel nacional**, con información de la estructura de velocidad de ondas de corte en profundidad, determinada tanto de **forma directa como inferida geológicamente.**

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

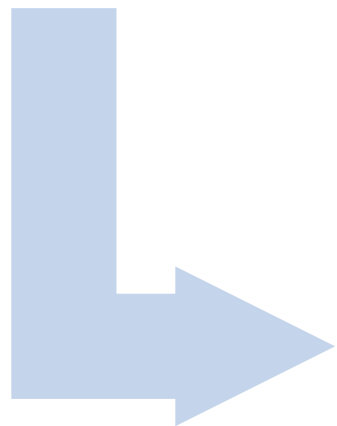
Información para base de datos



Para la generación del mapa de zonificación homogénea se utilizaron finalmente **619 puntos**.

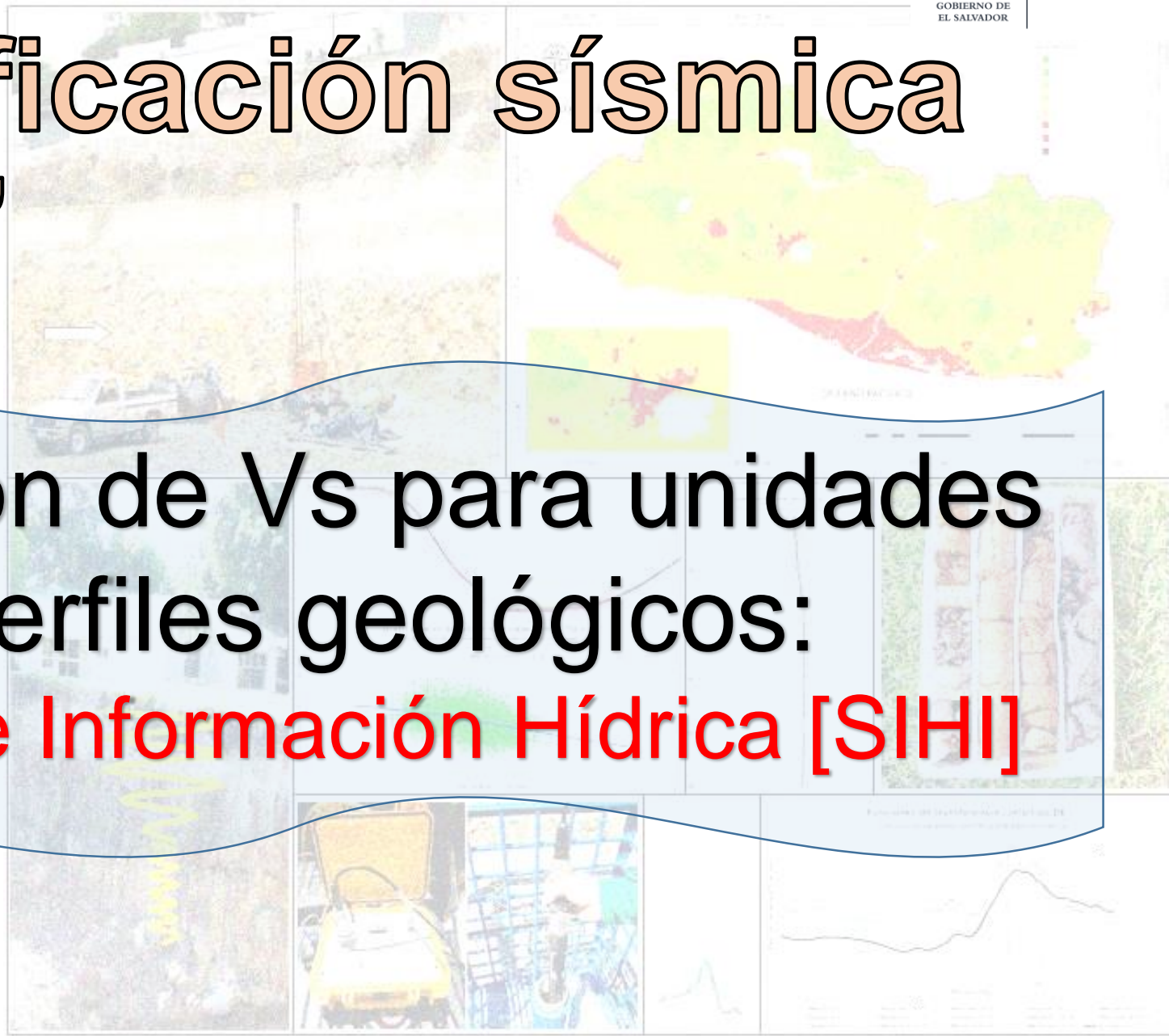
Tras la adición de 100 puntos extraídos del mapa de Vs30 del USGS

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”



Estimación de V_s para unidades
de perfiles geológicos:

Sistema de Información Hídrica [SIHI]



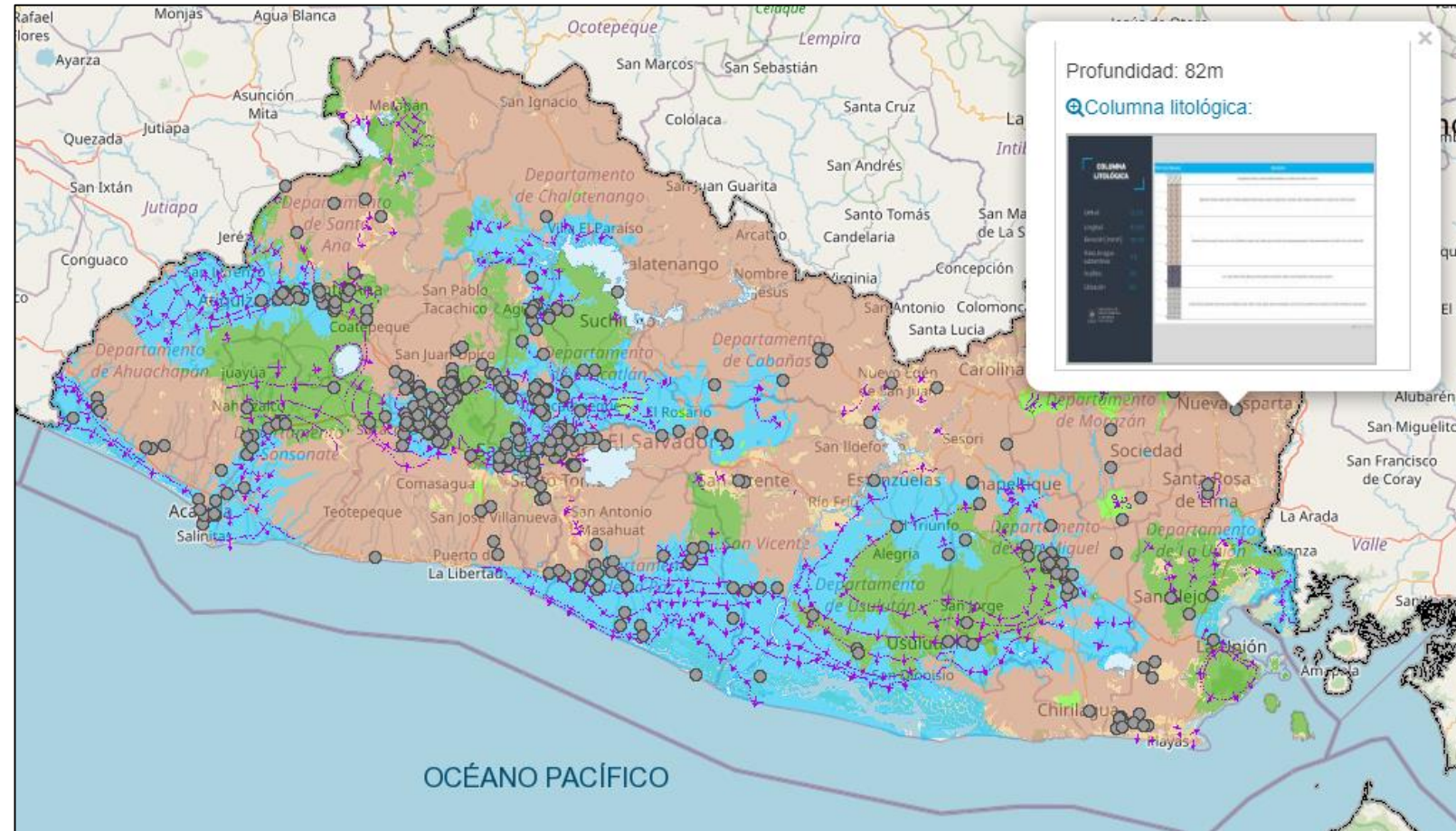
Mapa de zonificación sísmica “homogénea”



Estimación de V_s para unidades de perfiles geológicos

El contenido de dicha plataforma se comprende mayoritariamente con **información recabada por la institución ANDA**

Pozos de monitoreo para **medir niveles de agua y toma de muestras** para determinación de los componentes químicos para verificarla calidad del agua.



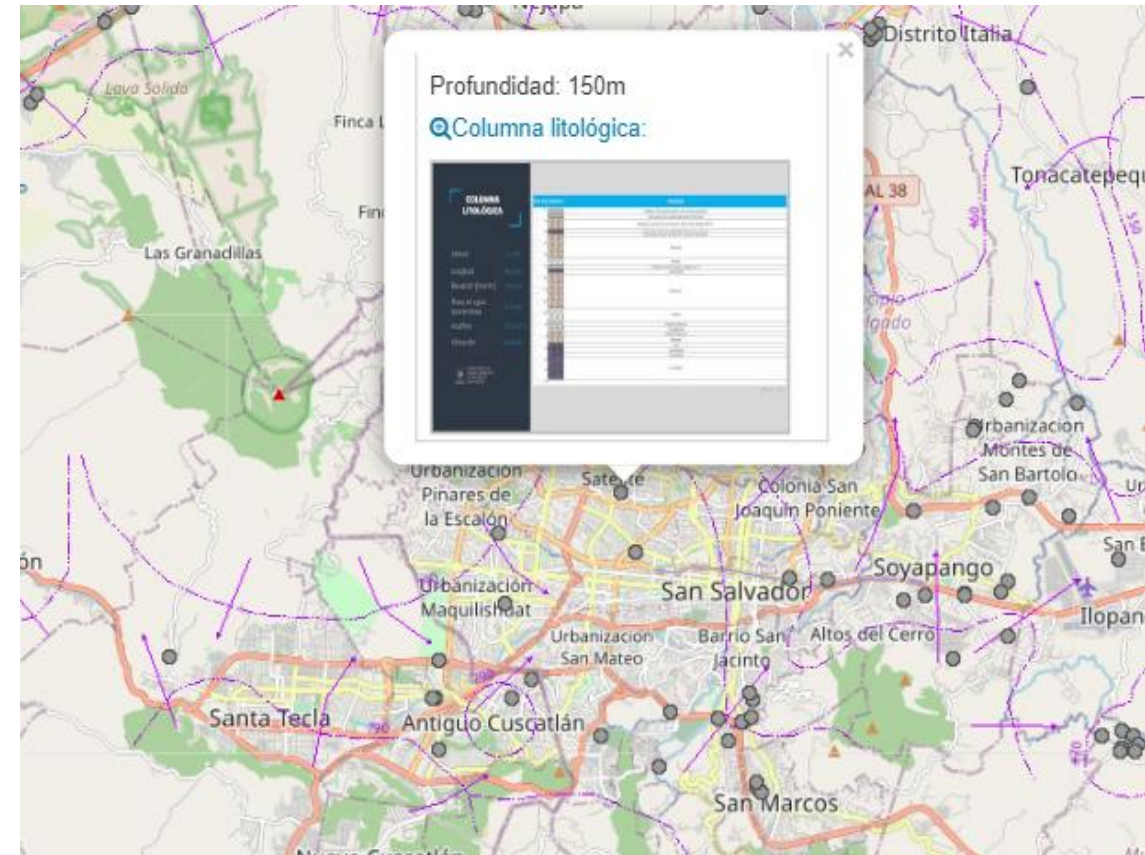
Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de V_s para unidades de perfiles geológicos

Se realizó una **reclasificación controlada** de las capas de los perfiles geológicos

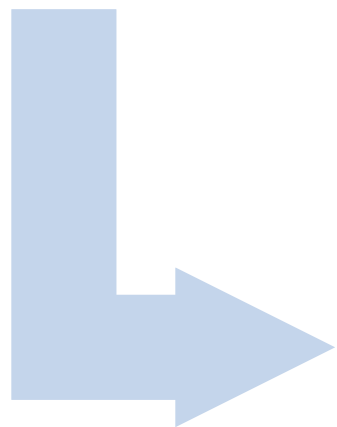
Contrarrestando la limitada cantidad de datos a lo largo de todo el territorio

Planteamiento de metodología para poder **estimar fronteras y profundidades límites de determinadas unidades geológicas**; logrando asignar/estimar un perfil de velocidad de ondas de corte que ayudaría a calcular el valor de V_{s30} .

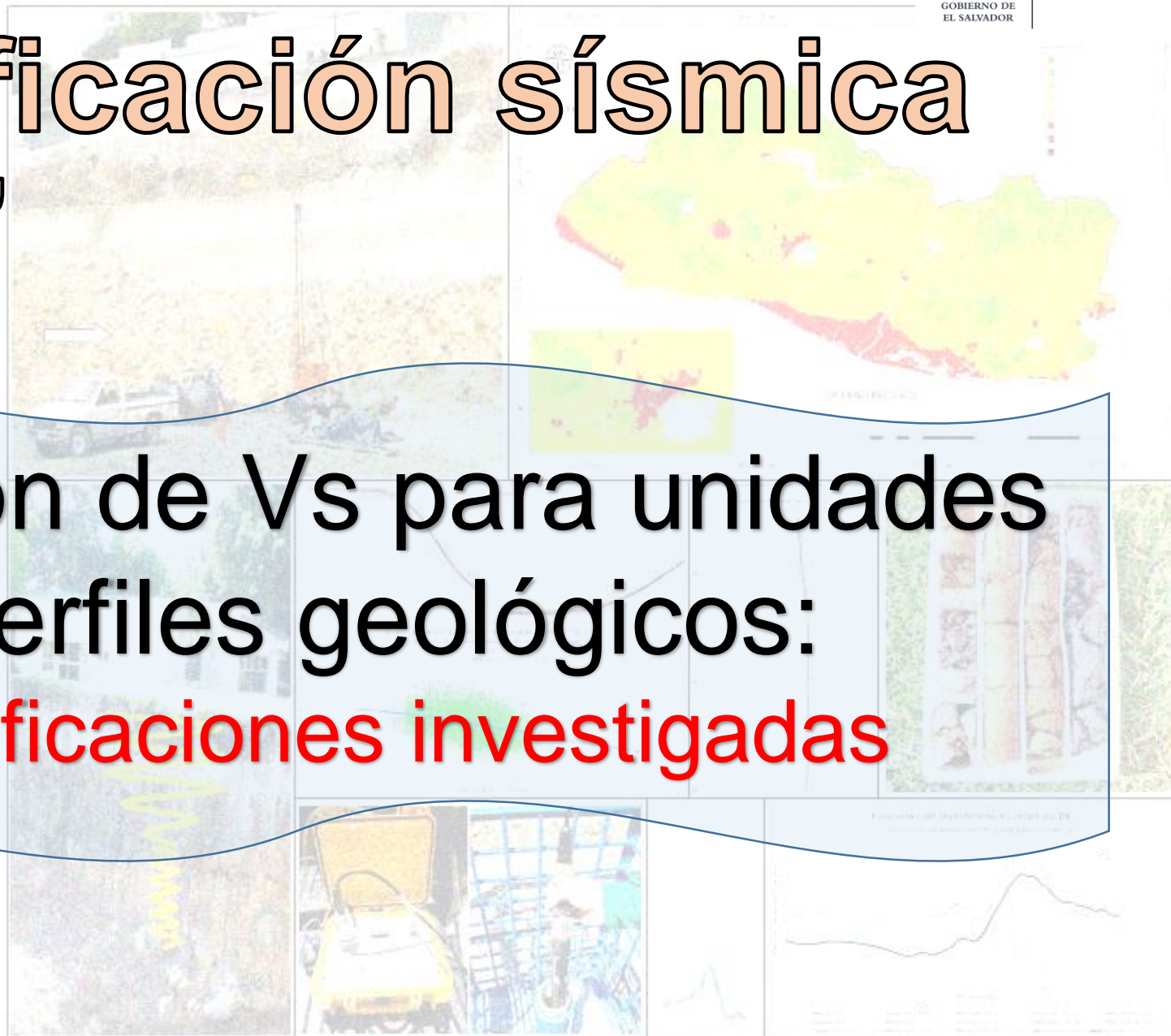


Fuente: Plataforma SIHI, 2018

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

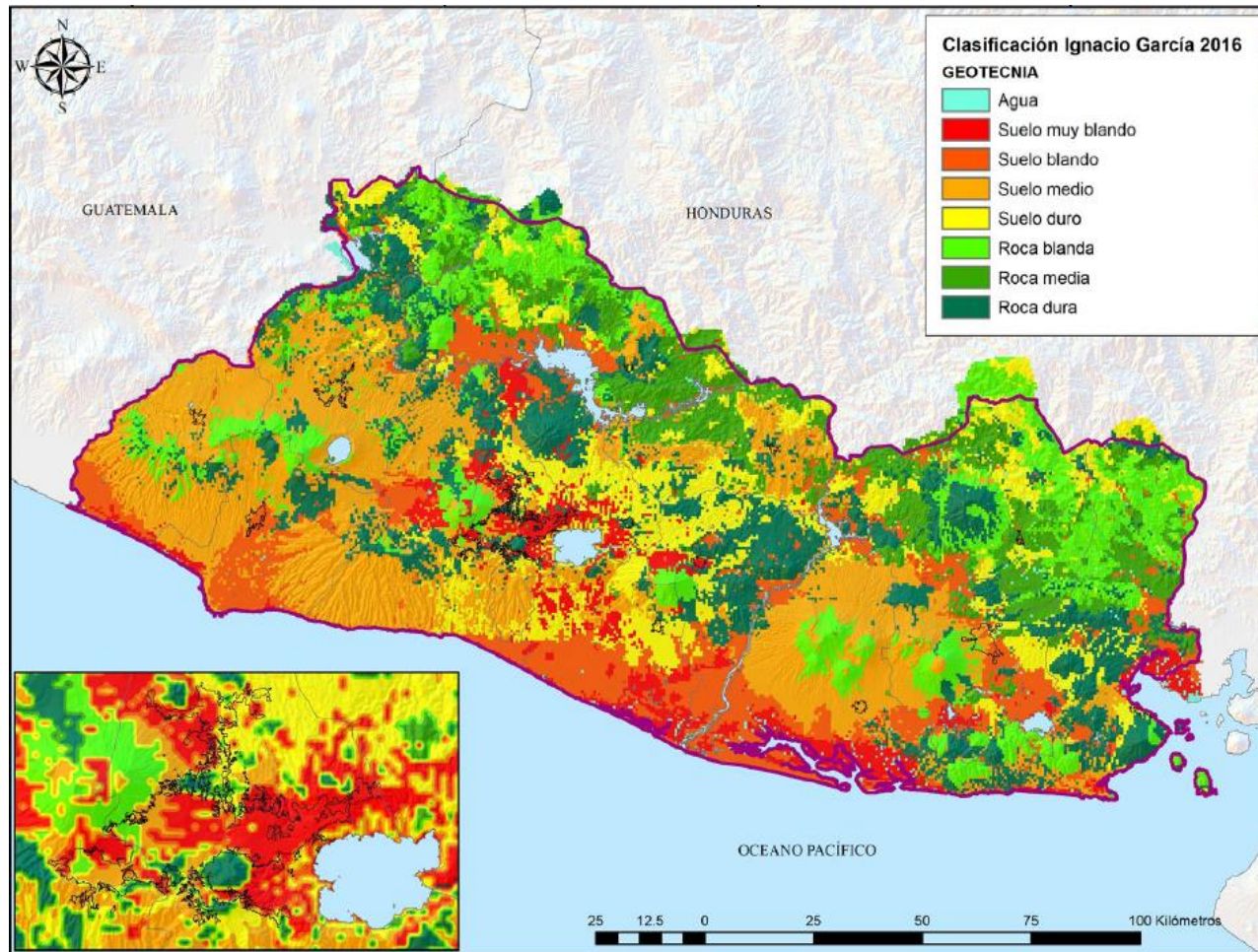


Estimación de V_s para unidades
de perfiles geológicos:
Reclasificaciones investigadas



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de Vs para unidades de perfiles geológicos

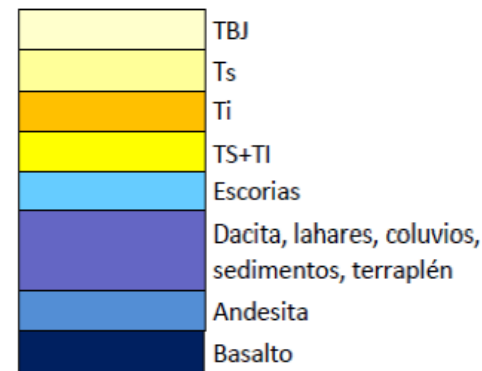


Fuente: Ignacio García, 2016

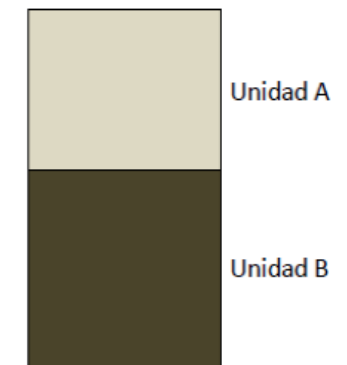
Se basa en el **acomodo de espesores** de tipos de suelo en consonancia con **orígenes de procesos eruptivos conocidos**.

Haciendo énfasis en la consideración de productos volcánicos de Ilopango: **TBJ, Tobas superiores [Ts] e inferiores [Ti]**

Leyenda Clasificación Detallada

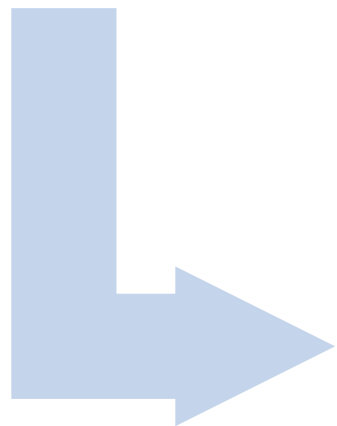


Leyenda Clasificación en Unidades



Fuente: C. Kattan, MARN 2011

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”



**Estimación de V_s para unidades
de perfiles geológicos:
Definición de profundidades de Tobas de
Caldera de Ilopango**

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de Vs para unidades de perfiles geológicos

Se procedió a recabar diferentes investigaciones geológicas con el fin de localizar las profundidades límites de los productos de Ilopango, apoyándose con la información de espesores de los perfiles de SIHI

Cortes en AMSS con nuevo mapa geológico de OPAMSS

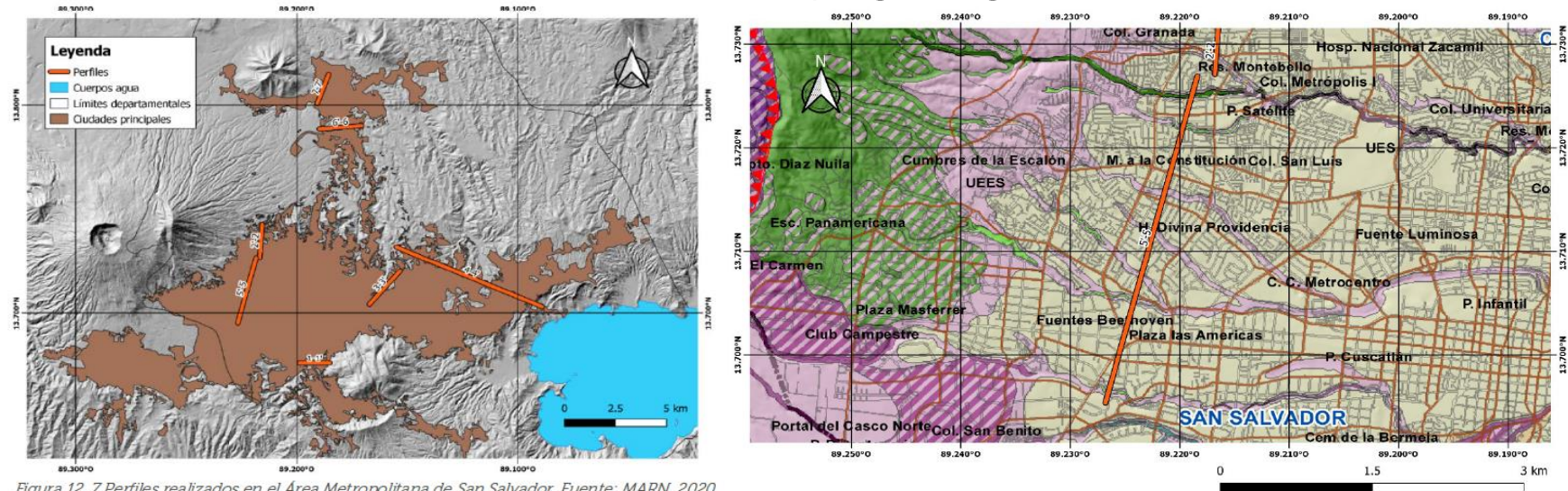


Figura 12. 7 Perfiles realizados en el Área Metropolitana de San Salvador. Fuente: MARN, 2020

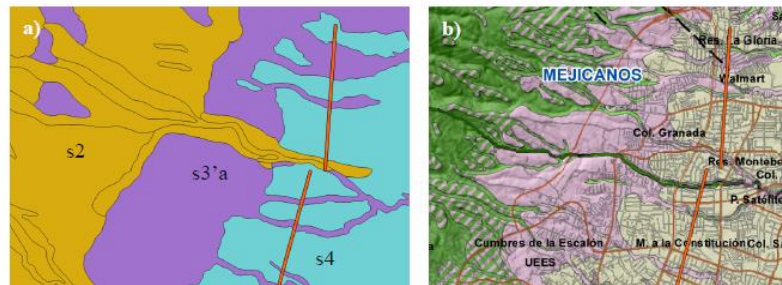
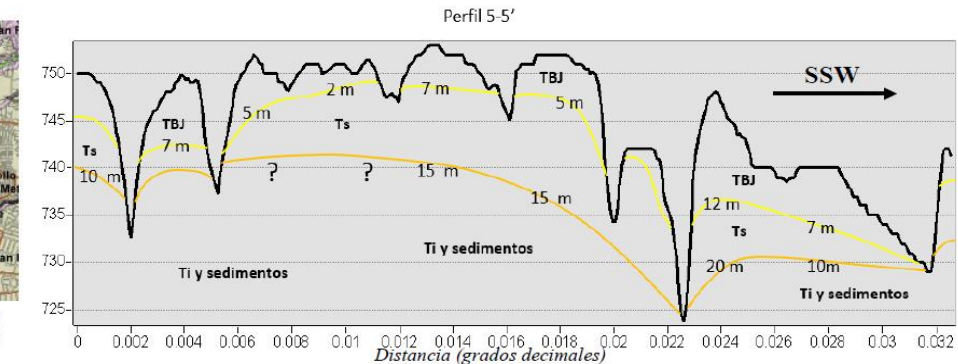


Figura 13. Comparación de mapas geológicos junto dos de los perfiles realizados. a) Mapa geológico “AMSS-15k” y b) Mapa geológico nuevo del AMSS 1:50,000 de OPAMSS. Fuente: MARN, 2020



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de Vs para unidades de perfiles geológicos

Hidro-geofísica de cuenca del río San Antonio - Nejapa

Modelo Conceptual y Vulnerabilidad Intrínseca Acuífero Quezaltepeque-Nejapa.

Caracterización Hidro-geoquímica e Isotópica de Áreas de Recarga en el Acuífero de San Salvador

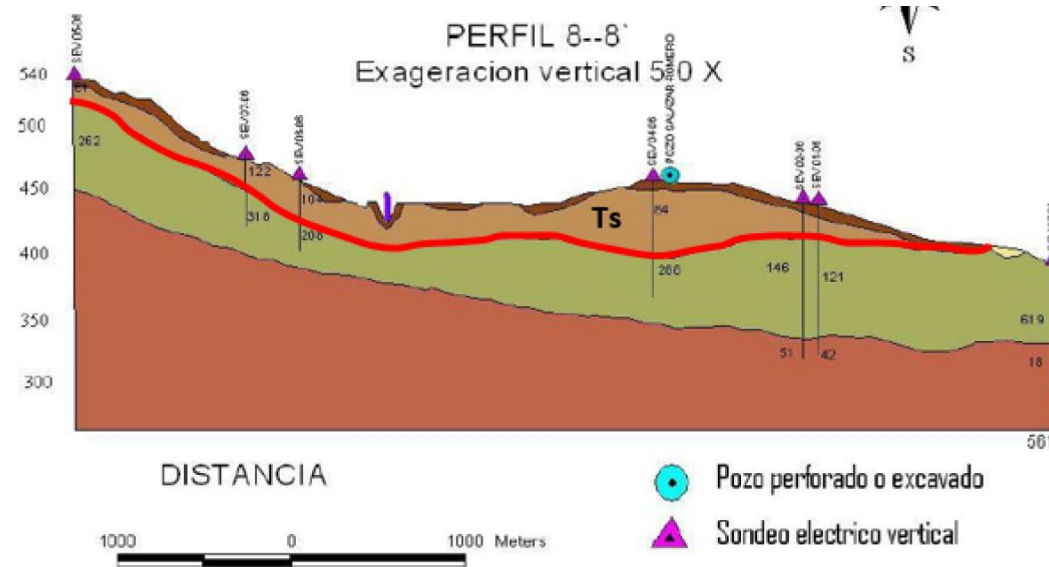
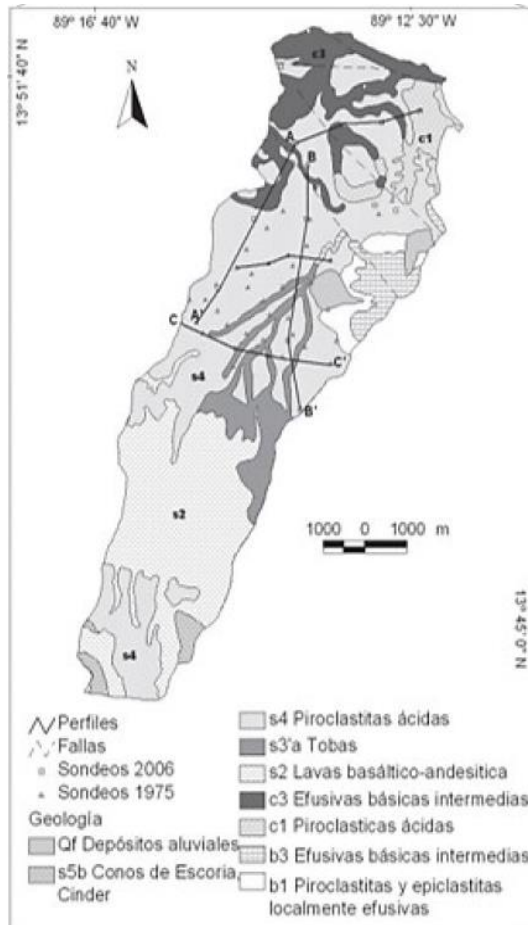


Figura 33. Perfil 8-8' en el área de Quezaltepeque-Nejapa. Fuente: Batres, A. 2007

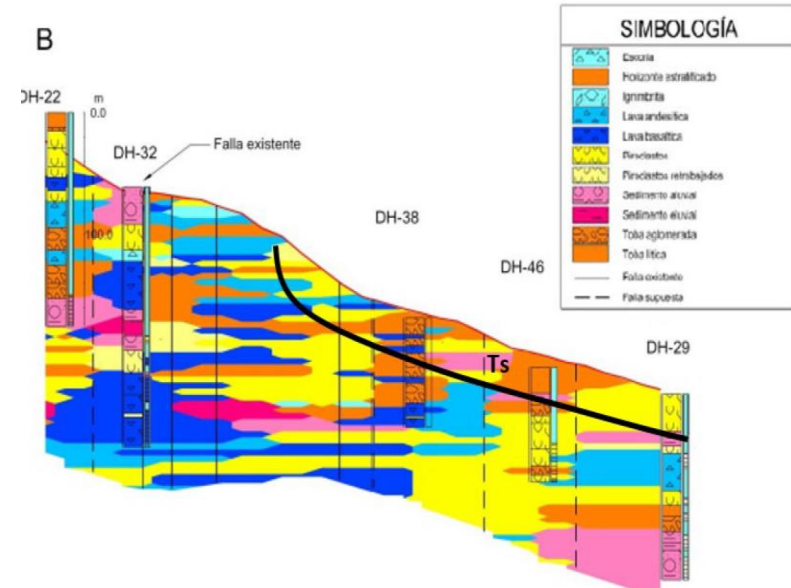


Figura 45. Perfil B-B' Antigua Cuscatlán hasta la colonia Rábida. Fuente: Barrera Calderón, 2010

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de Vs para unidades de perfiles geológicos

The Ilopango Caldera Complex, El Salvador: Origin and Early Ignimbrite eruptions of a Pull-Apart Caldera Structure

Mapa de isopropfundidades de Tobas superiores

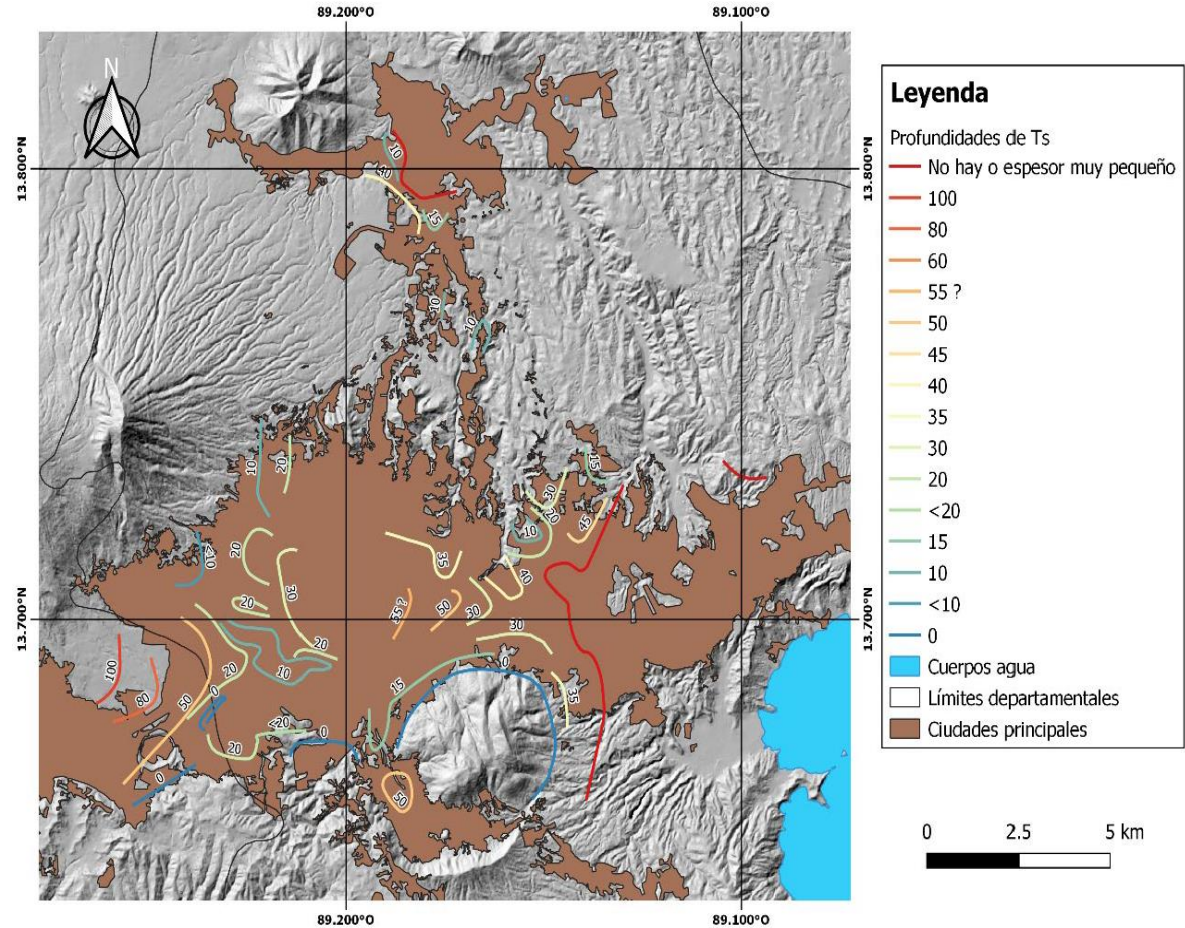
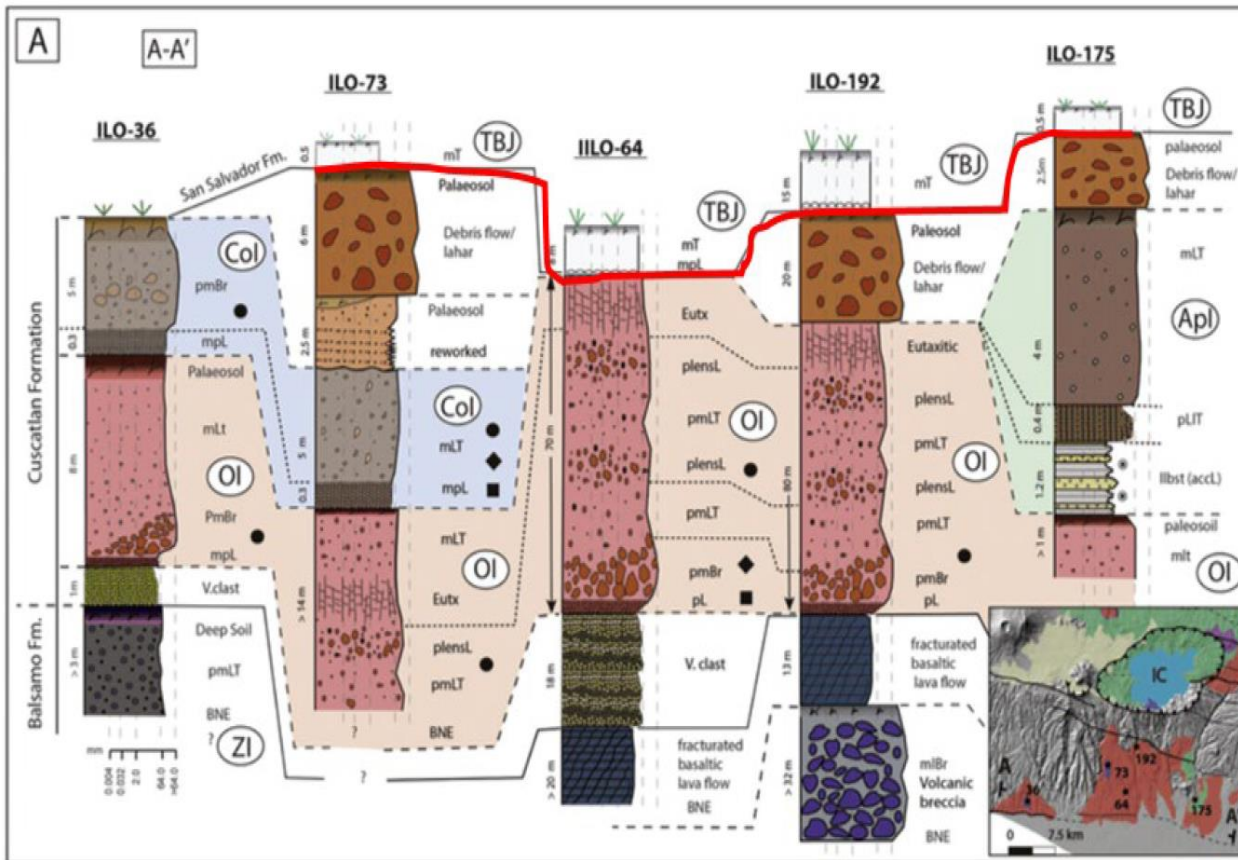
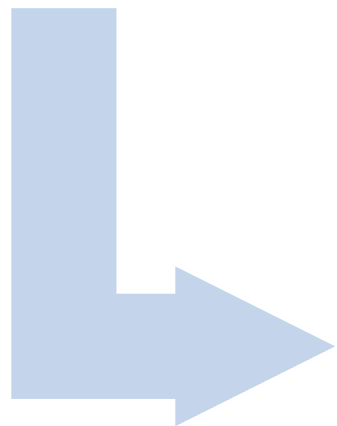


Figura 38. Perfil A-A' ubicado al sur de San Salvador y Caldera de Ilopango. Fuente: Puchol, et al., 2018

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”



**Estimación de V_s para unidades
de perfiles geológicos:
Correlación geológica con Velocidades
obtenidos del Downhole**

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de V_s para unidades de perfiles geológicos

Con el objetivo de poder utilizar la **información suministrada en la descripción litológica** de cada uno de los perfiles estratigráficos, así **como extraer muestras para realizar ensayos geotécnicos**



Se realiza un **proceso de reclasificación** sobre la base de **criterios asociados a los parámetros que más influyen en las propiedades dinámicas del subsuelo**

Perfil de espesores de velocidad de corte (V_s) obtenidos por ensayos Down-hole

Edad y formaciones geológicas de acuerdo al mapa geológico superficial 1:100,000

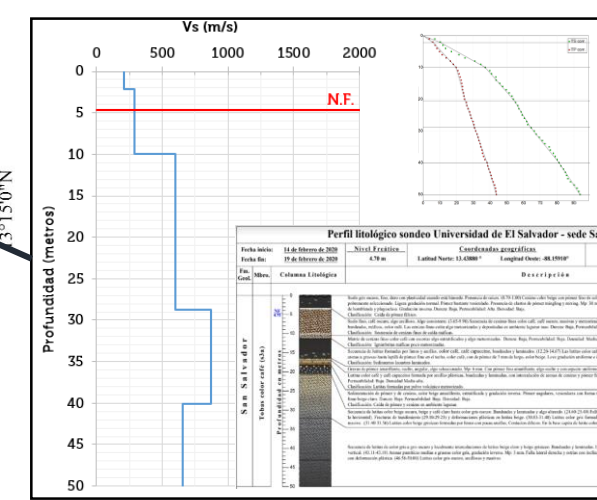
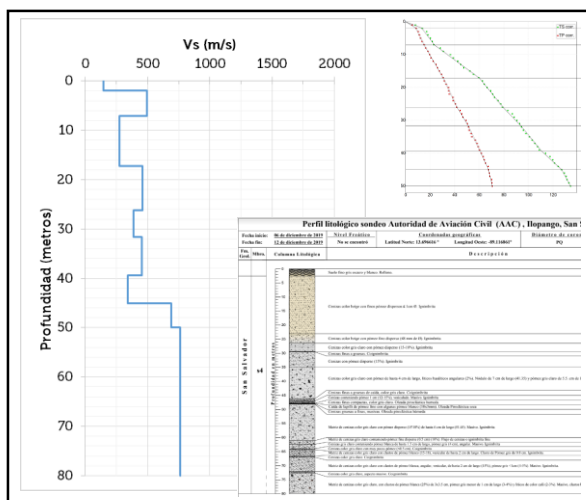
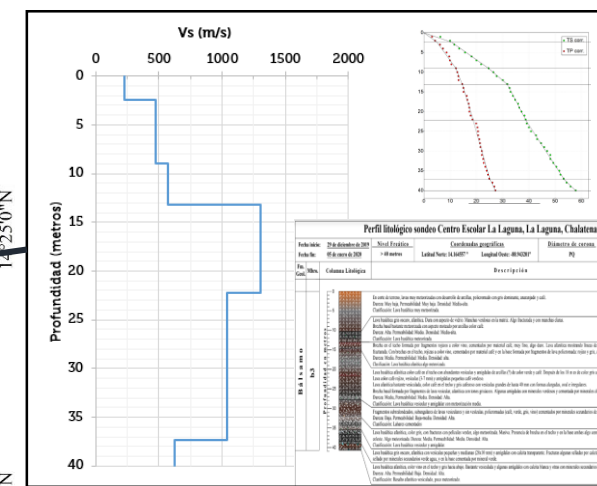
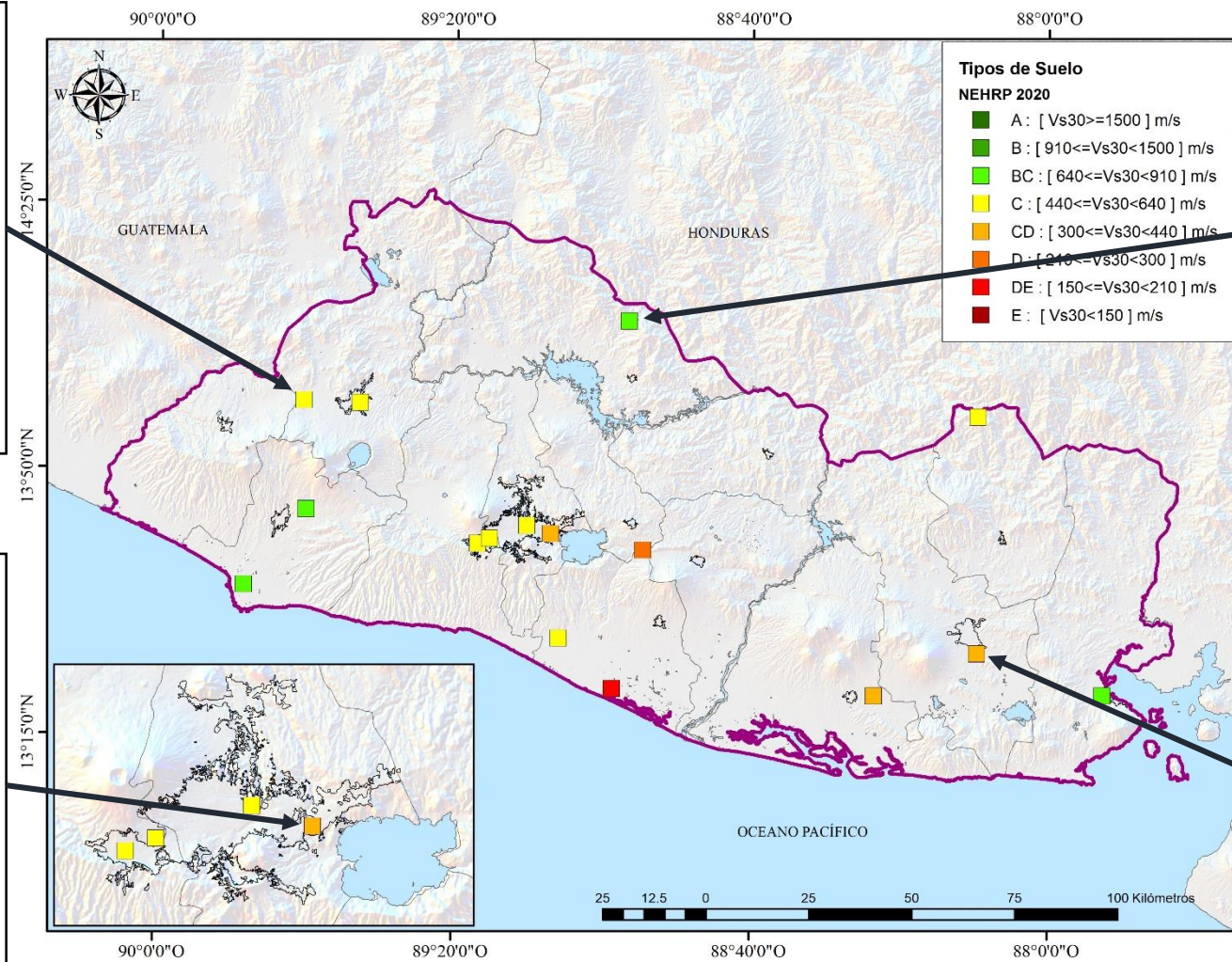
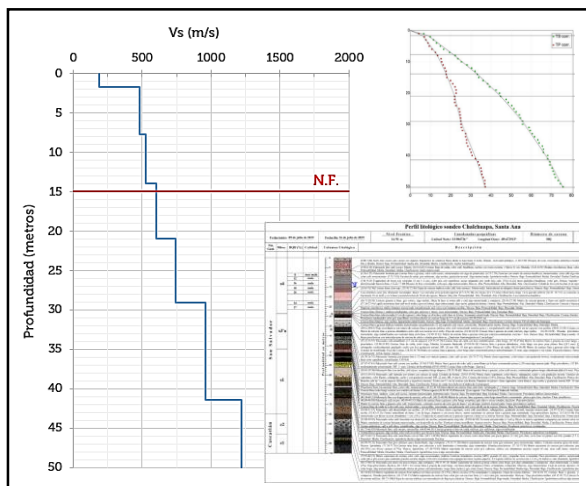
Clasificaciones en profundidad realizadas por cronología eruptiva.

Descripción visual sobre la composición granulométrica y calidad de la roca/suelo de cada una de las unidades identificadas.

Descripciones físicas de las unidades litológicas tales como: Dureza, Densidad y Permeabilidad.

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de Vs para unidades de perfiles geológicos



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

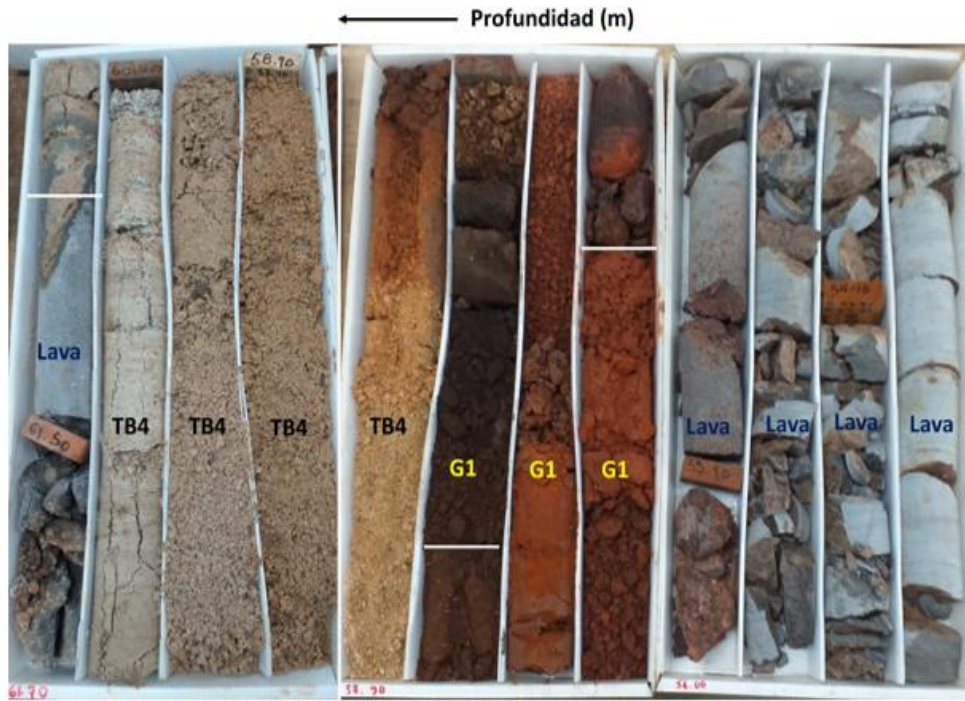
Estimación de Vs para unidades de perfiles geológicos



Descripción y caracterización litológica a detalle de cada uno de los 15 pozos

Una descripción física de los suelos y rocas identificadas, específicamente:

- color, textura,
- grado de meteorización,
- grado de consistencia,
- presencia de vesículas y mineralizaciones,
- identificación de fracturas, juntas y fallas,
- estimación del grado de dureza,
- permeabilidad y
- densidad.
- En las secciones de la perforación donde se encuentran lavas o rocas blandas como ignimbritas se referencian medidas de *Rock Quality Designation (RQD)*.



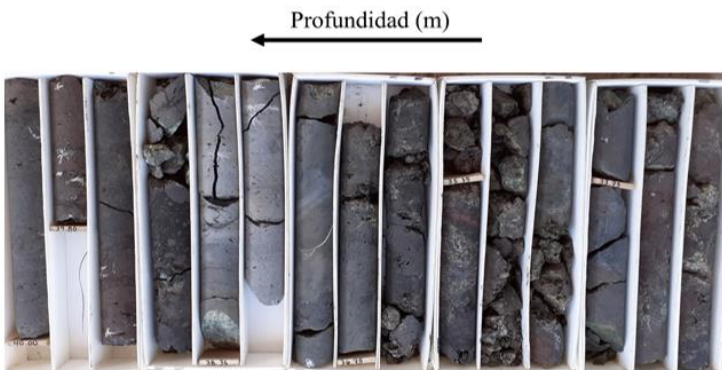
Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de Vs para unidades de perfiles geológicos

Sondeo La Laguna: 40 m
Montañas del norte de ES

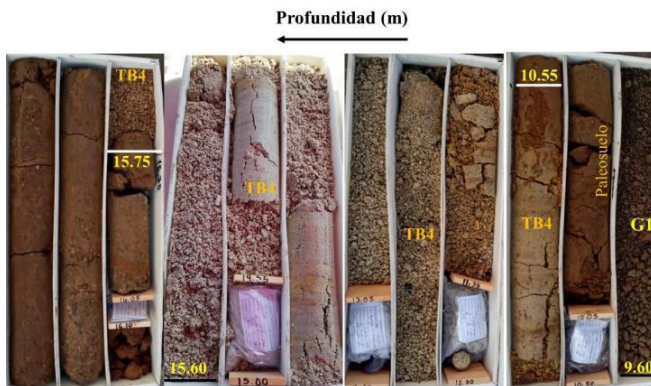
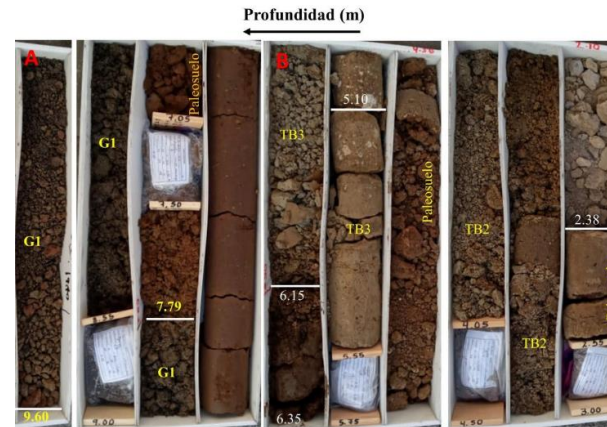


0.00-9.60 m
Lavas máficas bastante meteorizadas



35.42-36.46 m
Lavas basálticas de color gris, bastante vesiculadas, poco meteorizadas y con brechas basales

Sondeo DIGESTYC: 50 m



Talud cercano a pozo



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de V_s para unidades de perfiles geológicos

Sondeo ITCA: 50 m

De 13.05 a 27.35 m se encuentra una potente lava andesítico-basáltica color gris

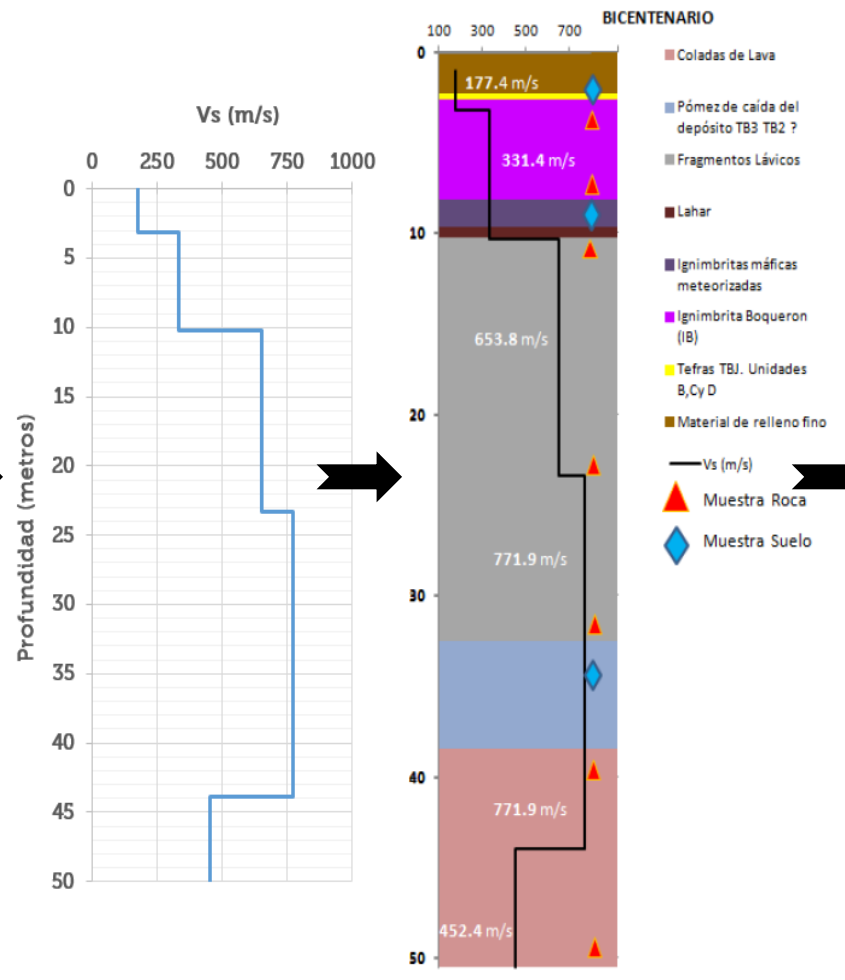
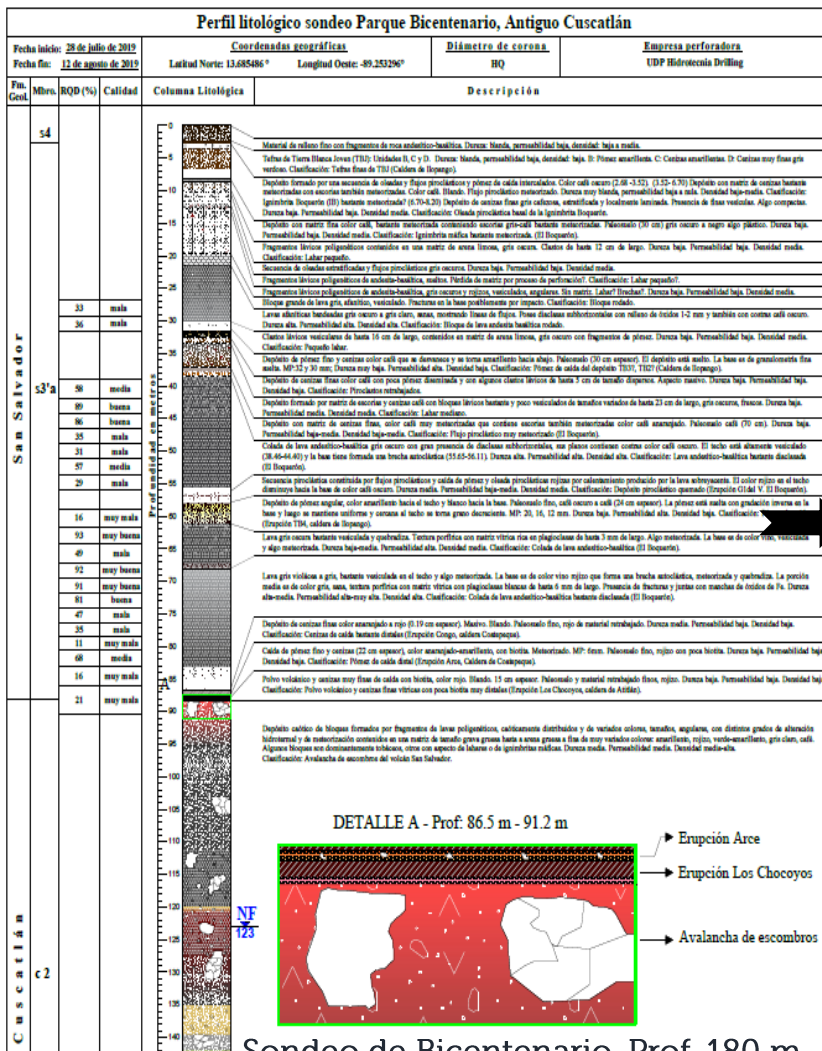


Profundidad (m)



Mapa de zonificación sísmica "homogénea"

Estimación de Vs para unidades de perfiles geológicos



SONDEO BICENTENARIO
Coordenadas Geográficas WGS84
Latitud: 13.685486° Longitud: -89.253296

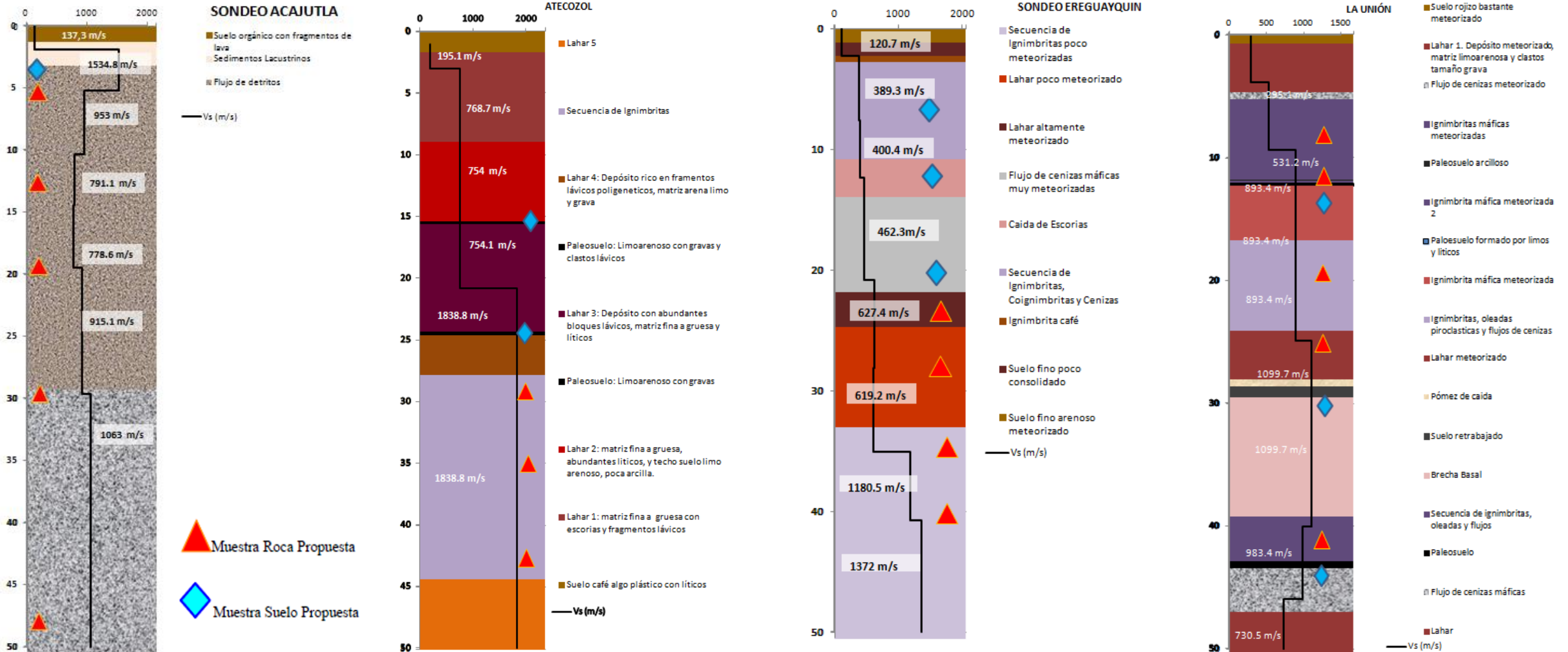
Dureza (D): Nula (N), Blanda (Bl), Baja (B), Media (M), Alta (A)
Permeabilidad (P): Baja (B), Media (M), Alta (A)
Densidad (ρ): Baja (B), Media (M), Alta (A)
Tamaño de grano (TG): Fino (F), Medio (M), Grueso (G)- Arcilla (Ar), Limo (L), Arena (A)
RQD: < 25% Muy mala (Mm), 25-50% Mala (M), 75-90% Media (Md), 90-100% Muy buena (Mb)
NA: No aplica LA: Lahar

▲ Muestra Roca Propuesta ◆ Muestra Suelo Propuesta

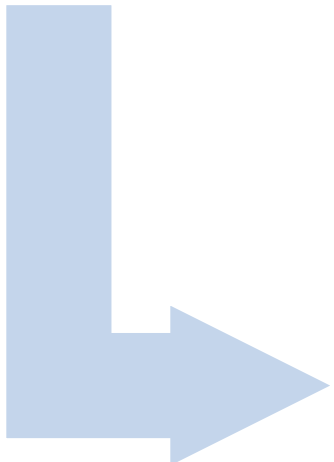
Profundidad (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)	Formación	Litología Asociada/ Clasificación	D	P	ρ	TG	RQ D	Ensayo #Muestras
0-2.30	2.30 m	177.4	Fm. San Salvador, Miembro S4	Material de relleno fino	Bl	B	B-M	A-F	NA	
2.30-2.68	0.38	177.4	Fm. San Salvador, Miembro S3'a	Tefras TBJ. Unidades B, C y D (Caldera Ilopango) B: Pómez amarillenta C: Cenizas Amarillentas D: Cenizas muy finas gris verdoso.	Bl	B	B	F	NA	◆
2.68-8.20	5.52	331.4	Fm. San Salvador, Miembro S3'a	Depósito formado por secuencia de Oleadas y flujos piroclásticos e ignimbritas (Ignimbrita Boquerón IB)	Bl	N-B	B-M	F	NA	▲
8.20-9.70	1.5	331.4	Fm. San Salvador, Miembro S3'a	Depósito de ignimbritas máficas meteorizadas, paleosuelo de 30 cm color gris oscuro negro, algo plástico.	B	B	M	F-M	NA	◆
9.70-10.25	0.55	331.4	Fm. San Salvador, Miembro S3'a	Lahar: Depósitos Lávicos poligenéticos contenidos en una matriz de arena limosa, gris oscura- Clastos hasta de 12 cm de largo.	B	B	M	F-MA-L	NA	▲

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de Vs para unidades de perfiles geológicos



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”



**Estimación de V_s para unidades
de perfiles geológicos:
Caracterización geotécnica de los suelos
de los pozos**

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de Vs para unidades de perfiles geológicos

Nº de caja	Profundidad (m)	Tipo material	Ensayos a realizar	w%	Tamaño máximo (mm)	% Grava	% Arena	% Fino	LL%	LP%	IP%	Gs	Descripción	Clasificación ASTM D 2487
1	0.80 a 1.05	Suelo	Contenido de humedad, granulometría por tamizado, Límite líquido y límite plástico, Gravedad específica	47	4.75	0.0	26.1	73.9	68	21	47	2.7	Arcilla grasa con arena, tamaño máximo 4.75 mm, 0% de grava, 26.1% de arena y 73.9% de arcilla de alta plasticidad, color ??	CHs
2	3.30 a 3.45	Suelo	Contenido de humedad, granulometría por tamizado, Límite líquido y límite plástico, Gravedad específica	44	2.00	0.0	61.6	38.4	83	51	32	2.7	Arena limosa, tamaño máximo 2.00 mm, 0% de grava, 61.6% de arena y 38.4% de limo de alta plasticidad, color ??	SM
3	5.00 a 5.25	Suelo	Contenido de humedad, granulometría por tamizado, Límite líquido y límite plástico, Gravedad específica	39	2.00	0.0	45.4	54.6	71	41	30	2.7	Limo elástico arenoso, tamaño máximo 2.00 mm, 0% de grava, 45.4% de arena y 54.6% de limo de alta plasticidad, color ??	sMH

Cuadro resumen de valores de D_{50} y C_u , en suelos de perforaciones rotativas del BID, sitio: UES San Miguel, San Salvador						
Fecha: <u>08/07/21</u>						
Nº	Identificación	Profundidad (m)	D_{50} (mm)	C_u	% de finos	Clasificación de suelo
1	Suelo 1	0.00 a 0.60	*	ND	81.9	(CH)s
2	Suelo 2a	4.50 a 4.70	*	ND	78.0	(CH/MH)s
3	Suelo 2b	8.15 a 8.55	0.086	ND	45.6	SM
4	Suelo 3	20.70 a 21.20	*	ND	98.4	MH
5	Suelo 3b	26.20 a 26.50	*	ND	95.5	MH/CH
6	Suelo 4c	34.75 a 35.20	*	ND	97.9	MH
7	Suelo 5a	46.80 a 47.20	*	ND	98.2	MH

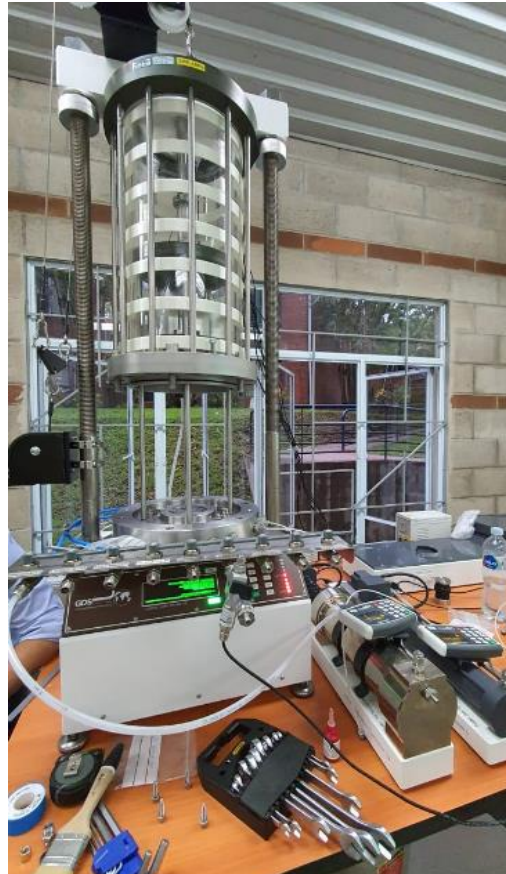
ND: No determinado ya que no se puede obtener D_{10} en la gráfica granulométrica
*: No se puede determinar, ya que la gráfica se corta a más del 50% de material que pasa

Ensayos a desarrollar	ASTM	Requeridos	Realizados	% Avance
Contenido de humedad en suelo	D 2216-19	269	269	100.0
Material más fino que tamiz N° 200	D 1140-17	74	61	82.4
Granulometrías por tamizado	D 6913-17	54	48	88.9
Límites de consistencia	D 4318-17	66	47	71.2
Gravedades específicas en suelos	D 854-14	67	54	80.6
Contenido de humedad en roca	D 2216-19	19	19	100.0
Compresión en roca	D 2166-16	19	19	100.0
Pesos unitarios en suelo	sin norma	94	4	4.3
Contenido de materia orgánica	D 2974-20	1	1	100.0
Límite líquido secado en horno	D 4318-17	1	1	100.0
Determinación de D_{50} y C_u	D 6913-17	54	23	42.6
Ensayo de dilatancia	D 2488-17	13	13	100.0
Ensayo de resistencia en estado seco	D 2488-17	13	13	100.0
Ensayo de tenacidad y plasticidad	D 2488-17	13	13	100.0
Clasificación visual manual	D 2488-17	13	13	100.0
Total		770	598	77.7

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de V_s para unidades de perfiles geológicos

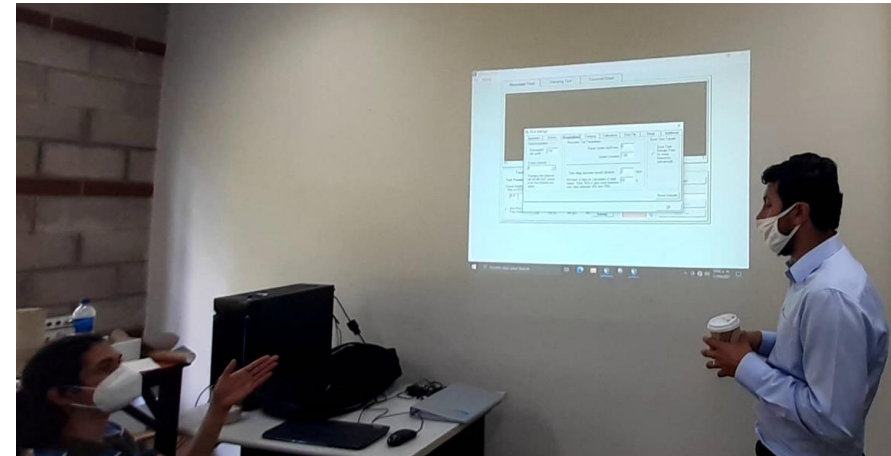
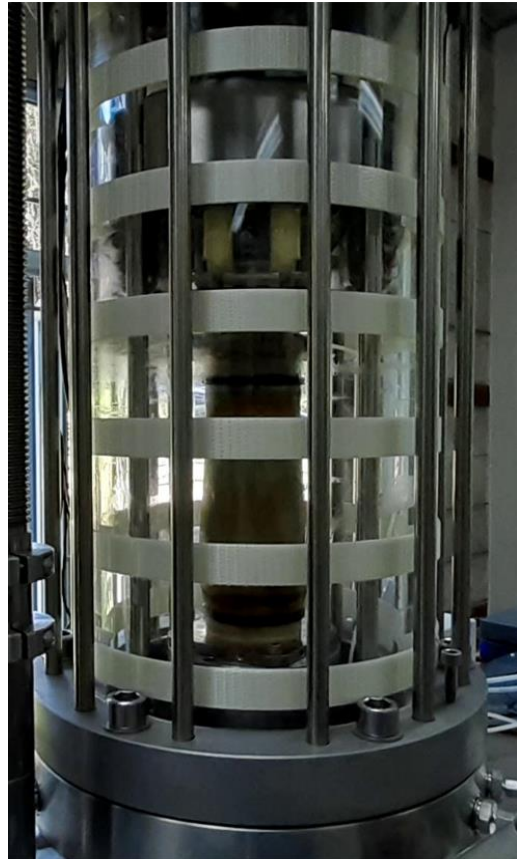
Se ha adquirido una cámara Triaxial de columna Resonante con acción torsionante



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de V_s para unidades de perfiles geológicos

Se ha adquirido una cámara Triaxial de columna Resonante con acción torsionante



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”



Estimación de V_s para unidades
de perfiles geológicos:

Juicio final para estimar las V_s en
unidades de los perfiles geológicos

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de V_s para unidades de perfiles geológicos

Opinión de expertos
sobre Geología y
Geotecnia de El
Salvador

Realizando comparativa con valores de velocidad de cortes obtenidas en ensayos Down-hole.

Utilización de
valores promedio
 V_{s30} presentados
por el NEHRP 2020

En consonancia con la descripción geológica de los tipos de suelo de los perfiles.

Utilización de valores
medios de V_s
presentados por
Ignacio García, 2016

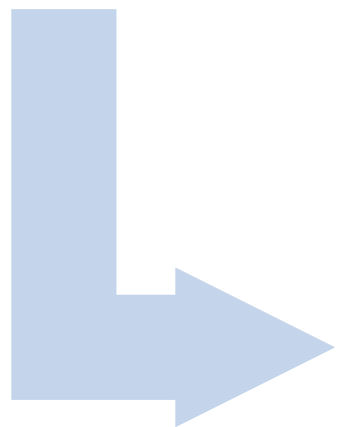
En conformidad con los grupos litológicos-geotécnicos planteados por el autor.

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Estimación de V_s para unidades de perfiles geológicos

No	Reclasificación de Clases de Suelo					Criterio Geotécnico (prom. de 30 m superiores)		
	Tipo Clase 2016 NEHRP	Tipo Clase 2020 NEHRP	Descrip. general	Descripción detallada	Productos volcánicos DOMINANTES en columna de suelo según MARN 2011 y discusiones con geólogos	V_{s30} (m/s)		V_{s30} (m/s) Media GM
6	D	D	Suelo poco duro	Suelo de arena medianamente densa o suelo arcilloso rígido	Tobas Superiores superficiales (Productos antiguos de TBJ de la caldera de Ilopango) Tierra Blanca Joven proximal en profundidad, Lahares bien meteorizados	210	300	250
7		DE	Suelo blando	Suelo de arena suelta o suelo arcilloso medio rígido	Tierra Blanca Joven distal superficial, Suelos plásticos meteorizados, Suelos retrabajados con bloques de rocas y granos gruesos.	150	210	180

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”



Aplicación de Machine Learning
para generar mapa



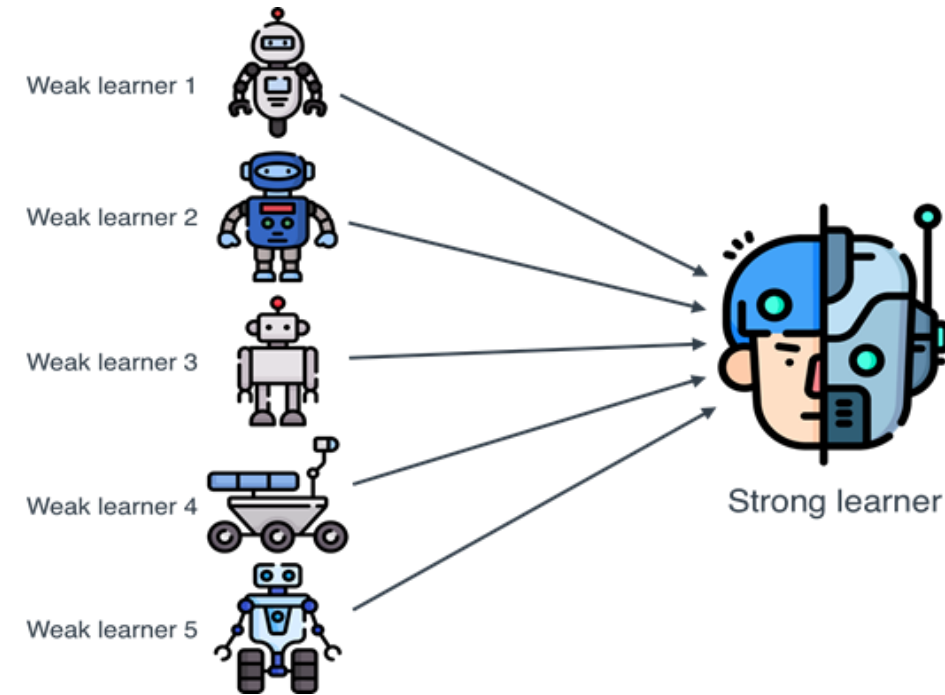
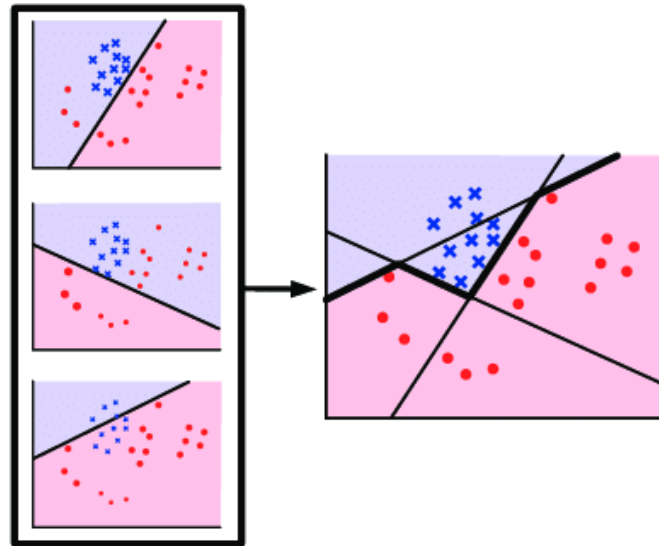
Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Aplicación de Machine Learning para generar mapa

Métodos de ensamble: idea intuitiva

Utilización de técnicas de aprendizaje supervisado: **Random Forest con predicción espacial (RFsp)** y **Técnica de Redes de Neuronas Artificiales (RNA)**

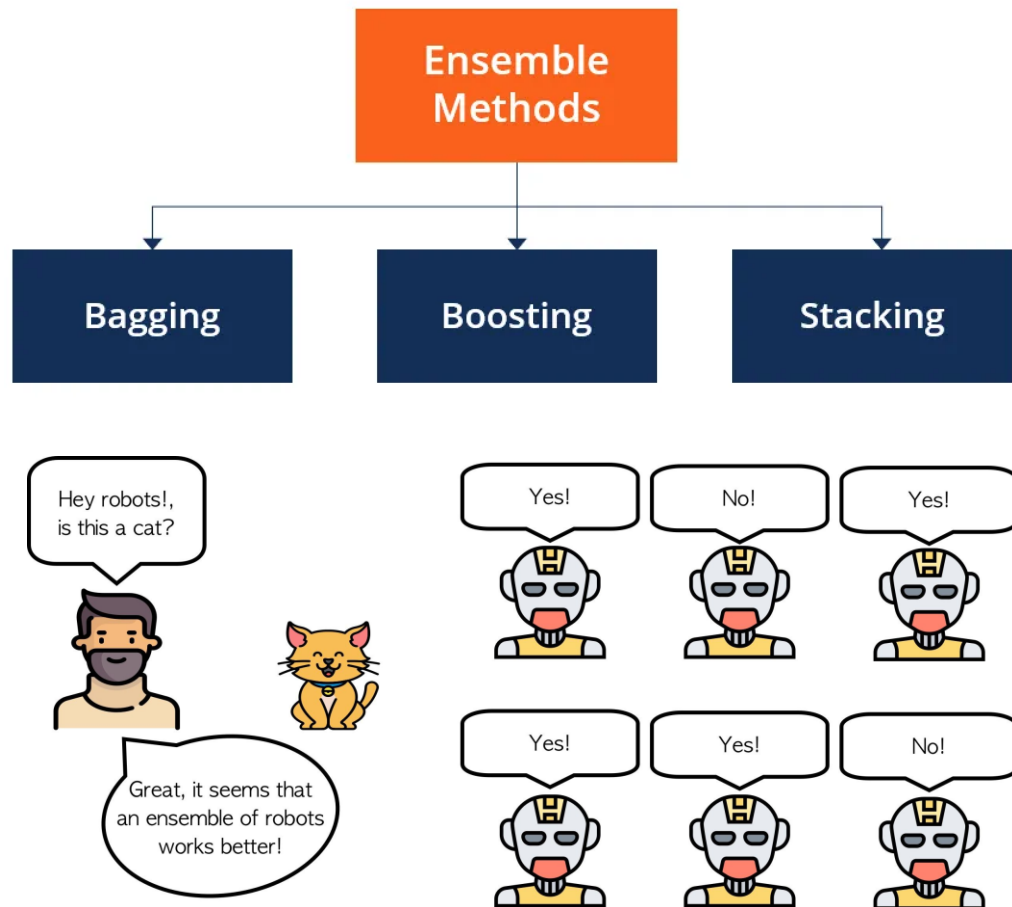
“Dos (o muchas) cabezas piensan mejor que una”



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

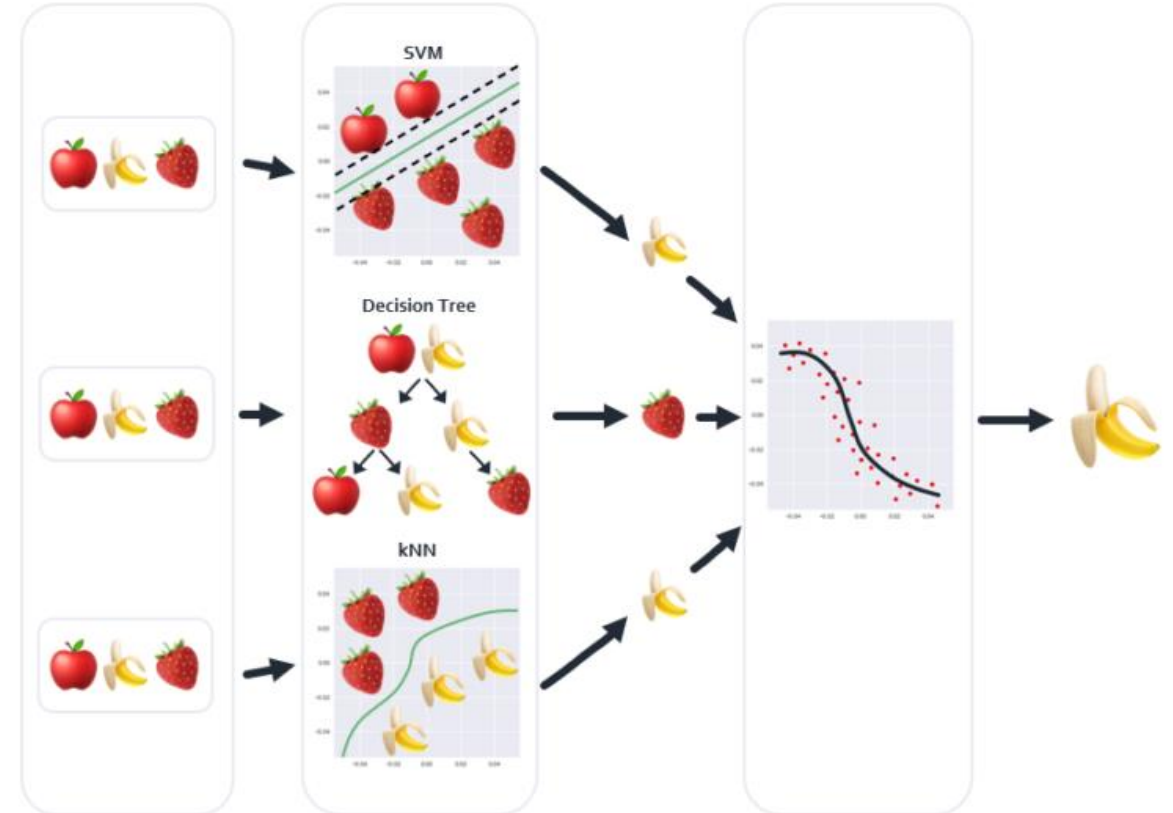
Aplicación de Machine Learning para generar mapa

Métodos de ensamble: tipos



Stacking

Diferentes algoritmos de aprendizaje sobre la misma data, para obtener un mejor rendimiento predictivo



SVM: Support Vector Machine, KNN: K-Nearest Neighbours, Decision Trees: Random Forest

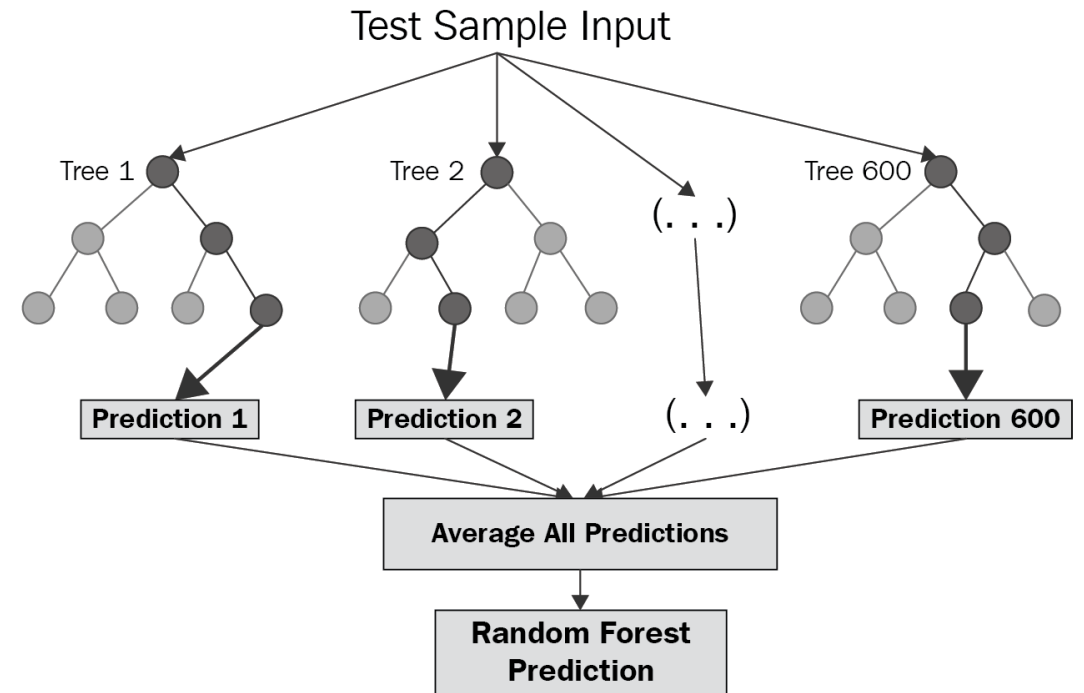
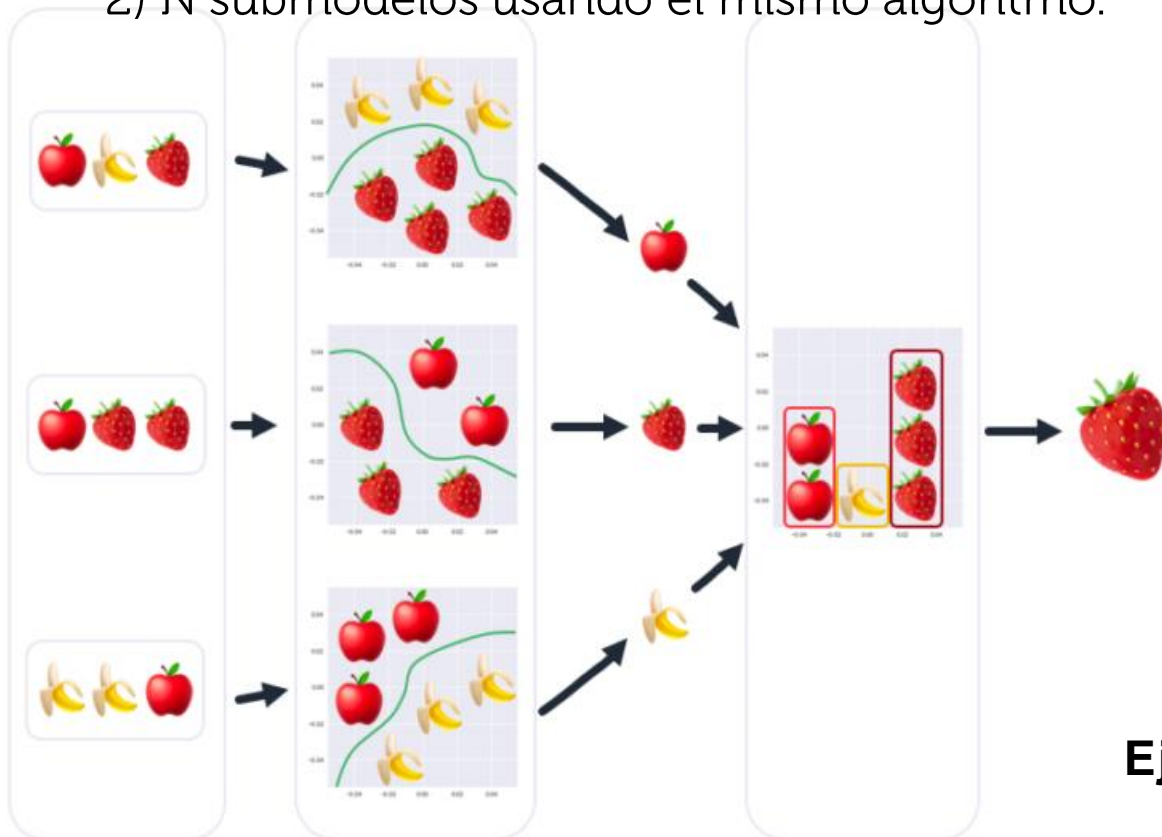
Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Aplicación de Machine Learning para generar mapa

Métodos de ensamble: tipos

Bagging (Bootstrap aggregation)

- 1) Dividir la data en subconjuntos.
- 2) N submodelos usando el mismo algoritmo.

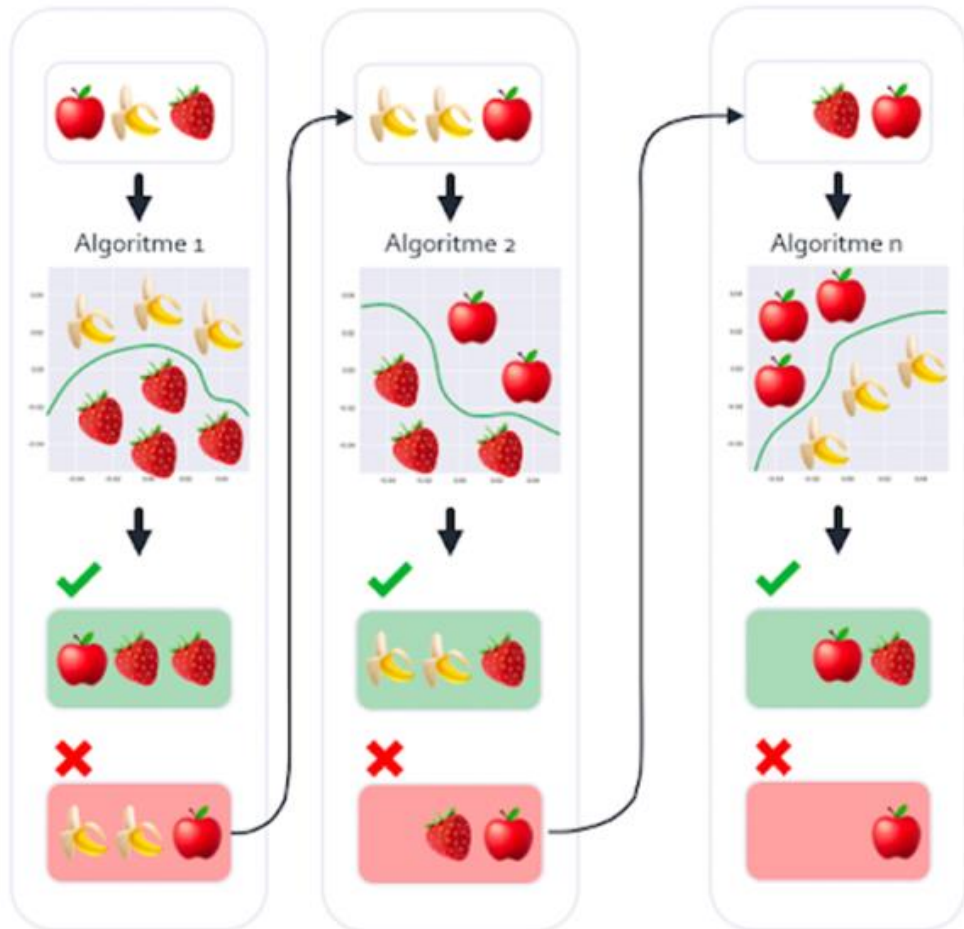


Ej. Caso específico: bosques aleatorios (Random Forest).

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

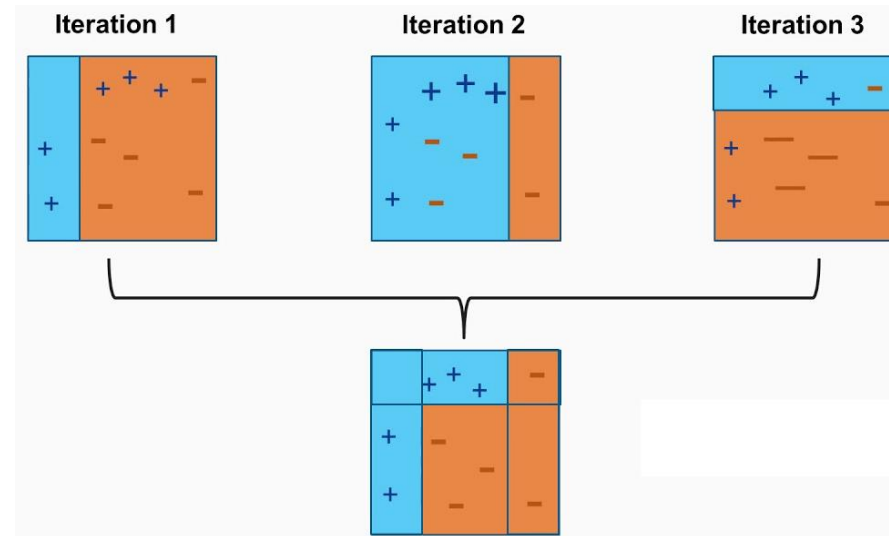
Aplicación de Machine Learning para generar mapa

Métodos de ensamble: tipos



Boosting

- 1) Forma de trabajo secuencial.
- 2) N modelos (iteraciones), cuyas entradas son las predicciones incorrectas de modelos previos.



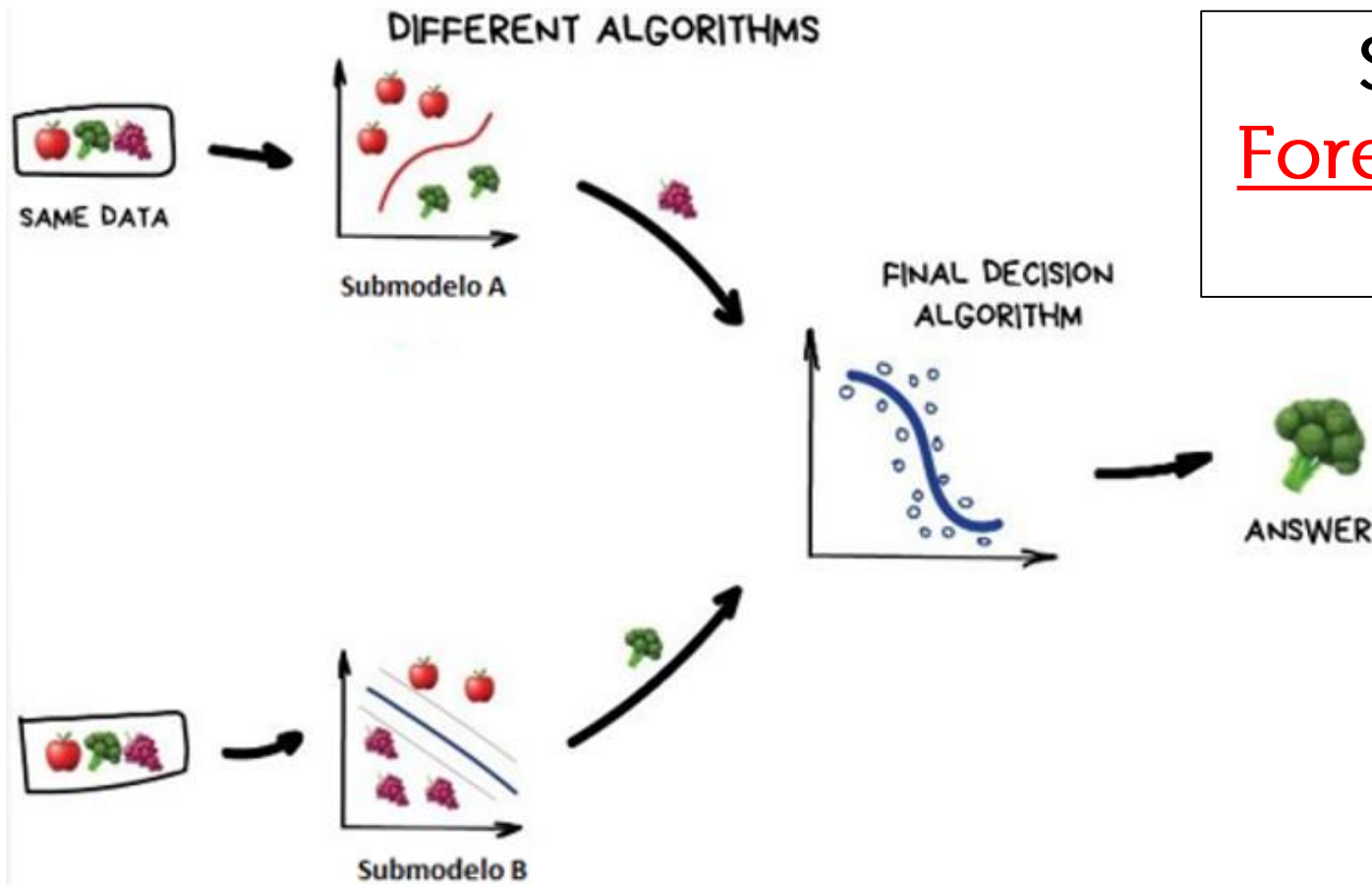
Se buscar evitar el *overfitting*



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Aplicación de Machine Learning para generar mapa

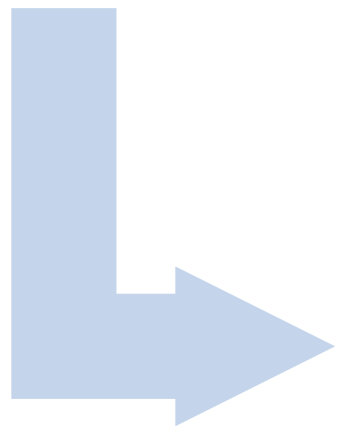
Modelo general de ensamblaje: Stacking – mediante promedio



Sub-modelo A: Random Forest con predicción espacial, salida variable real.

Sub-modelo B: Redes Neuronales:
ensamblado con la ayuda de un árbol de decisión, salida variable categórica.

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

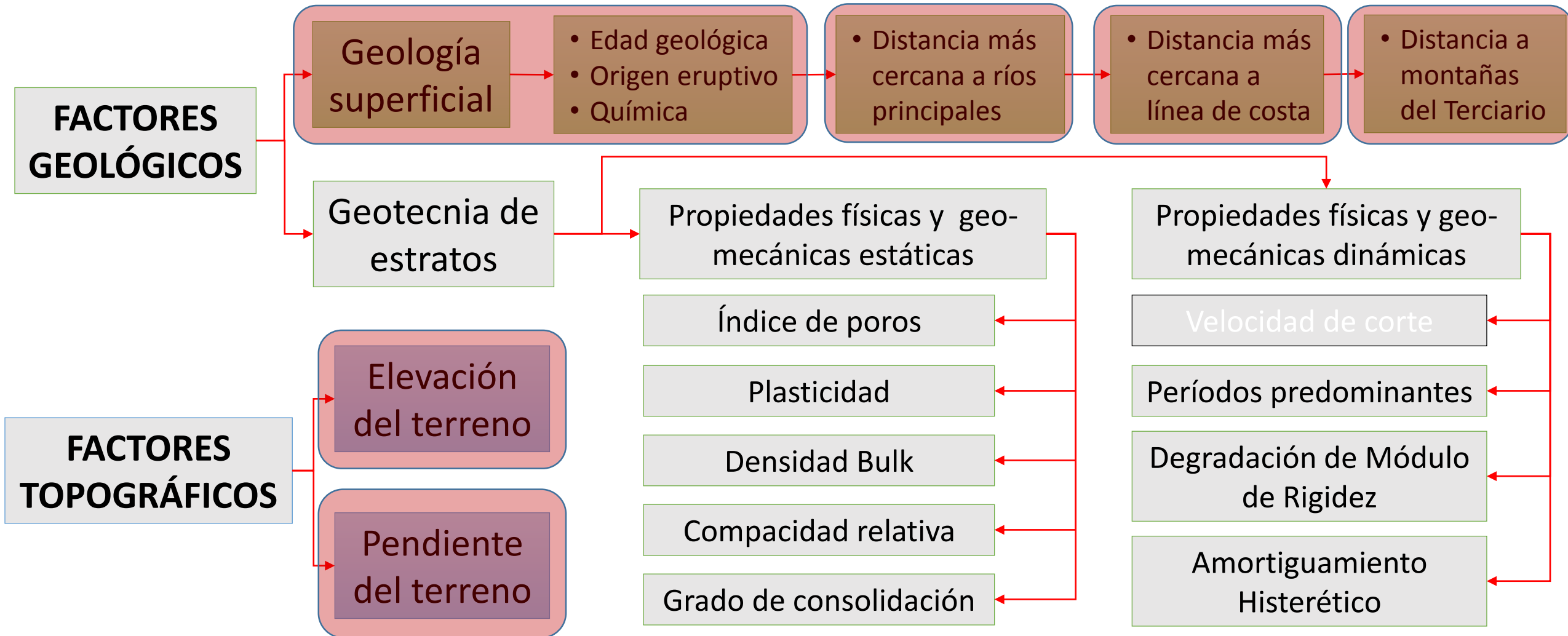


Aplicación de Machine Learning
para generar mapa
Selección de covariables

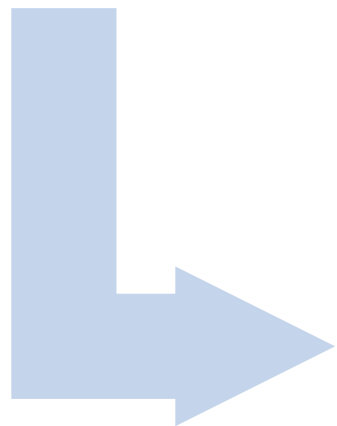


Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Aplicación de Machine Learning para generar mapa



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

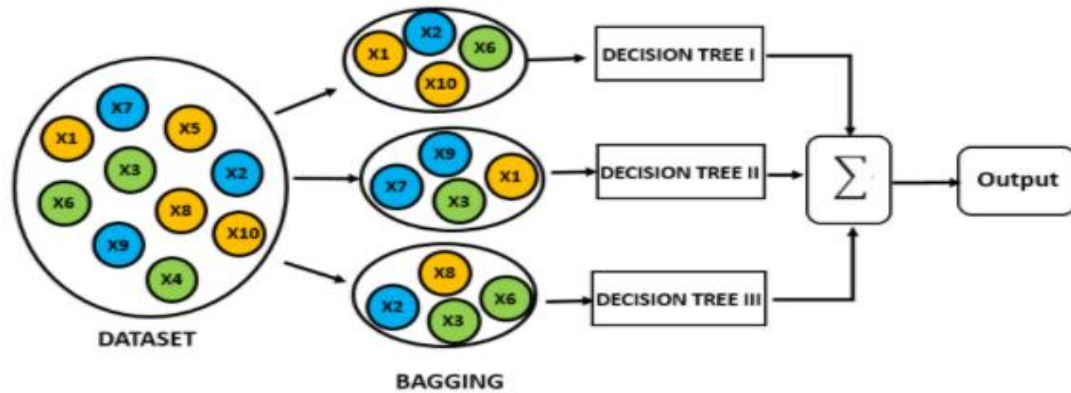


Aplicación de Machine Learning
para generar mapa

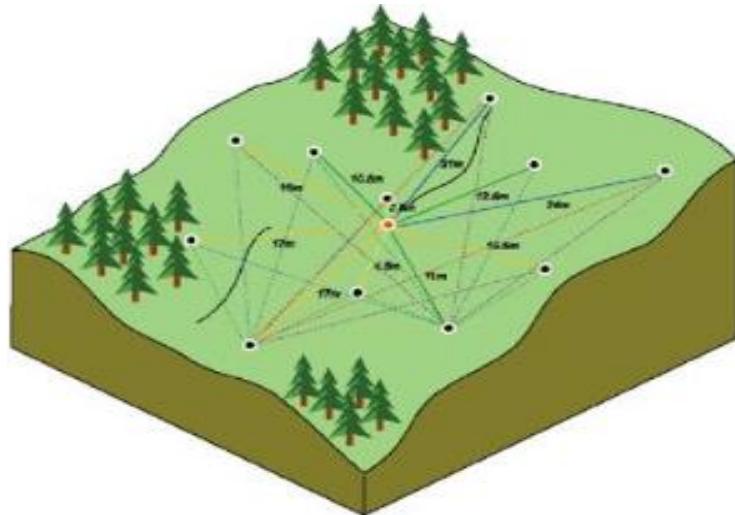
Resultados de Sub-modelo A:
Random Forest con predicción espacial

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Aplicación de Machine Learning para generar mapa



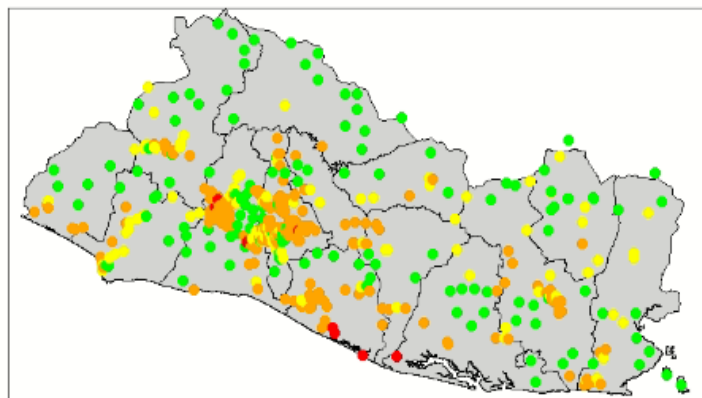
La Autocorrelación espacial que pueda existir en los datos, indica que, si no se toma en cuenta en el análisis, las predicciones pueden estar sesgadas



Por ello, (además de las coordenadas) se consideran covariables que involucren las distancias de influencia (buffer) entre los puntos de observación. Esto es RFsp (Random Forest spatial prediction).

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Aplicación de Machine Learning para generar mapa

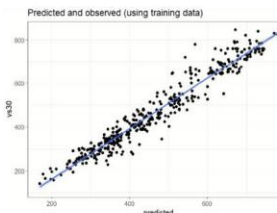


- [0, 150]
- (150, 210]
- (210, 300]
- (300, 440]
- (440, 640]
- (640, 910]
- (910, 1500]

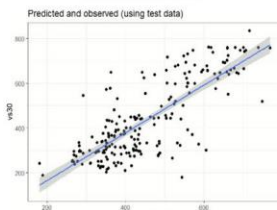
Técnica	Calidad	Pesos Varianza de medida inversa (1/Calidad ²)
Down-hole	1	1
MASW	1.15	0.756
MT	1.15	0.756
MASW-Vp	1.25	0.640
Perfiles geológicos	1.30	0.592
USGS	2.50	0.160

Random Forest con predicción espacial

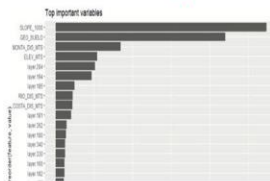
Entrenamiento de datos



Test de datos

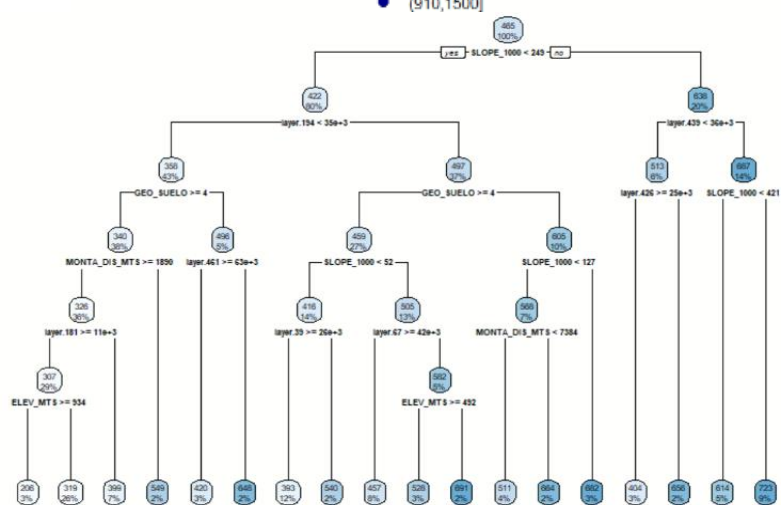
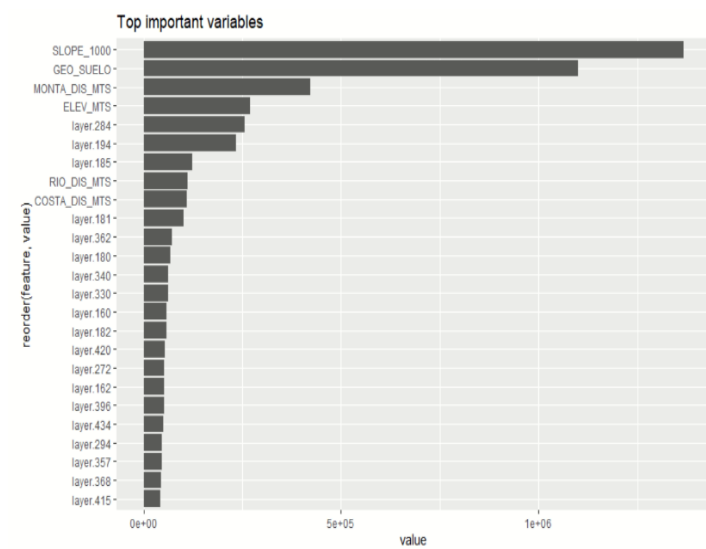
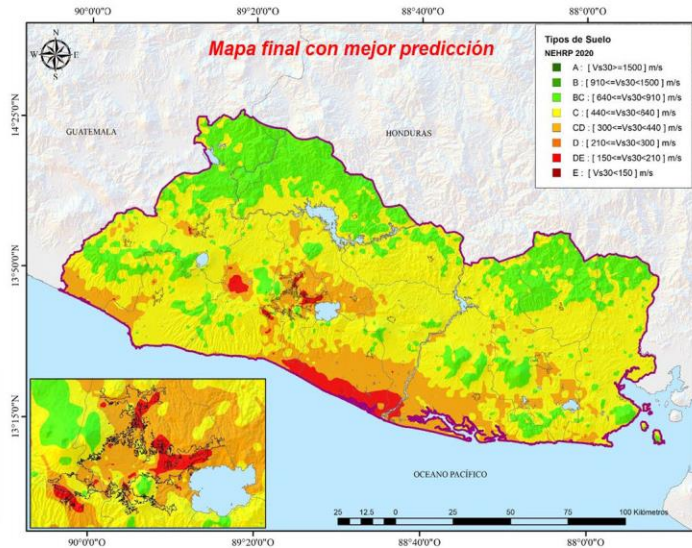
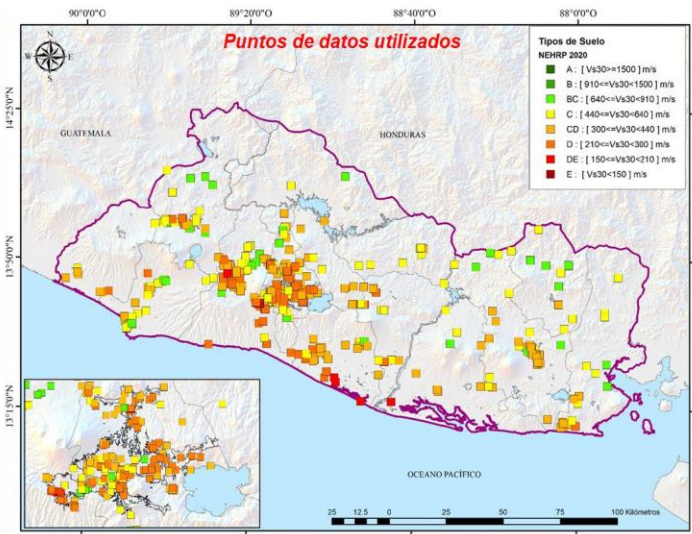


Variables de importancia



Resultado de Predicción

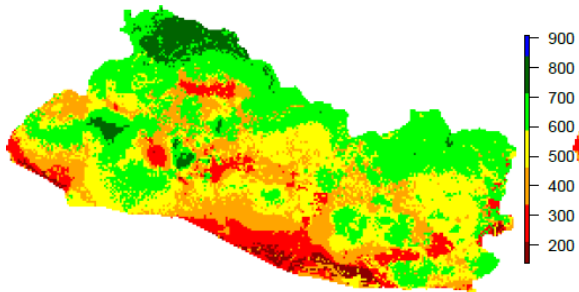
Type: Regression
 Number of trees: 30000
 Sample size: 619
 Number of independent variables: 625
 Mtry: 190
 Target node size: 5
 Variable importance mode: impurity
 Splitrule: variance
 OOB prediction error (MSE): 11191.78
R_squared (OOB): 0.6259202



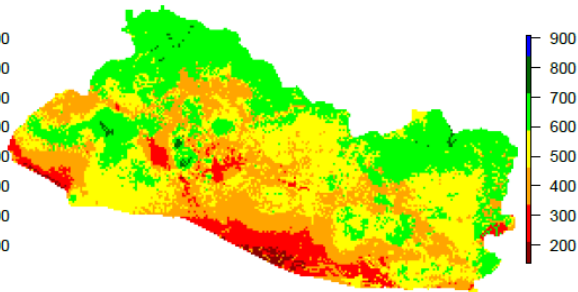
Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Aplicación de Machine Learning para generar mapa

Pred. pesos iguales: SPC + covariables (PC)



Pred. pesos calidad: SPC + covariables (PC)

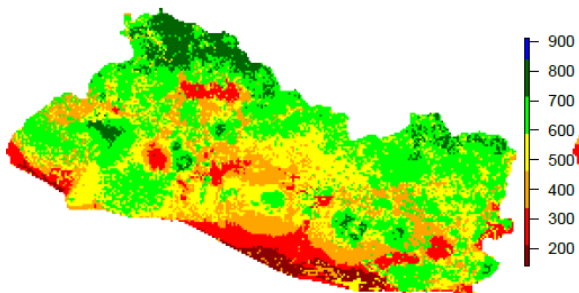


Type:	Regression
Number of trees:	1000
Sample size:	900
Number of independent variables:	906
Mtry:	432
Target node size:	6
Variable importance mode:	impurity
Splitrule:	variance
OOB prediction error (MSE):	14181.06
R squared (OOB):	0.6048959

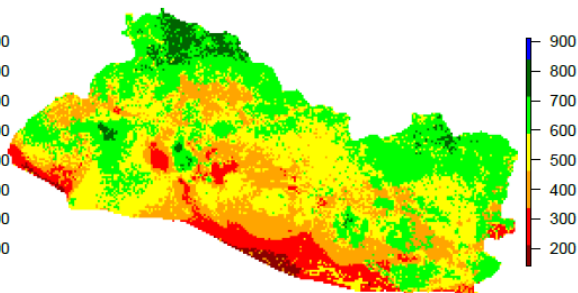
Type:	Regression
Number of trees:	1000
Sample size:	900
Number of independent variables:	906
Mtry:	597
Target node size:	4
Variable importance mode:	impurity
Splitrule:	variance
OOB prediction error (MSE):	15507.47
R squared (OOB):	0.5679403

El modelo usando componentes principales explica aproximadamente el 56.8% y 60.5% de la variabilidad la variable objetivo “vs30”, considerando de calidad o no de los datos, respectivamente.

Pred. pesos iguales: SPC + covariables reales



Pred. pesos calidad: SPC + covariables reales

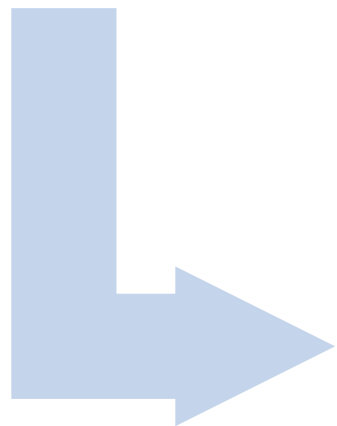


Type:	Regression
Number of trees:	1000
Sample size:	900
Number of independent variables:	906
Mtry:	274
Target node size:	3
Variable importance mode:	impurity
Splitrule:	variance
OOB prediction error (MSE):	11252.69
R squared (OOB):	0.6864843

Type:	Regression
Number of trees:	1000
Sample size:	900
Number of independent variables:	906
Mtry:	254
Target node size:	3
Variable importance mode:	impurity
Splitrule:	variance
OOB prediction error (MSE):	12482.23
R squared (OOB):	0.6522277

El modelo usando intrínsecamente las covariables explica aproximadamente el 65.2% y 68.6% de la variabilidad la variable objetivo “vs30”, considerando de calidad o no de los datos, respectivamente.

Mapa de zonificación sísmica “homogénea”



Aplicación de Machine Learning
para generar mapa

Resultados de Sub-modelo B:
Técnica de Redes Neuronales Artificiales



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Aplicación de Machine Learning para generar mapa

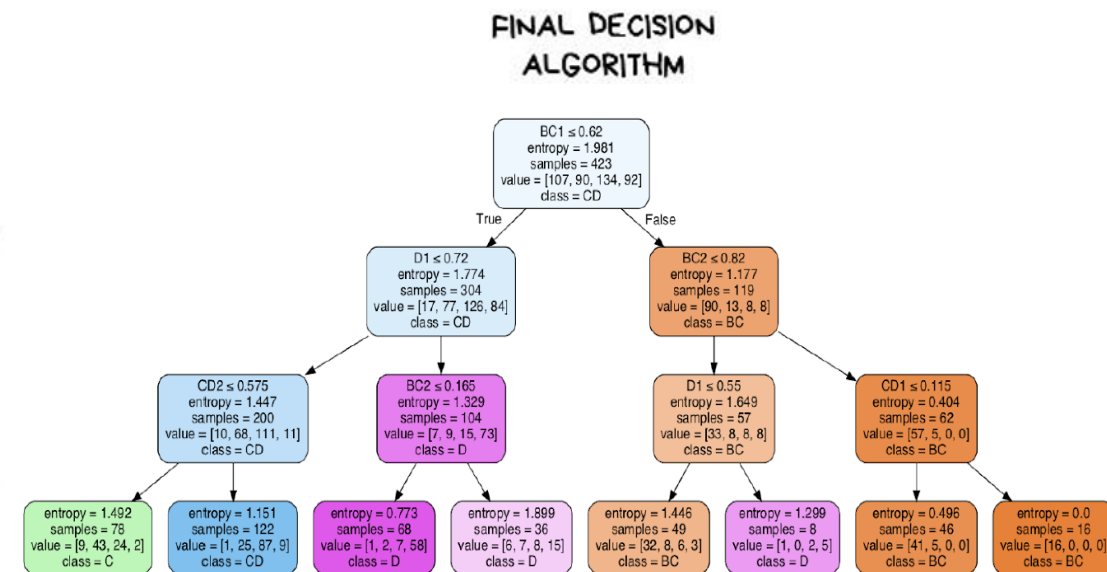
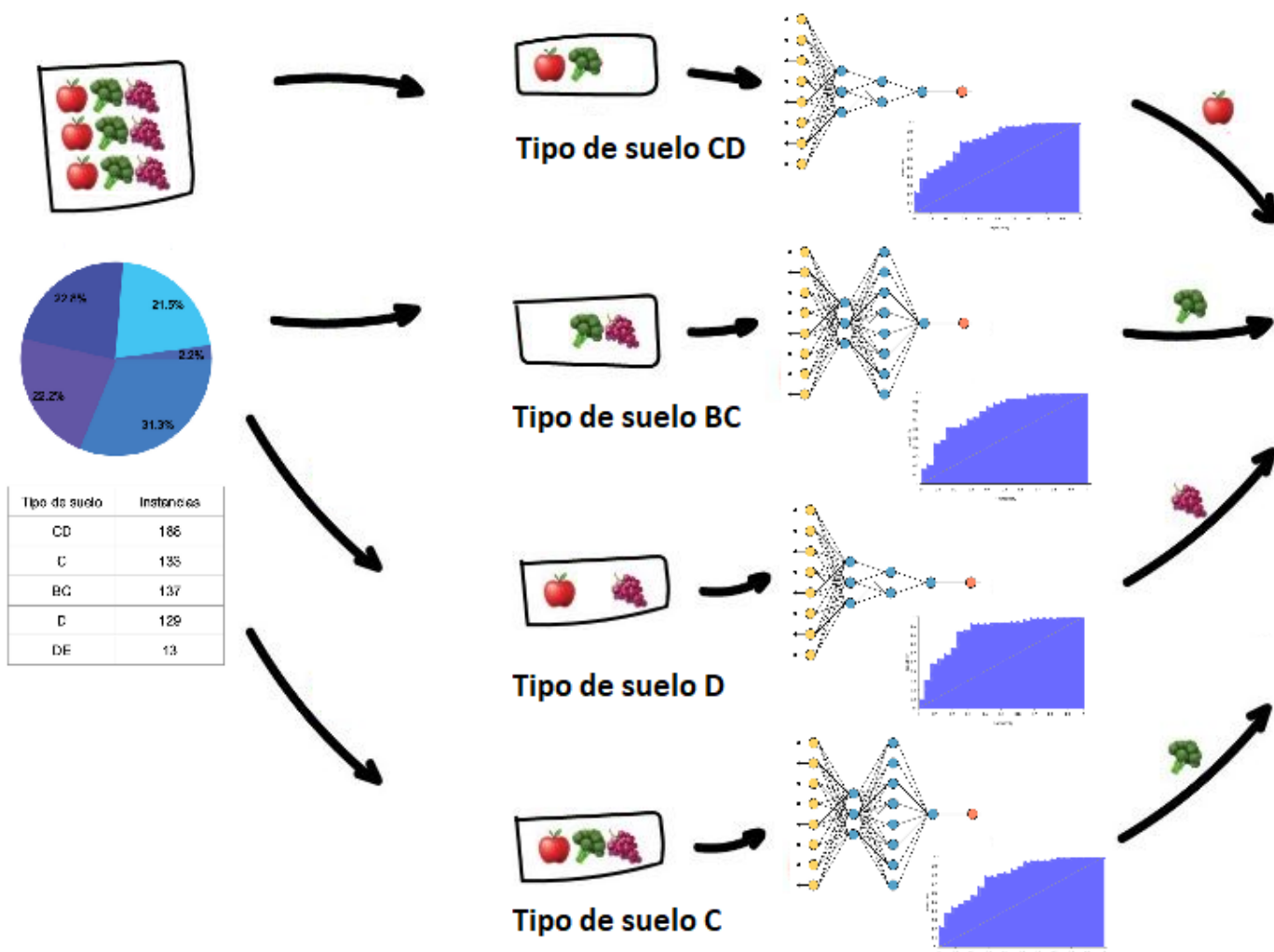


Figura 68. Método de ensamblaje de los sub-modelos que conforman el modelo RNA. Fuente: MARN 2020

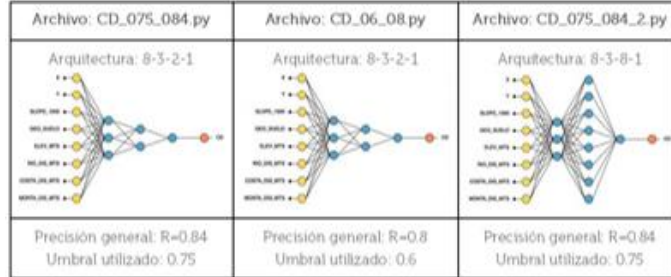
	Pred BC	Pred C	Pred CD	Pred D	Precisión
Real BC	121	20	1	7	81%
Real C	27	66	34	8	49%
Real CD	9	35	129	18	68%
Real D	3	7	13	107	82%
Sensibilidad	76%	52%	73%	76%	69.9%



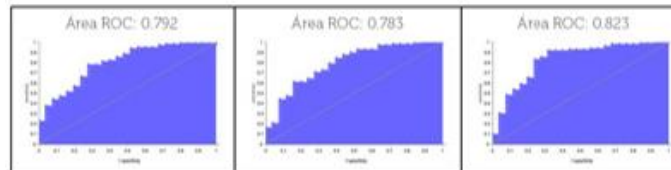
Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Aplicación de Machine Learning para generar mapa

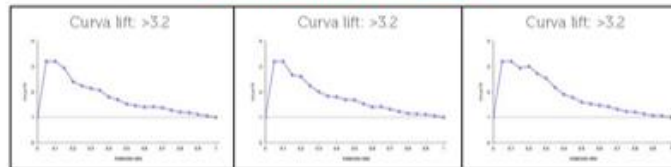
Construcción de redes neuronales y entrenamiento de datos



Generación de curvas ROC

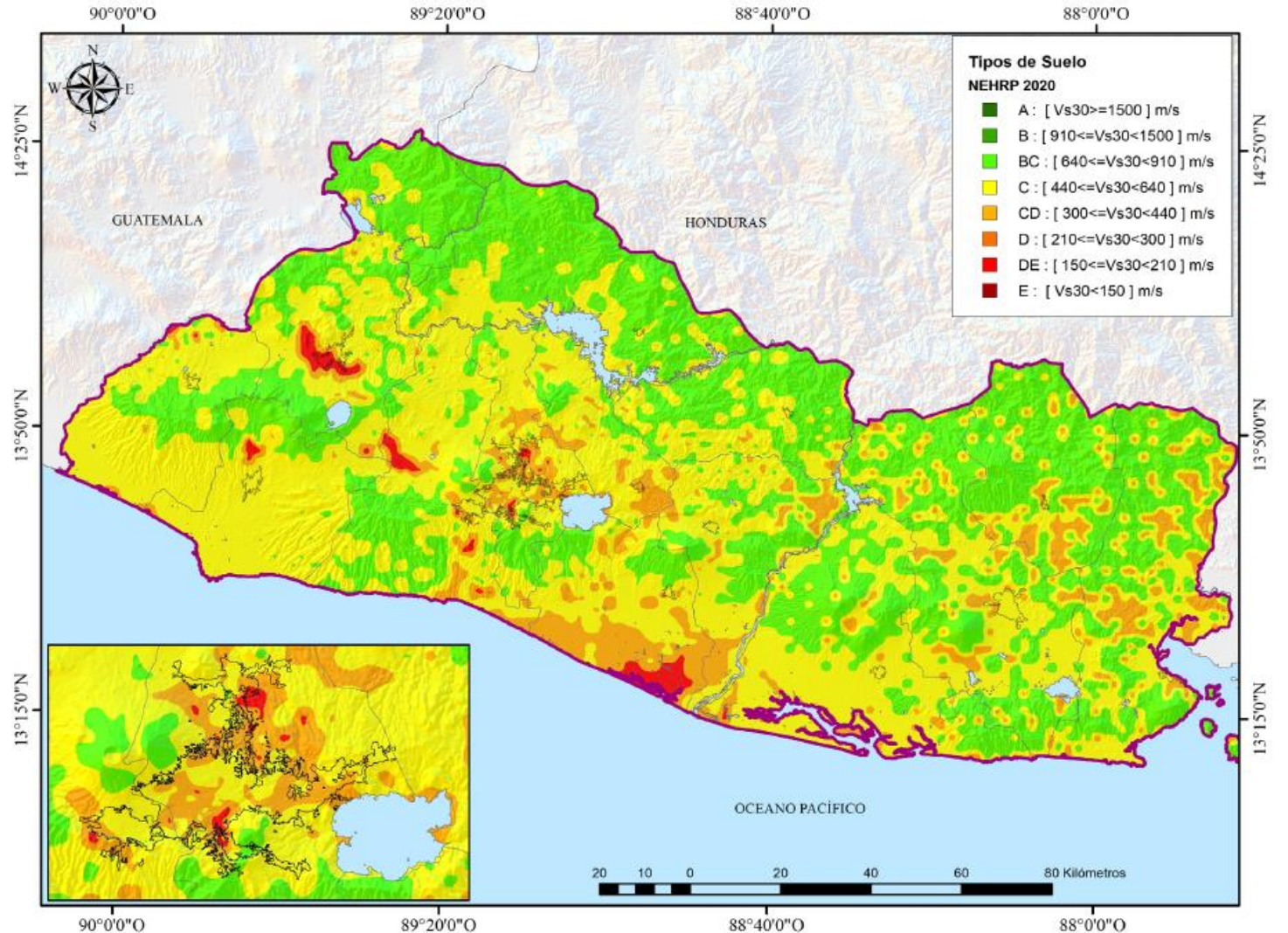


Generación de curvas Lift

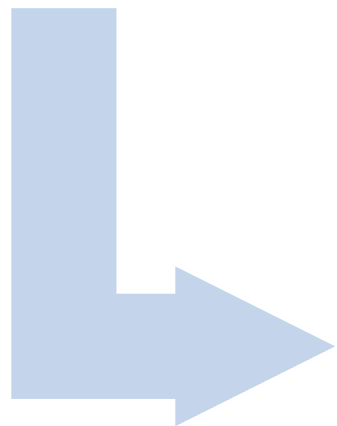


Matriz de confusión

	Pred BC	Pred C	Pred CD	Pred D	Precisión
Real BC	121	20	1	7	81%
Real C	27	66	34	8	49%
Real CD	9	35	129	18	68%
Real D	3	7	13	107	82%
Sensibilidad	76%	52%	73%	76%	69.9%



Mapa de zonificación sísmica “homogénea”



Aplicación de Machine Learning
para generar mapa

Resultado final de ensamble de
2 sub-modelos

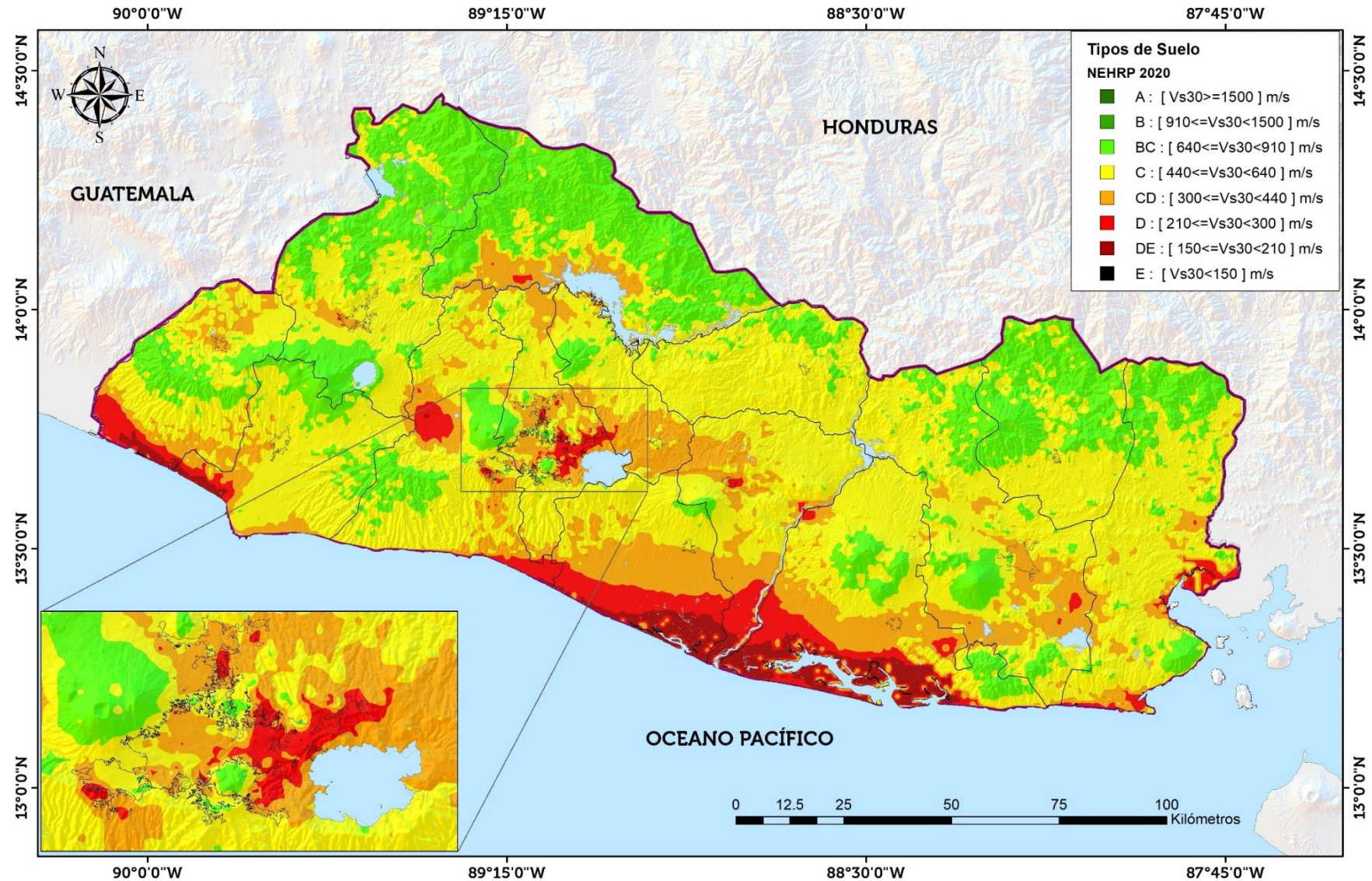


Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Aplicación de Machine Learning para generar mapa

Resultado final
de mapa de
Vs30 después
de aplicar
algoritmo de
ensamblaje

Interpolación con
resolución de 5 km

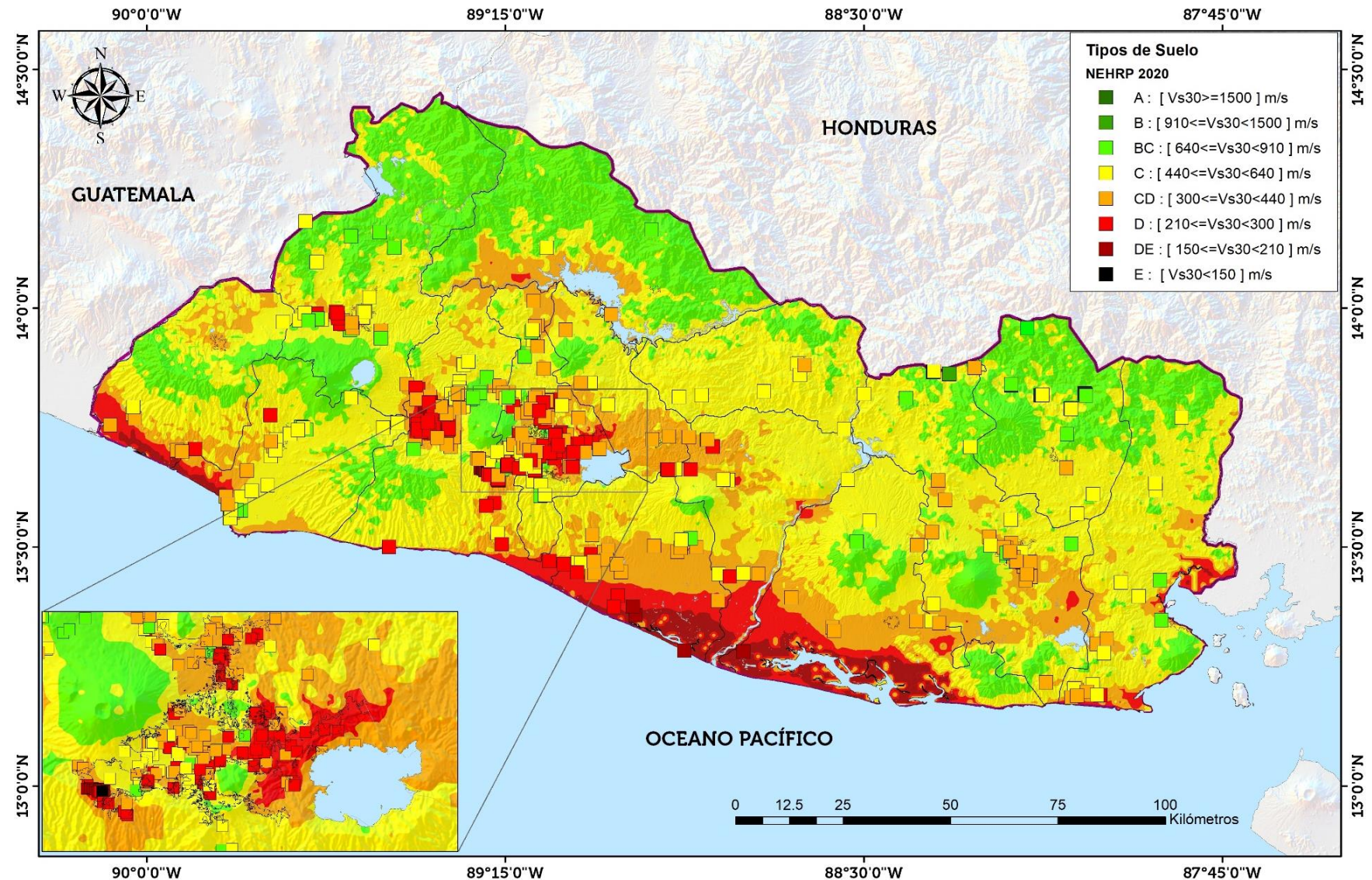


Mapa de zonificación sísmica “homogénea”

Aplicación de Machine Learning para generar mapa

Resultado final
de mapa de
Vs30 después
de aplicar
algoritmo de
ensamblaje,
con data
utilizada

Interpolación con
resolución de 5 km



Contenido general

1. Justificación de trabajo
2. Amplificación del sitio
3. Antecedentes y estudios realizados a nivel nacional
4. Metodología empleada para caracterización
5. Mapa de zonificación sísmica "homogénea", en términos de V_s30
6. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Empíricos.
7. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Analíticos.
8. Factores de amplificación
9. Conclusiones



Efecto de sitio: Métodos empíricos

Métodos existentes para estimación de amplificaciones

Existen dos métodos para la estimación de la amplificación de sitio:

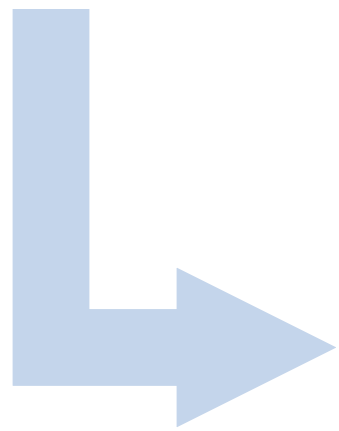
Métodos empíricos

Utilizando **señales de registros acelerográficos**, situados tanto en lugares con suelos poco consolidados como en suelos competentes; tomando de base el mapa de Vs30.

Métodos analíticos

Son modelaciones numéricas más complejas ya que se necesita información más precisa del comportamiento dinámico de una columna de suelo.

Efecto de sitio: Métodos empíricos



Objetivo general y específico



Efecto de sitio: Métodos empíricos

Objetivo general y específico

OBJETIVO GENERAL



Obtención de **funciones de transferencias empíricas** para cada una de las estaciones acelerográficas



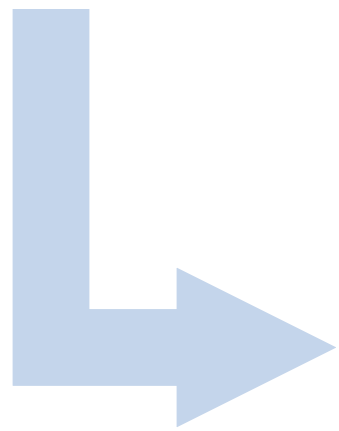
Sometidas a diferentes terremotos con niveles de intensidad sísmica en roca específicos

OBJETIVO ESPECÍFICO



Caracterizar cada una de las estaciones acelerográficas y **la respuesta dinámica** que presenta el subsuelo donde se encuentran emplazadas, **identificando cambios en los períodos predominantes.**

Efecto de sitio: Métodos empíricos

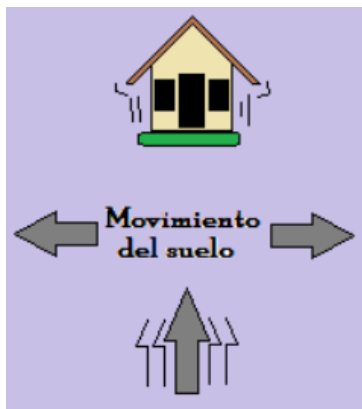


Suposiciones en análisis

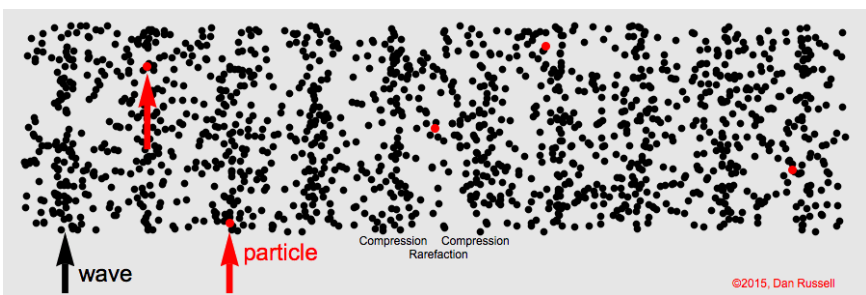


Efecto de sitio: Métodos empíricos

Suposiciones en análisis



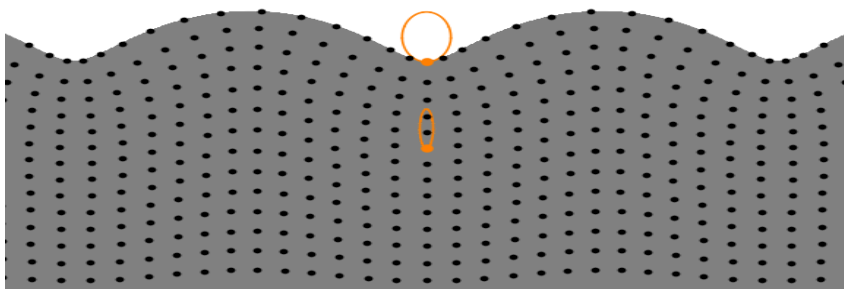
- Se considera **únicamente el movimiento horizontal** asociado a la consideración que las capas del subsuelo son horizontales. **Propagación vertical de ondas SH** (Ley de Snell)



Fuente: Russel, D, 2016

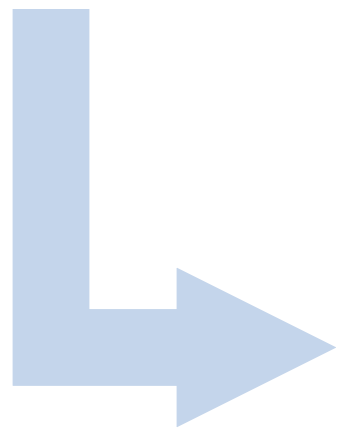
©2016, Dan Russell

- Los contrastes de velocidades de las ondas P, se **asumen que son muy pequeños**. Ya que podrían incrementar amplificación en componente vertical. Asumiendo que dicha componente solo posee la contribución de la fuente y el trayecto.

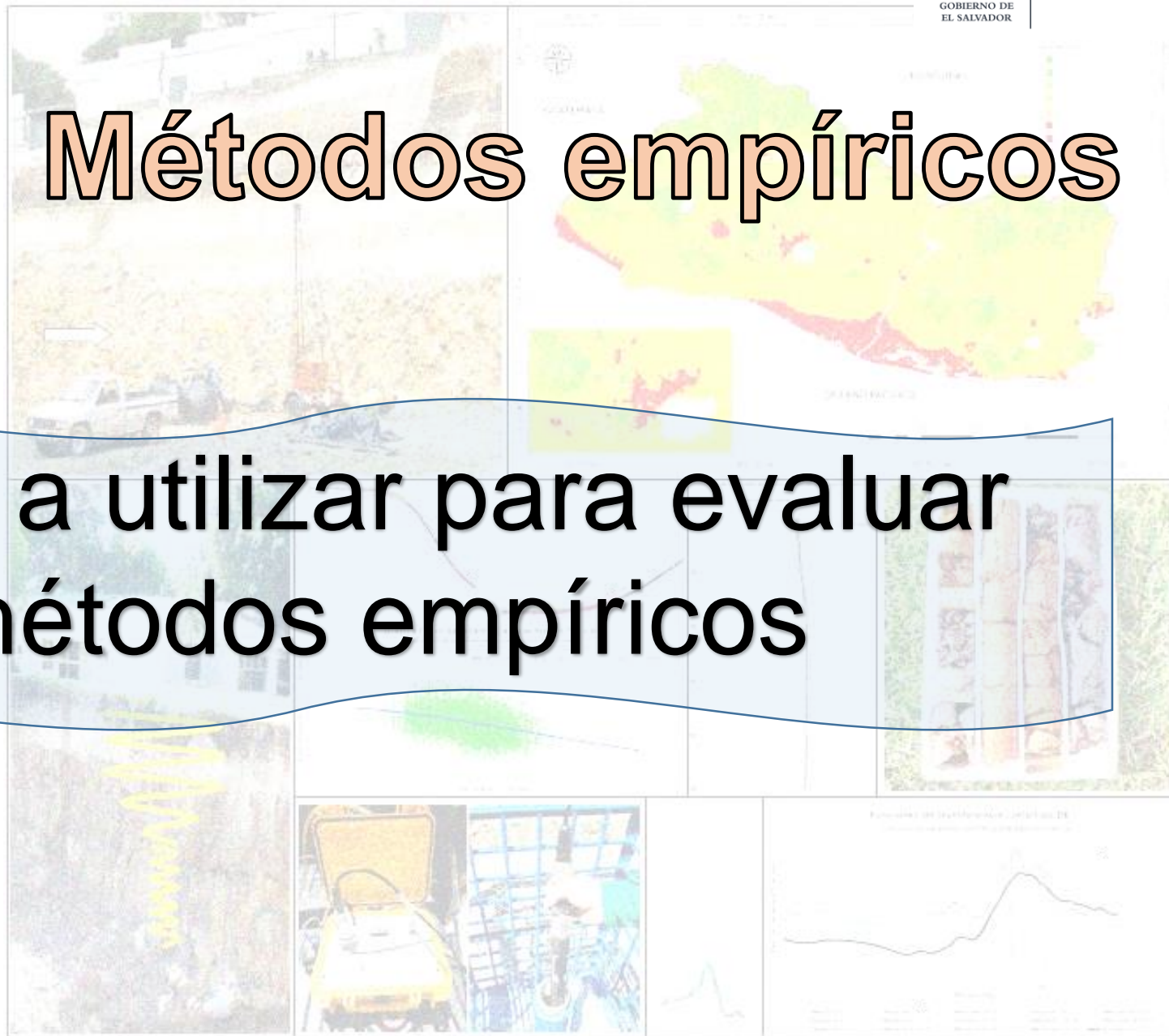


- El **efecto de atrapamiento de ondas Rayleigh** en las capas superficiales, se asume que es igual para la componente horizontal y vertical.

Efecto de sitio: Métodos empíricos



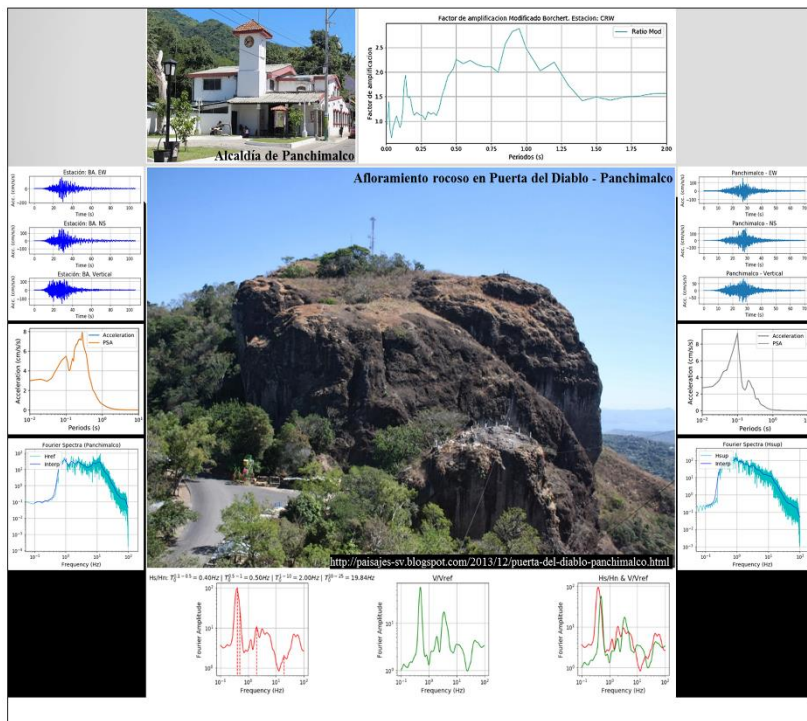
Técnicas a utilizar para evaluar
los métodos empíricos



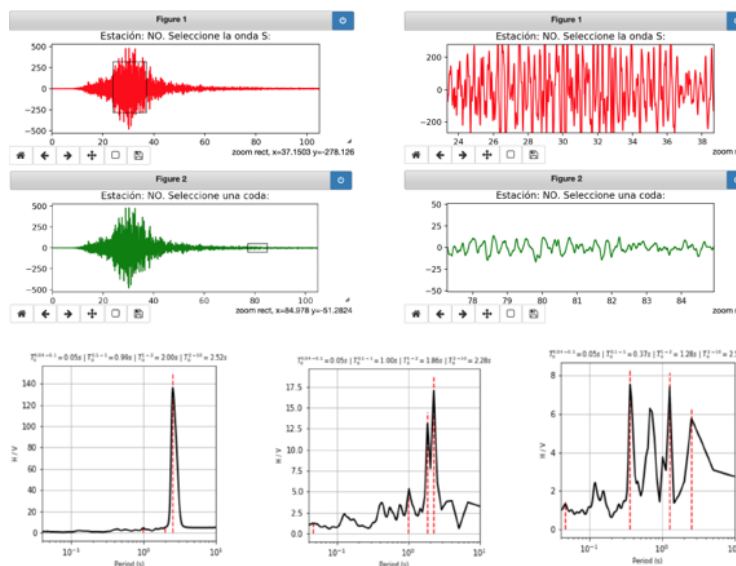
Efecto de sitio: Métodos empíricos

Técnicas a utilizar para evaluar los métodos empíricos

Técnica de Cocientes espectrales con respecto a un sitio de referencia- SSR – Hs/Hr – Borcherdt

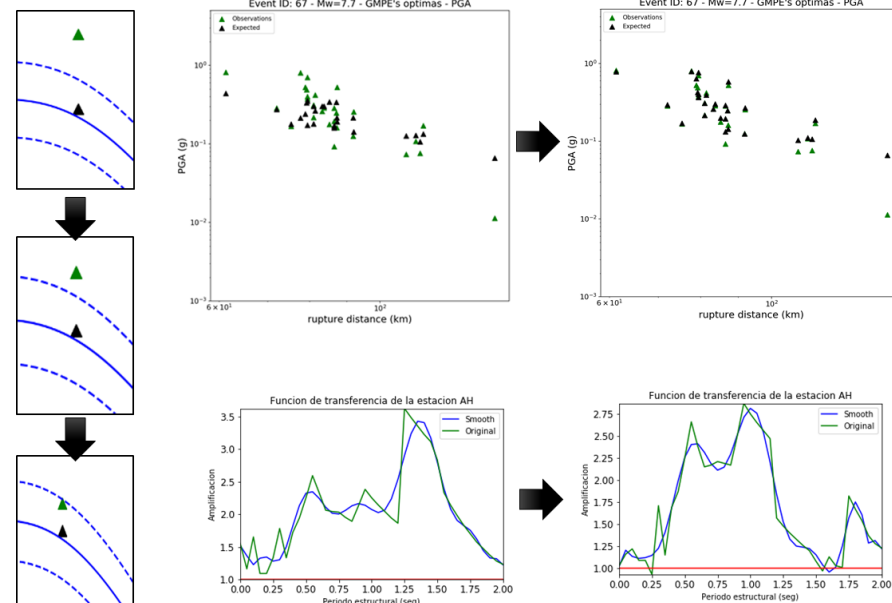


Técnica de Cocientes espectrales utilizando Nakamura (H/V) con registros acelerográficos - HVSR

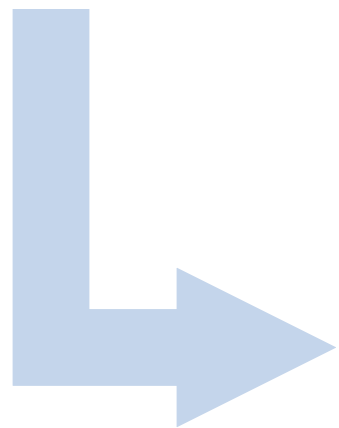


Periodos	Todo	Onda S	Coda
2s - 10s	Per = 2.521s H/V = 136.047	Per = 2.276s H/V = 17.035	Per = 2.56s H/V = 5.758
1s - 2s	Per = 2.0s H/V = 5.264	Per = 1.862s H/V = 13.079	Per = 1.28s H/V = 7.414
0.1s - 1s	Per = 0.993s H/V = 4.556	Per = 1.0s H/V = 4.776	Per = 0.366s H/V = 7.534
0.04s-0.1s	Per = 0.046s H/V = 1.302	Per = 0.047s H/V = 1.225	Per = 0.047s H/V = 1.308

Técnica de Selección óptima de Modelos de Atenuación y posterior deconvolución



Efecto de sitio: Métodos empíricos

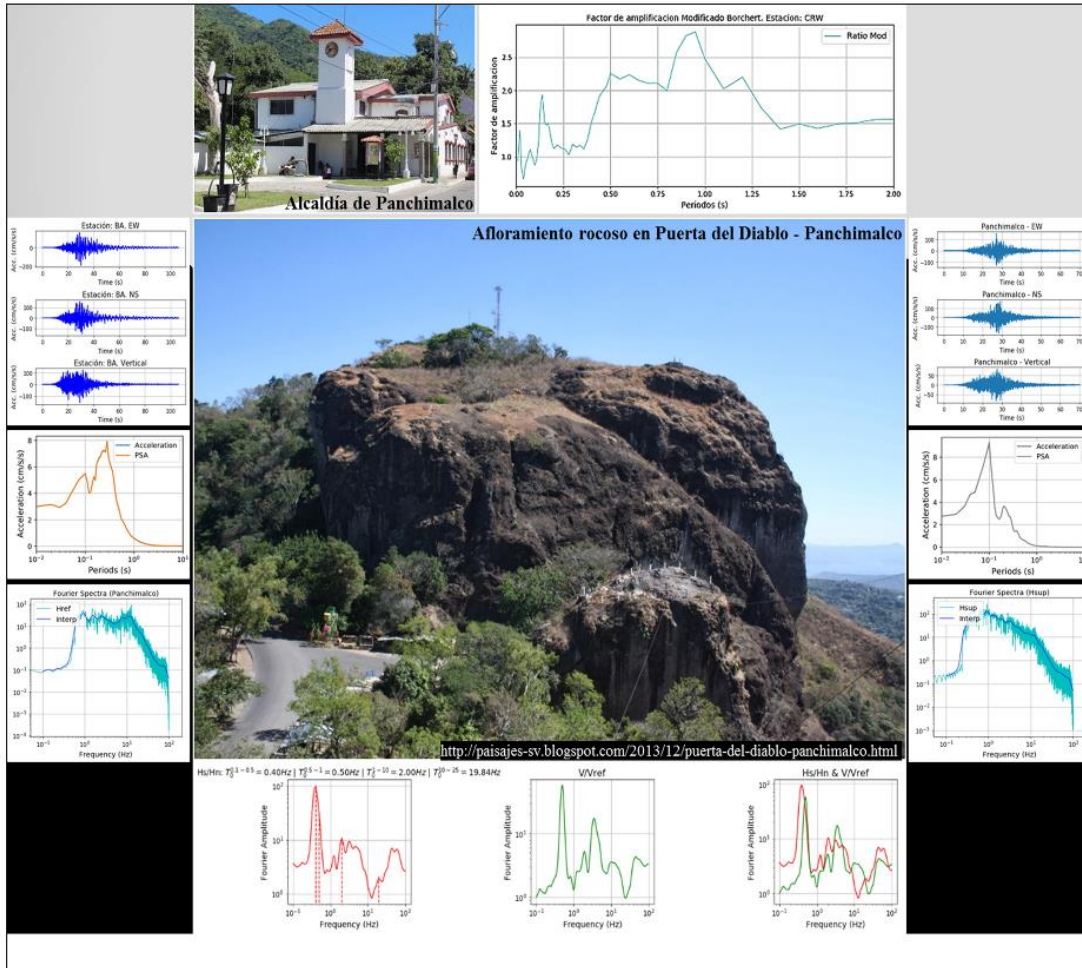


Técnica de cocientes espectrales
[Borcherdt]



Efecto de sitio: Métodos empíricos

Técnica de cocientes espectrales: Concepto



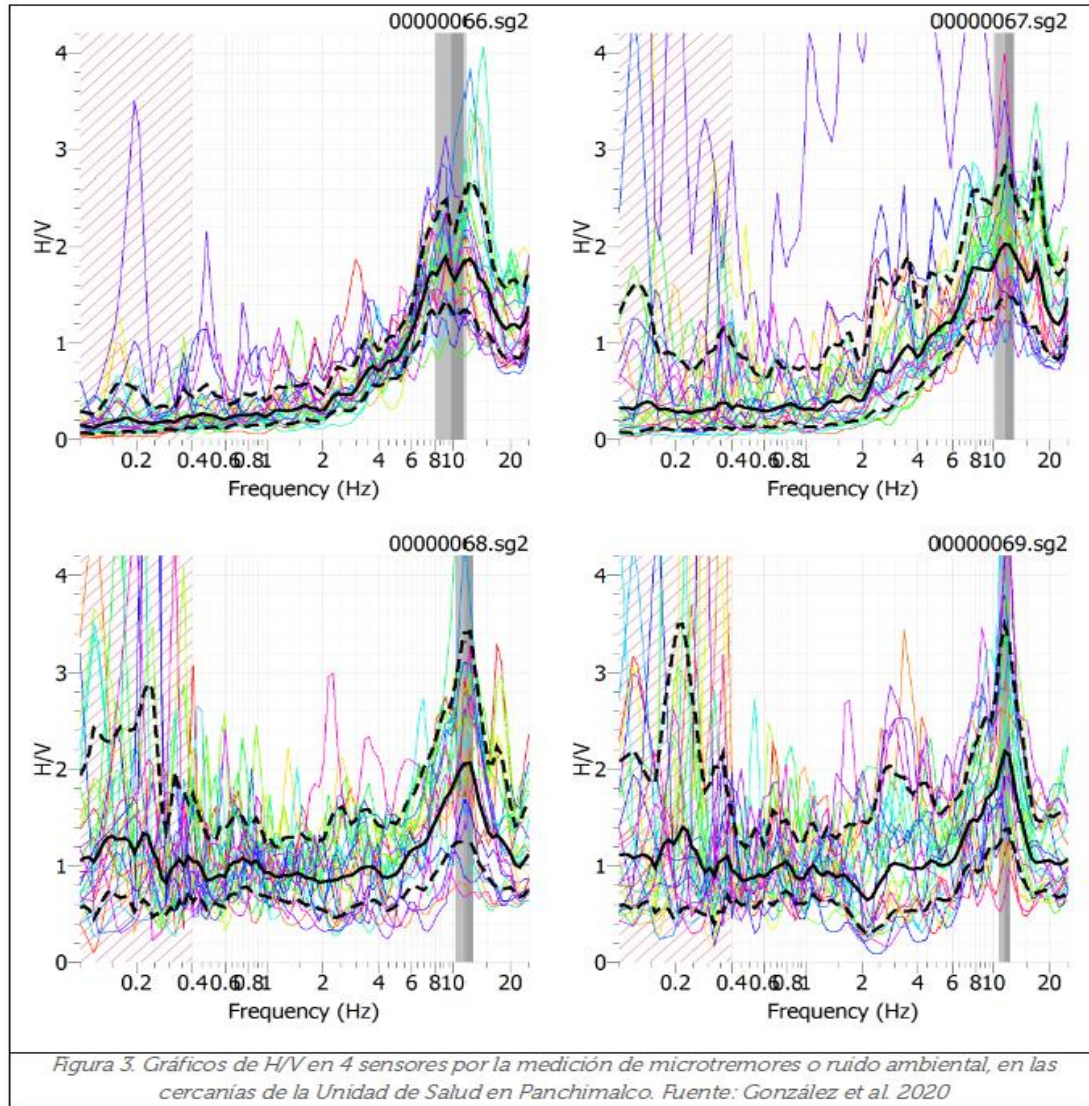
- Analizar **registros sísmicos** de dos estaciones para un mismo evento, **una de interés y otra de referencia** (la que se ha comprobado que se encuentra suelo firme o roca).

- **La fuente y trayecto son idénticos para ambos registros** ya que provienen de la misma fuente y las distancias hipocentrales son mayores que la profundidad de un estrato rocosos.

- Para los eventos de **carácter cortical el trayecto** pudiese afectar los registros.

Efecto de sitio: Métodos empíricos

Técnica de cocientes espectrales: Sitio de referencia



- Estación de referencia:
Panchimalco

- Medición de ruido sísmico H/V en estación de Panchimalco

$$f_0 = 12 \text{ Hz}$$
$$t_0 = 0.0833 \text{ seg}$$

Efecto de sitio: Métodos empíricos

Técnica de cocientes espectrales: Identificación de períodos

Evento Sísmico: 13 de enero de 2001 Mw 7.7

Periodos	Hs/Hn - Estacion: EX
2s - 10s	Per = 2.67s
1s - 2s	Per = 2.0s
0.1s - 1s	Per = 0.51s
0.04s-0.1s	Per = 0.06s

PGA = 0.29 g
Amplificación Relativa = 200, 20, 4, 0.81

Confiable

No Confiable

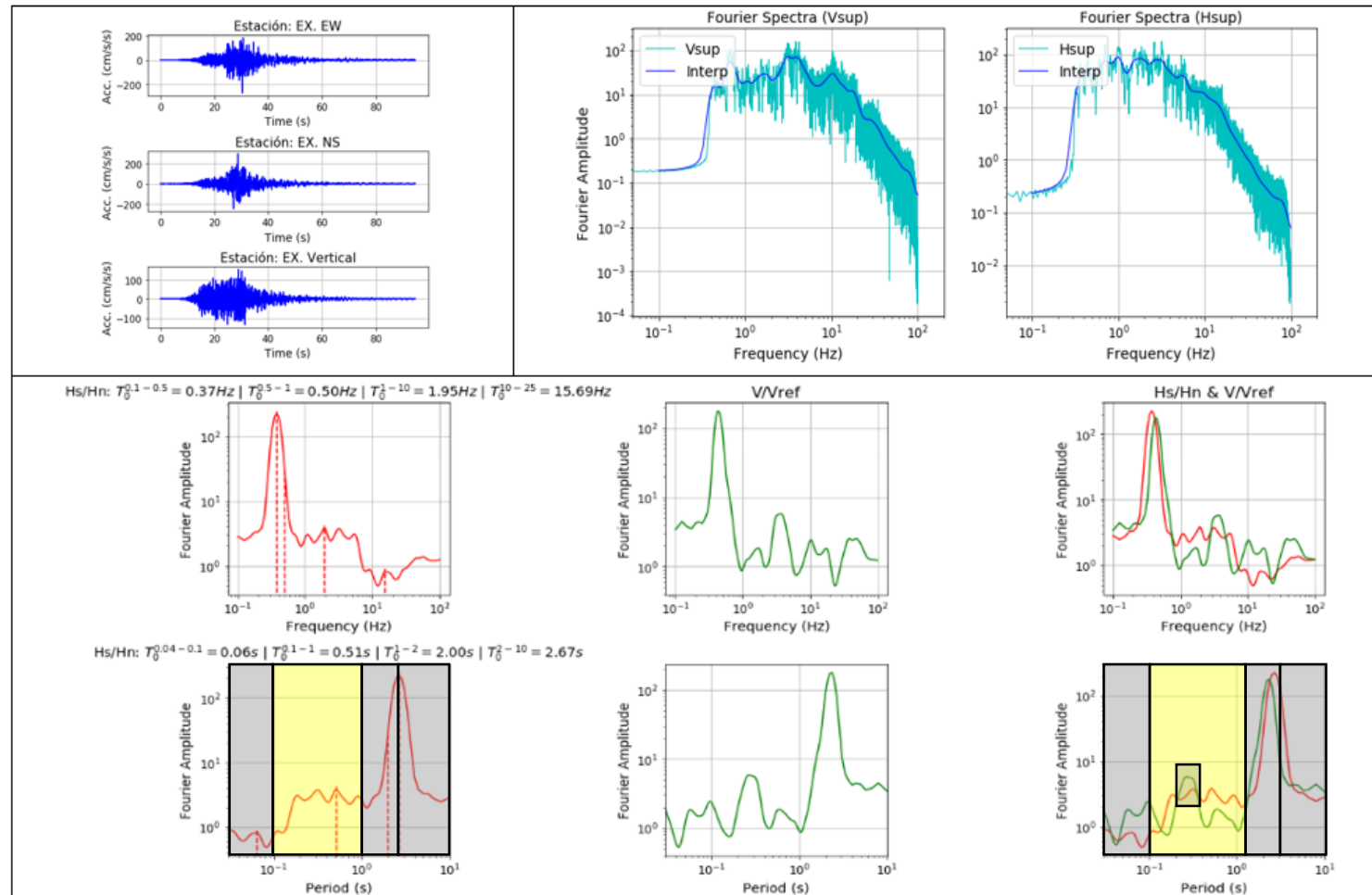
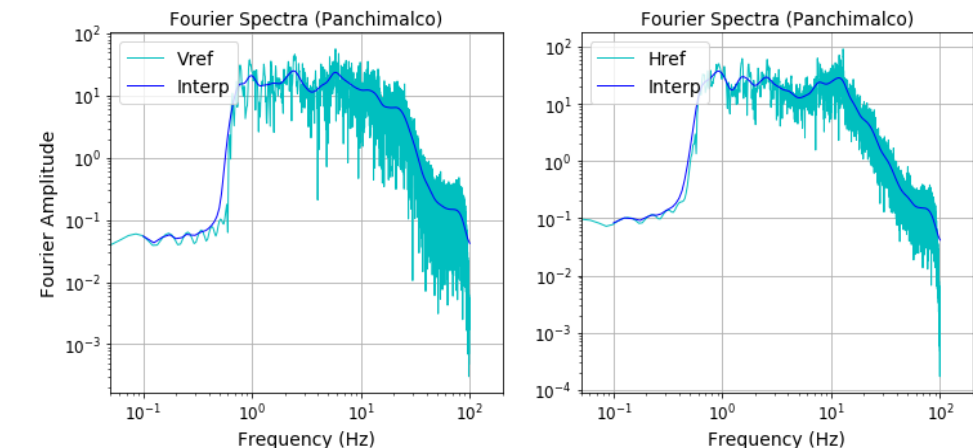
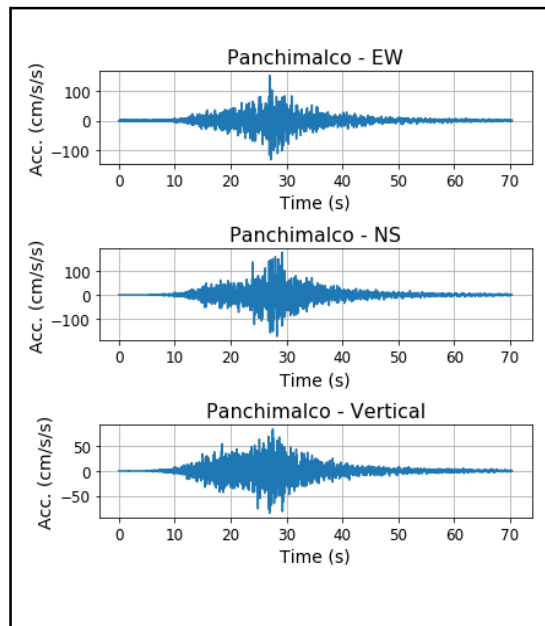


Figura 44. Registros acelerográficos, Espectros de Fourier y cocientes espectrales de estación Externado San José.



Efecto de sitio: Métodos empíricos

Técnica de cocientes espectrales: Factores de amplificación

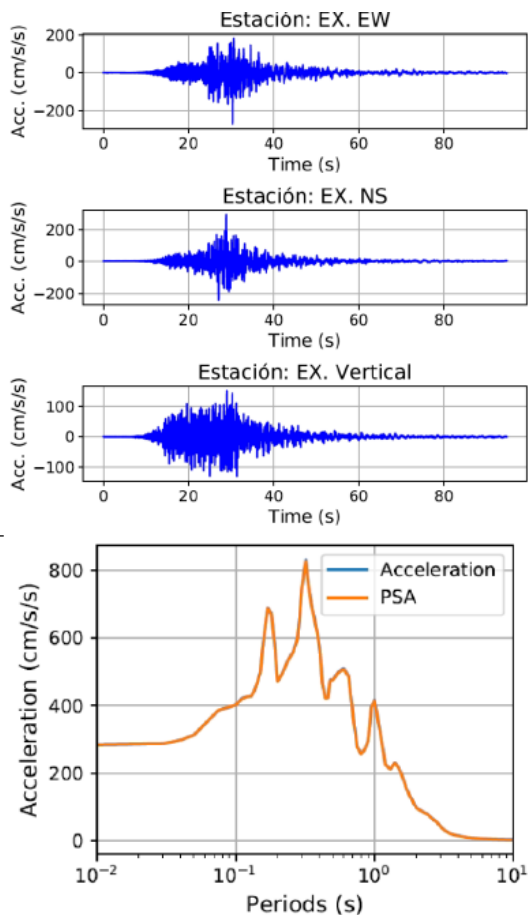


Figura 12. Registros acelerográficos y espectro de respuesta de aceleración de estación Externado San José. Fuente: MARN

$$F_a = \frac{\text{Aceleración espectral}_{\text{suelo}}}{\text{Aceleración espectral}_{\text{Roca}} \times \left(\frac{\text{Distancia hipocentral}_{\text{suelo}}}{\text{Distancia hipocentral}_{\text{Roca}}} \right)}$$

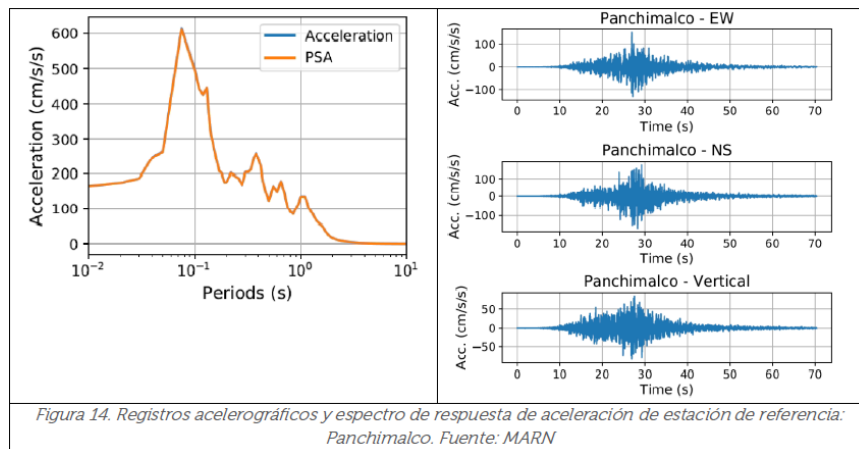
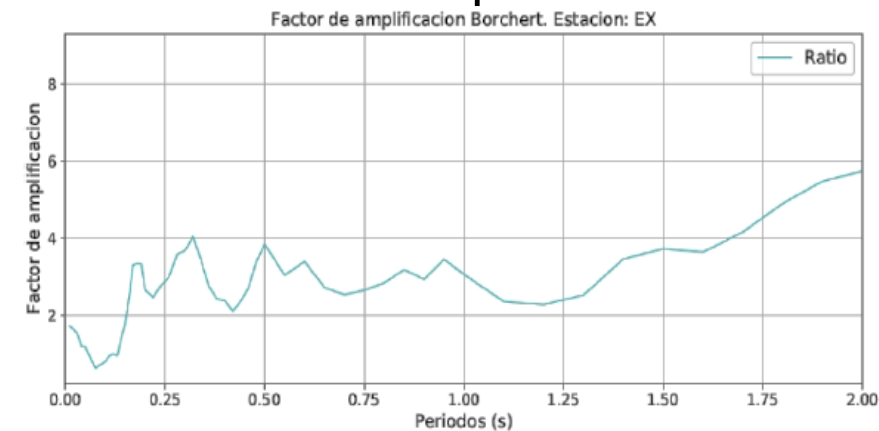
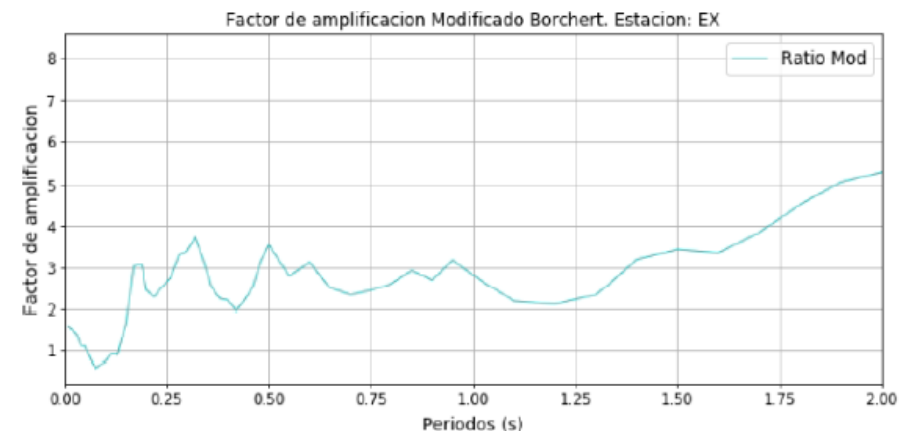


Figura 14. Registros acelerográficos y espectro de respuesta de aceleración de estación de referencia: Panchimalco. Fuente: MARN

Función de transferencia No Modificada por SSR de EX

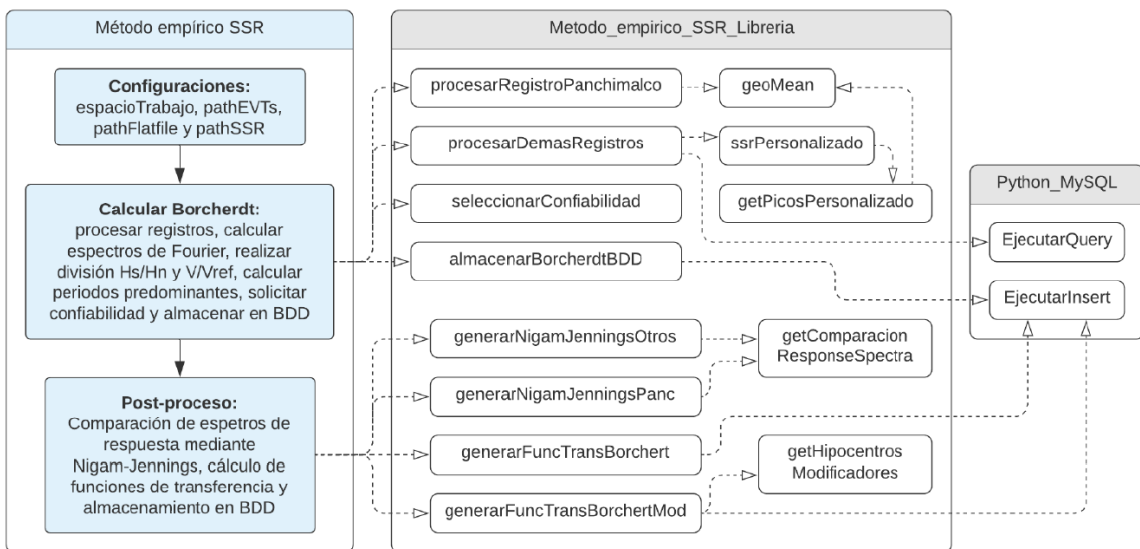


Función de transferencia Modificada por SSR de EX



Efecto de sitio: Métodos empíricos

Sistematización de técnica de cocientes espectrales



```

-- Para la estación: NO --
¿Considera el valor del periodo 0.04s-0.1s confiable? (1=SI, 0=NO)
1
¿Considera el valor del periodo 0.1s - 1s confiable? (1=SI, 0=NO)
1
¿Considera el valor del periodo 1s - 2s confiable? (1=SI, 0=NO)
1
¿Considera el valor del periodo 2s - 10s confiable? (1=SI, 0=NO)
1
  
```

id	id_reg_acc	per_004_01	con_004_01	per_01_1	con_01_1	per_1_2	con_1_2	per_2_10	con_2_10
11	6976	2.501	0	2.000	0	0.500	1	0.050	0
12	6980	2.354	1	2.000	1	0.817	1	0.100	0
13	6976	2.501	1	2.000	1	0.500	1	0.050	1
14	6980	2.354	0	2.000	0	0.817	0	0.100	0
15	6976	2.501	0	2.000	0	0.500	0	0.050	0
16	6980	2.354	0	2.000	0	0.817	0	0.100	0

Figura 11. Ejemplo de registro en base de datos de Periodos predominantes por SSR. Fuente: MARN

id	id_reg_acc	tipo	periodo	factor
1755	6976	factorAmplBorchert	0.01	3.1358
1756	6976	factorAmplBorchert	0.02	3.1812
1757	6976	factorAmplBorchert	0.03	3.6699
1758	6976	factorAmplBorchert	0.04	2.7485
1759	6976	factorAmplBorchert	0.05	2.3231
1760	6976	factorAmplBorchert	0.08	1.2342
1761	6976	factorAmplBorchert	0.10	1.8626
1762	6976	factorAmplBorchert	0.11	2.4048
1763	6976	factorAmplBorchert	0.12	2.6115
1764	6976	factorAmplBorchert	0.13	2.7836
1765	6976	factorAmplBorchert	0.14	3.4861

id	id_reg_acc	tipo	periodo	factor
1909	6976	factorAmplBorchertMod	0.01	3.6029
1910	6976	factorAmplBorchertMod	0.02	3.6550
1911	6976	factorAmplBorchertMod	0.03	4.2164
1912	6976	factorAmplBorchertMod	0.04	3.1579
1913	6976	factorAmplBorchertMod	0.05	2.6691
1914	6976	factorAmplBorchertMod	0.08	1.4180
1915	6976	factorAmplBorchertMod	0.10	2.1400
1916	6976	factorAmplBorchertMod	0.11	2.7630
1917	6976	factorAmplBorchertMod	0.12	3.0004
1918	6976	factorAmplBorchertMod	0.13	3.1982
1919	6976	factorAmplBorchertMod	0.14	4.0054
1920	6976	factorAmplBorchertMod	0.15	5.0878

Figura 19. Ejemplo de registro en base de datos de Factores de amplificación por SSR, tanto los No modificados como los Modificados. Fuente: MARN

Efecto de sitio: Métodos empíricos

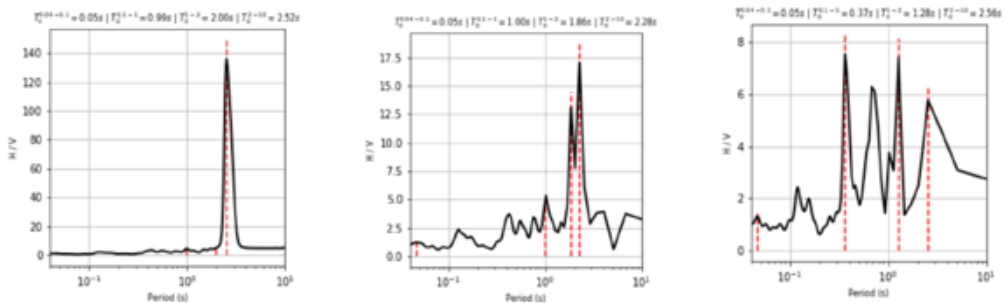
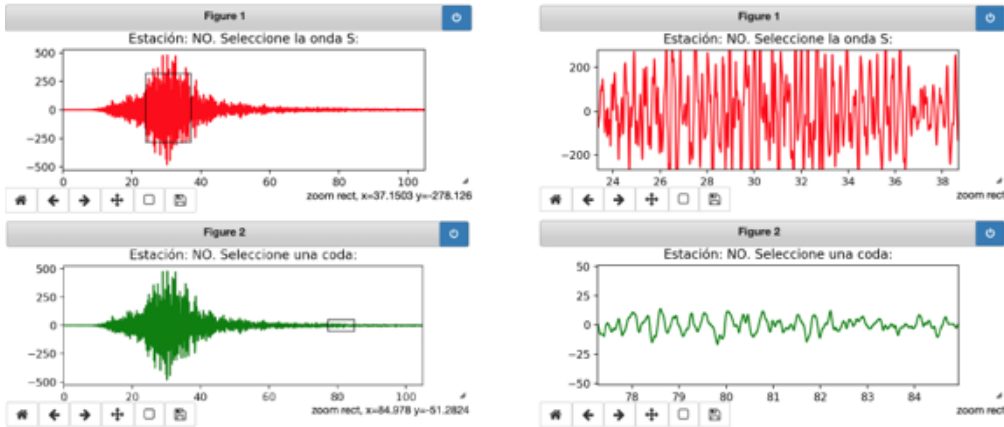


Técnica de Nakamura usando
registros acelerográficos (HVSR)



Efecto de sitio: Métodos empíricos

Técnica de Nakamura usando registros acelerográficos (HVSr)



Periodos	Todo	Onda S	Coda
2s - 10s	Per = 2.521s H/V = 136.047	Per = 2.276s H/V = 17.035	Per = 2.56s H/V = 5.758
1s - 2s	Per = 2.0s H/V = 5.264	Per = 1.862s H/V = 13.079	Per = 1.28s H/V = 7.414
0.1s - 1s	Per = 0.993s H/V = 4.556	Per = 1.0s H/V = 4.776	Per = 0.366s H/V = 7.534
0.04s-0.1s	Per = 0.046s H/V = 1.302	Per = 0.047s H/V = 1.225	Per = 0.047s H/V = 1.308

- Calcular el período predominante del suelo.

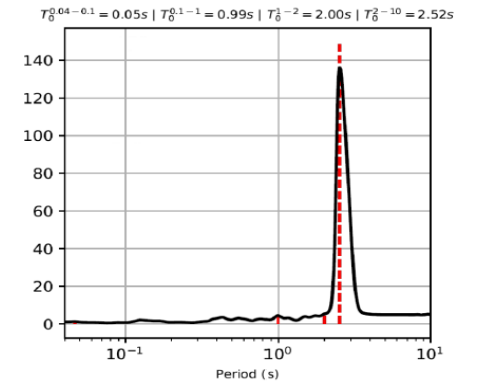
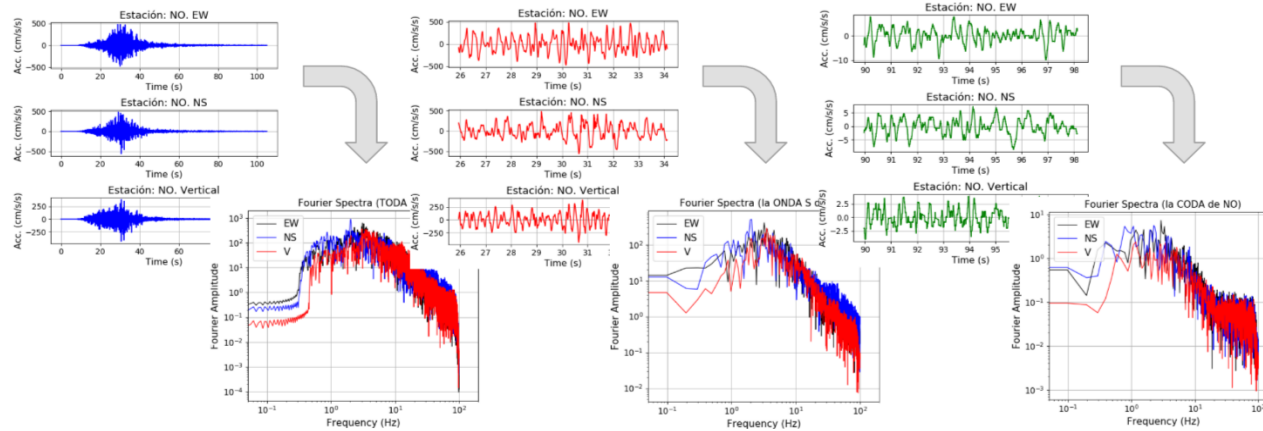
- Los cocientes espectrales de los componentes horizontal y vertical del basamento deben estar libres del efecto de las ondas Rayleigh

- El efecto de atrapamiento de ondas Rayleigh en las capas superficiales, se asume que es igual para ambas componentes (H y V)

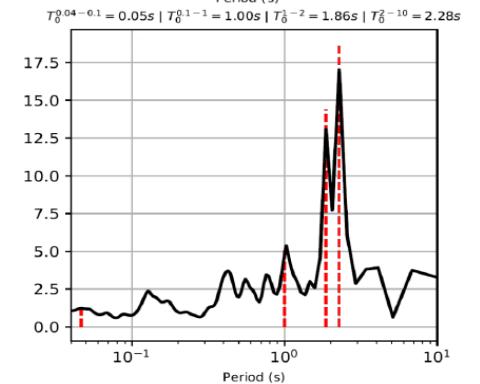
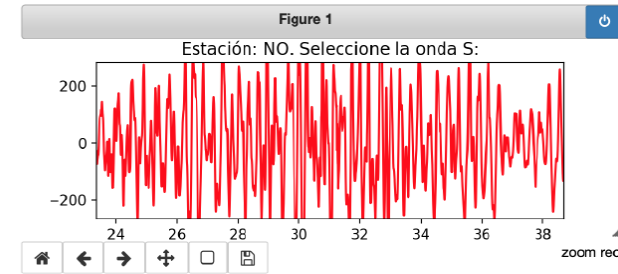
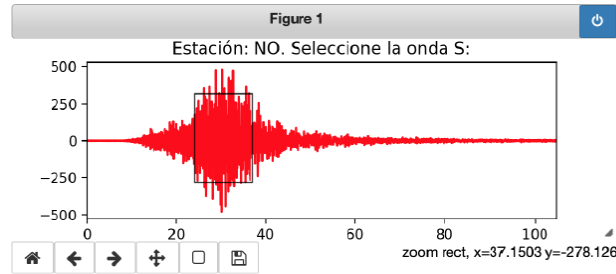
Efecto de sitio: Métodos empíricos

Técnica de Nakamura (HVSr): Identificación de períodos

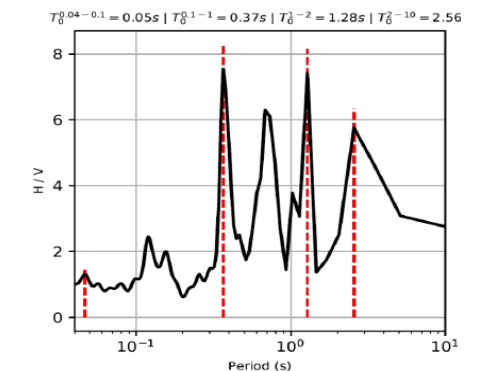
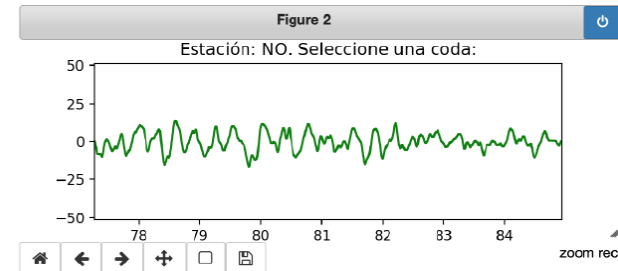
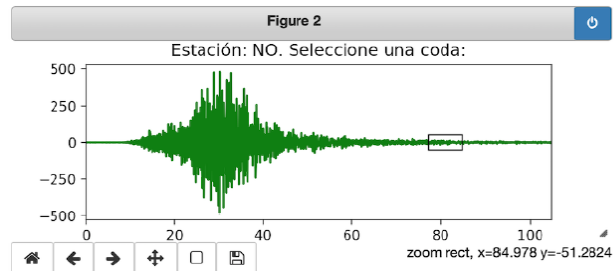
Utilizar Todo el Registro Acelerográfico



Selección de Parte intensa de Registro Acelerográfico

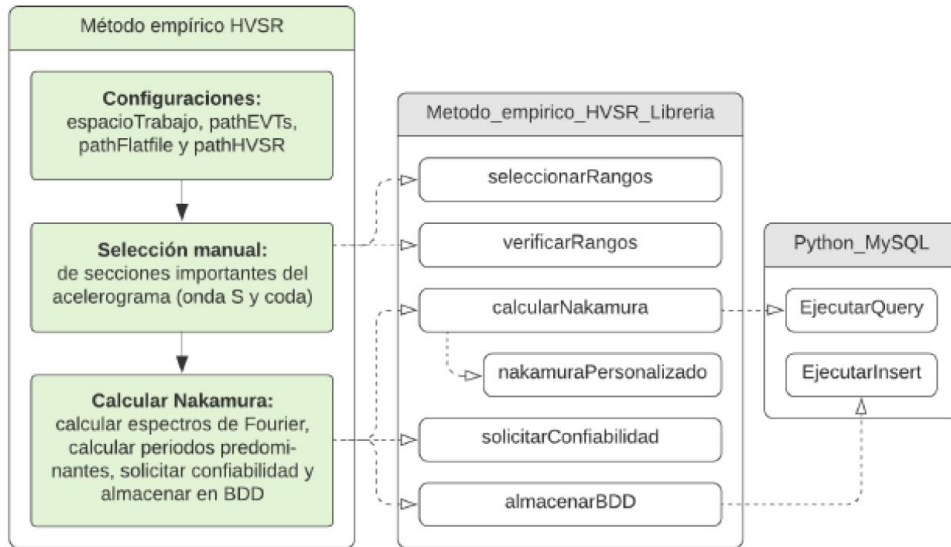


Selección de sección CODA de Registro Acelerográfico



Efecto de sitio: Métodos empíricos

Sistematización de técnica Nakamura (HVSR)



- No se tomaron en cuenta las amplificaciones relativas obtenidas de la técnica de Nakamura (HVSR), debido a que no se tiene control sobre una posible variación acentuada en el contraste de velocidades (impedancia) de las onda de cuerpo (P).

```

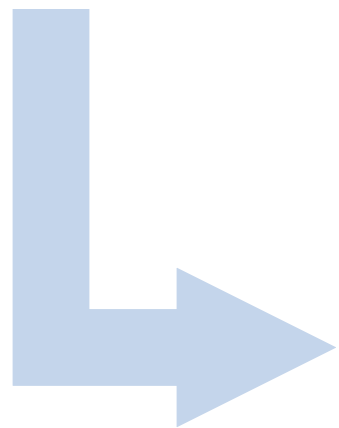
--- Para la estación: NO --- ONDA S ---
¿Considera los valores del periodo 0.04s-0.1s confiables? (1=SI, 0=NO)
0
¿Considera los valores del periodo 0.1s - 1s confiables? (1=SI, 0=NO)
0
¿Considera los valores del periodo 1s - 2s confiables? (1=SI, 0=NO)
0
¿Considera los valores del periodo 2s - 10s confiables? (1=SI, 0=NO)
0
    
```

Periodos	Todo	Onda S	Coda
2s - 10s	Per = 2.521s H/V = 136.047	Per = 2.276s H/V = 17.035	Per = 2.56s H/V = 5.758
1s - 2s	Per = 2.0s H/V = 5.264	Per = 1.862s H/V = 13.079	Per = 1.28s H/V = 7.414
0.1s - 1s	Per = 0.993s H/V = 4.556	Per = 1.0s H/V = 4.776	Per = 0.366s H/V = 7.534
0.04s-0.1s	Per = 0.046s H/V = 1.302	Per = 0.047s H/V = 1.225	Per = 0.047s H/V = 1.308

id	id_reg_acc	tipo	per_004_01	hv_004_01	con_004_01	per_01_1	hv_01_1	con_01_1	per_1_2	hv_1_2	con_1_2	per_2_10	hv_2_10	con_2_10
10	6976	todo	0.046	1.302	1	0.993	4.556	1	2.000	5.264	1	2.521	136.047	1
11	6976	ondaS	0.046	1.380	0	0.975	5.022	0	1.862	5.398	0	2.276	4.869	0
12	6976	coda	0.100	1.636	1	0.731	6.513	0	1.280	3.084	1	2.560	5.917	0
13	6980	todo	0.076	2.227	1	1.000	3.641	1	1.655	2031.679	1	2.074	1310.757	1
14	6980	ondaS	0.080	2.322	0	1.000	6.767	0	1.463	33.859	0	2.000	11.699	0
15	6980	coda	0.100	1.689	1	0.602	6.401	0	2.000	34.665	1	2.560	90.471	0
16	6977	todo	0.081	2.658	1	0.677	2.138	0	1.820	22.175	1	2.000	10.475	0
17	6977	ondaS	0.081	3.119	1	0.931	4.959	1	1.707	17.588	1	5.120	26.455	1
18	6977	coda	0.074	2.494	0	0.731	2.478	0	1.138	3.418	0	10.000	3.043	0
19	6976	todo	0.046	1.302	0	0.993	4.556	0	2.000	5.264	0	2.521	136.047	0
20	6976	ondaS	0.047	1.225	0	1.000	4.776	0	1.862	13.079	0	2.276	17.035	0
21	6976	coda	0.047	1.308	1	0.366	7.534	1	1.280	7.414	1	2.560	5.758	1

Figura 28. Ejemplo de registro en base de datos de Periodos predominantes por HVSR. Fuente: MARN

Efecto de sitio: Métodos empíricos

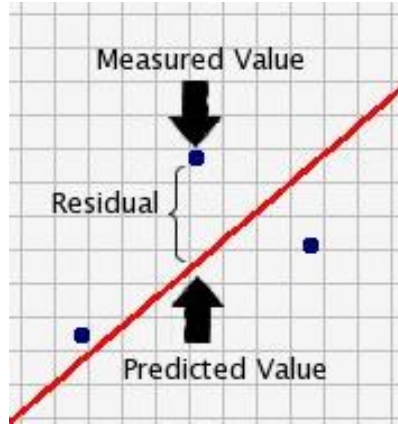


Técnica de Selección óptima de Modelos de Atenuación GMPEs

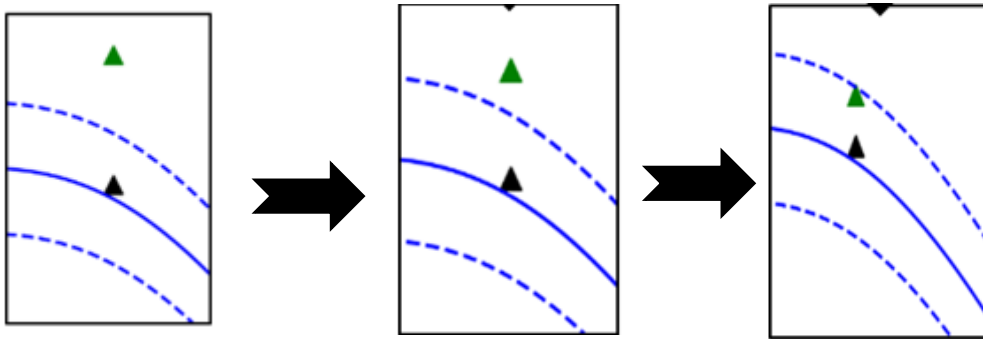


Efecto de sitio: Métodos empíricos

Técnica de Selección óptima de GMPEs: Definición



- Utiliza **análisis estadísticos y probabilísticos** que permitan la búsqueda en la **reducción de los residuales** que existen entre una **observación real** de movimiento fuerte con **la de una predicción**.



- Registros acelerográficos Reales
- Registros predichos (GMPE) con Vs30

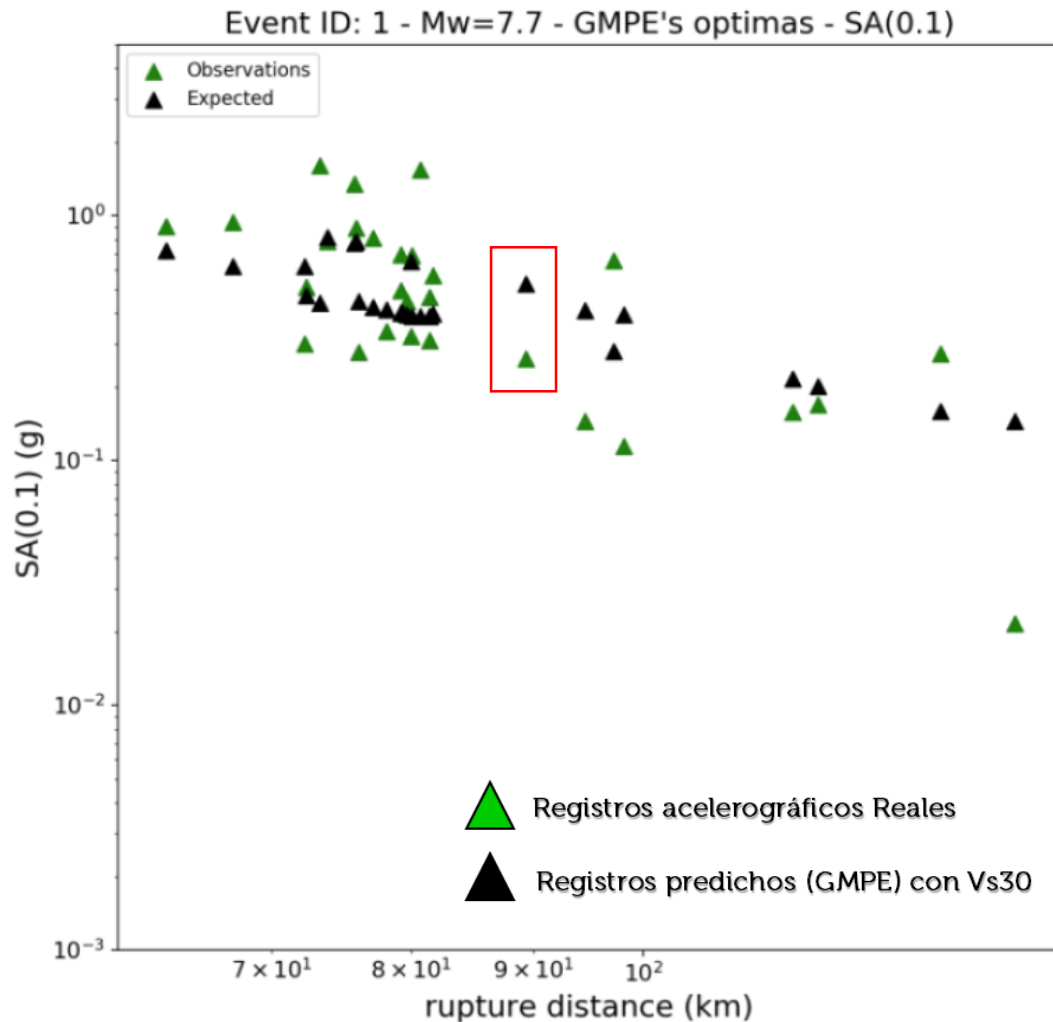
Media de Valores de GMPE con Vs30 = 760 m/s

- Se aplica un algoritmo iterativo estadístico y probabilístico de búsqueda para seleccionar los mejores GMPEs (**más de 350 en librería GEM-OpenQuake**) que se ajusten a los valores reales del evento.

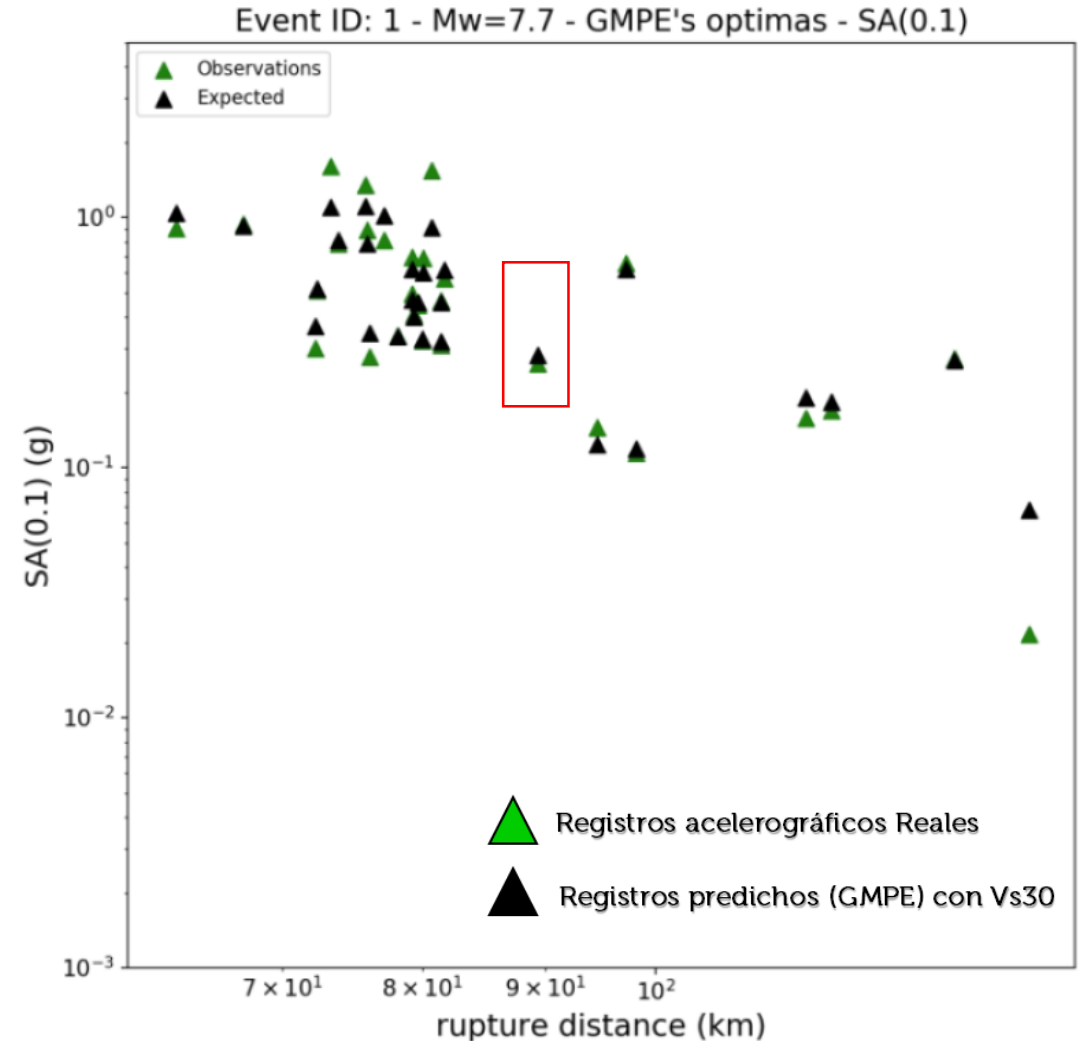
Efecto de sitio: Métodos empíricos

Técnica de Selección óptima de GMPEs: Procedimiento

Primer ajuste

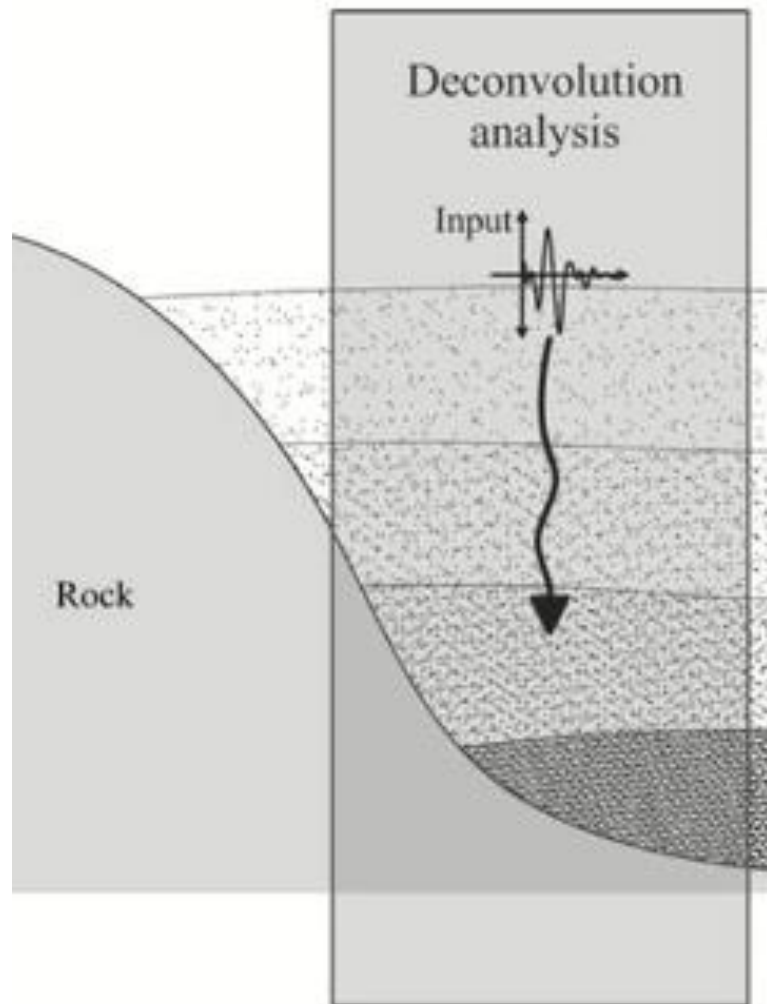


Ajuste final



Efecto de sitio: Métodos empíricos

Técnica de Selección óptima de GMPEs: Reducción de residuos



- Una vez identificados los GMPEs óptimos, **se realiza una nueva evaluación con dichas GMPEs** para una condición de suelo firme.

- Con este valor obtenido "hipotéticamente" registrado en roca se procede a estimar una **función de transferencia empírica**.

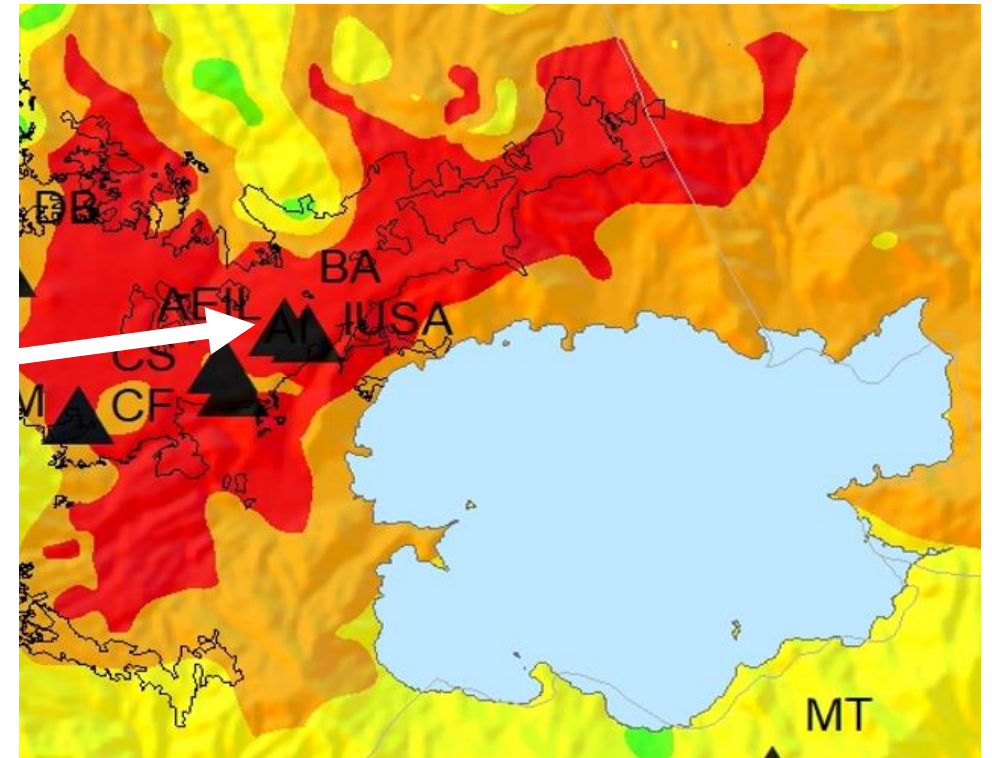
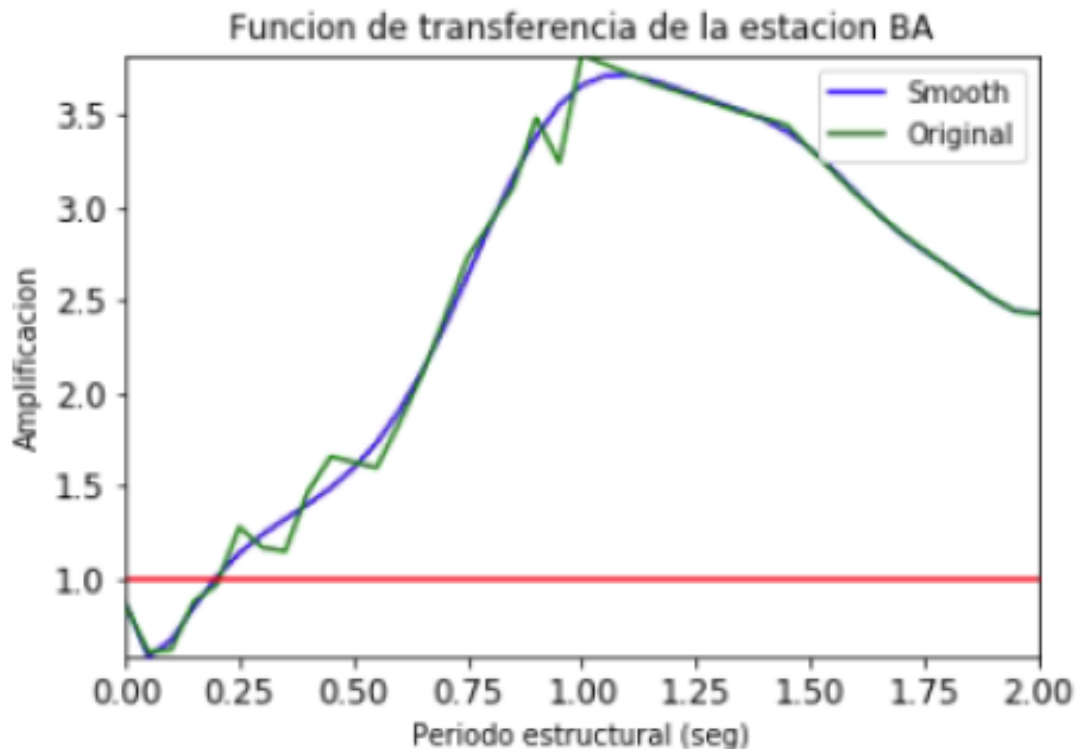
$$F_a = \frac{\text{Observado}_{\text{superficie}}}{\text{Predicho (GMPE)}_{\text{roca}} \times \left(\frac{\text{Observado}_{\text{superficie}}}{\text{Predicho (GMPE)}_{\text{superficie}}} \right)}$$

Efecto de sitio: Métodos empíricos

Técnica de Selección óptima de GMPEs: Cálculo de funciones

Estación de Unidad de Salud de San Bartolo emplazada sobre suelos blandos.

Congruente en la **amplificación de períodos largos**.
Al suscitarse este evento de Mw 7.7. SA (1.0 s) = 487 cm/s²



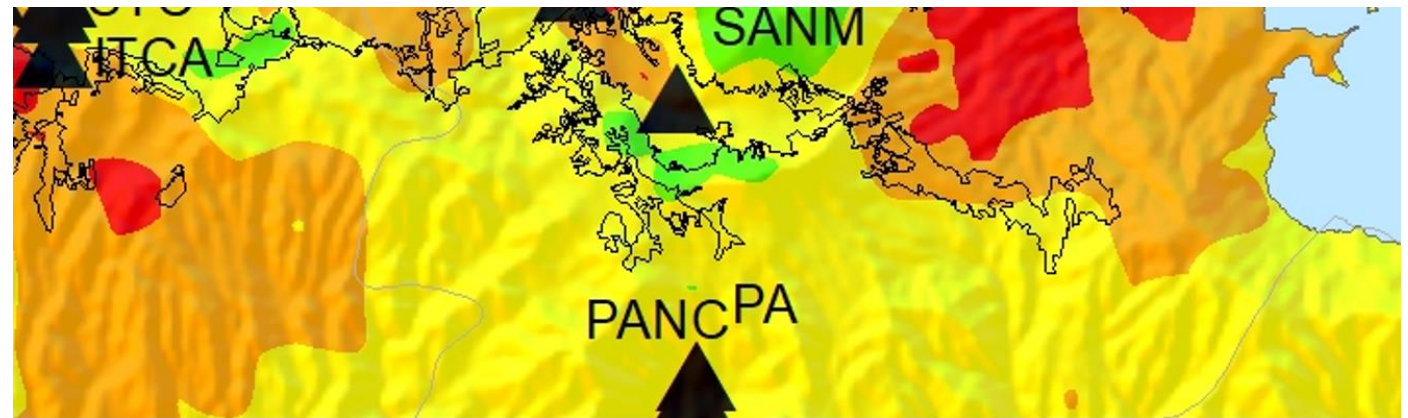
Efecto de sitio: Métodos empíricos

Técnica de Selección óptima de GMPEs: Cálculo de funciones

Estación de U. de Salud de Panchimalco emplazada sobre suelos competentes

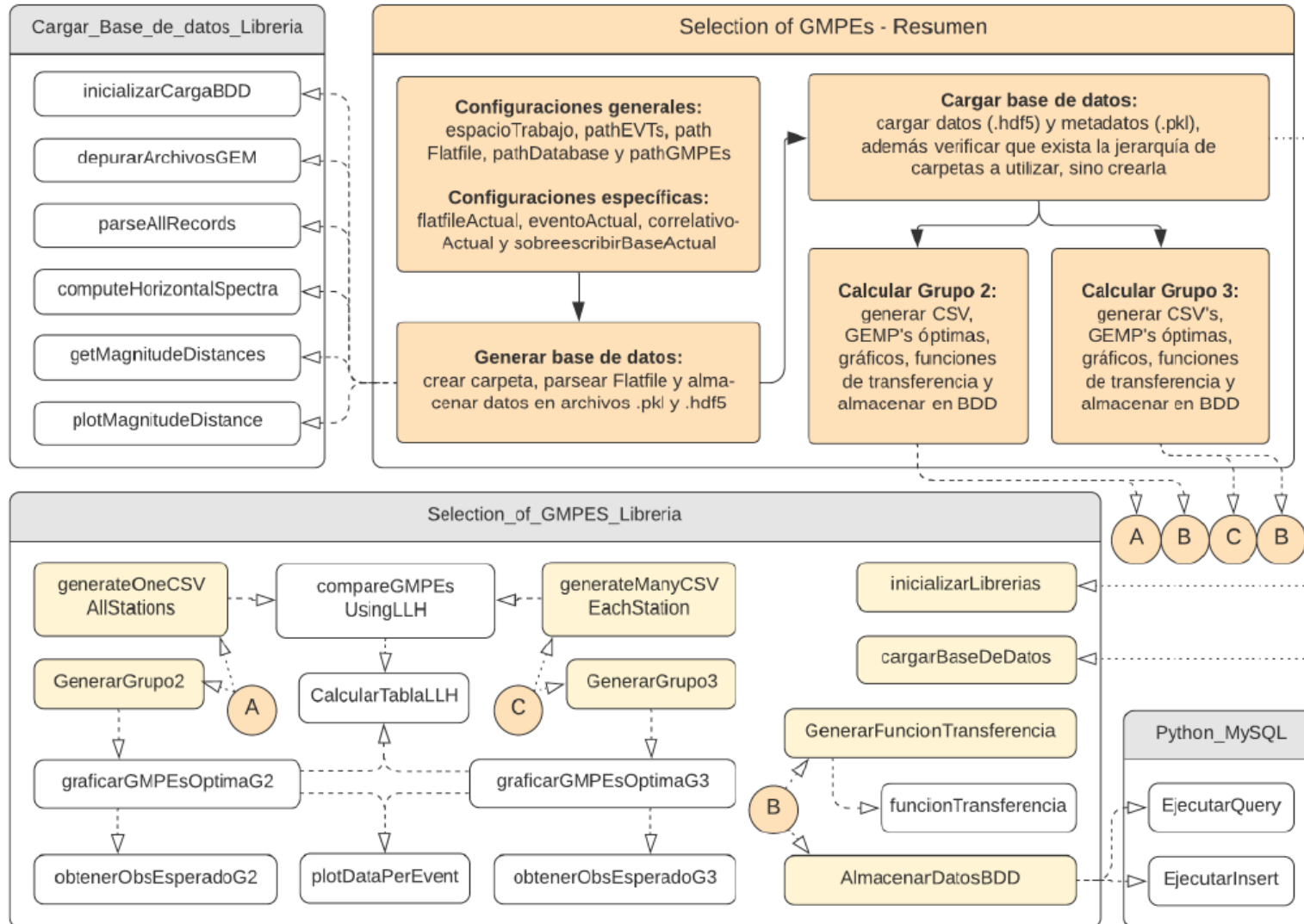
Congruente en la **deamplificación a lo largo de todos sus períodos**

Al suscitarse este evento de Mw 7.7. SA (1.0 s) = 180 cm/s²



Efecto de sitio: Métodos empíricos

Técnica de Selección óptima de GMPEs: Sistematización



-- Calculando para imt: ['PGA'] --


```

Observation: 0.04 Valor en roca: 0.06 Division: 0.75
Observation: 0.03 Valor en roca: 0.03 Division: 0.9
Observation: 0.08 Valor en roca: 0.04 Division: 1.88
Observation: 0.02 Valor en roca: 0.05 Division: 0.32
Observation: 0.01 Valor en roca: 0.05 Division: 0.19
Observation: 0.05 Valor en roca: 0.05 Division: 1.03
Observation: 0.01 Valor en roca: 0.06 Division: 0.18
Observation: 0.01 Valor en roca: 0.06 Division: 0.25
Observation: 0.01 Valor en roca: 0.06 Division: 0.17
Observation: 0.04 Valor en roca: 0.06 Division: 0.7
Observation: 0.03 Valor en roca: 0.06 Division: 0.58
Observation: 0.02 Valor en roca: 0.06 Division: 0.43
    
```

id	id_reg_acc	tipo	periodo	factor
2063	7255	amplifGMPEsGrupo2	0.00	0.7683
2064	7255	amplifGMPEsGrupo2	0.05	0.5931
2065	7255	amplifGMPEsGrupo2	0.10	1.1799
2066	7255	amplifGMPEsGrupo2	0.15	1.2898
2067	7255	amplifGMPEsGrupo2	0.20	1.1544
2068	7255	amplifGMPEsGrupo2	0.25	1.2423

id	id_reg_acc	tipo	periodo	factor
2555	7255	amplifGMPEsGrupo3	0.00	1.0570
2556	7255	amplifGMPEsGrupo3	0.05	0.9129
2557	7255	amplifGMPEsGrupo3	0.10	1.0985
2558	7255	amplifGMPEsGrupo3	0.15	1.0381
2559	7255	amplifGMPEsGrupo3	0.20	0.9184
2560	7255	amplifGMPEsGrupo3	0.25	0.9436

Efecto de sitio: Métodos empíricos



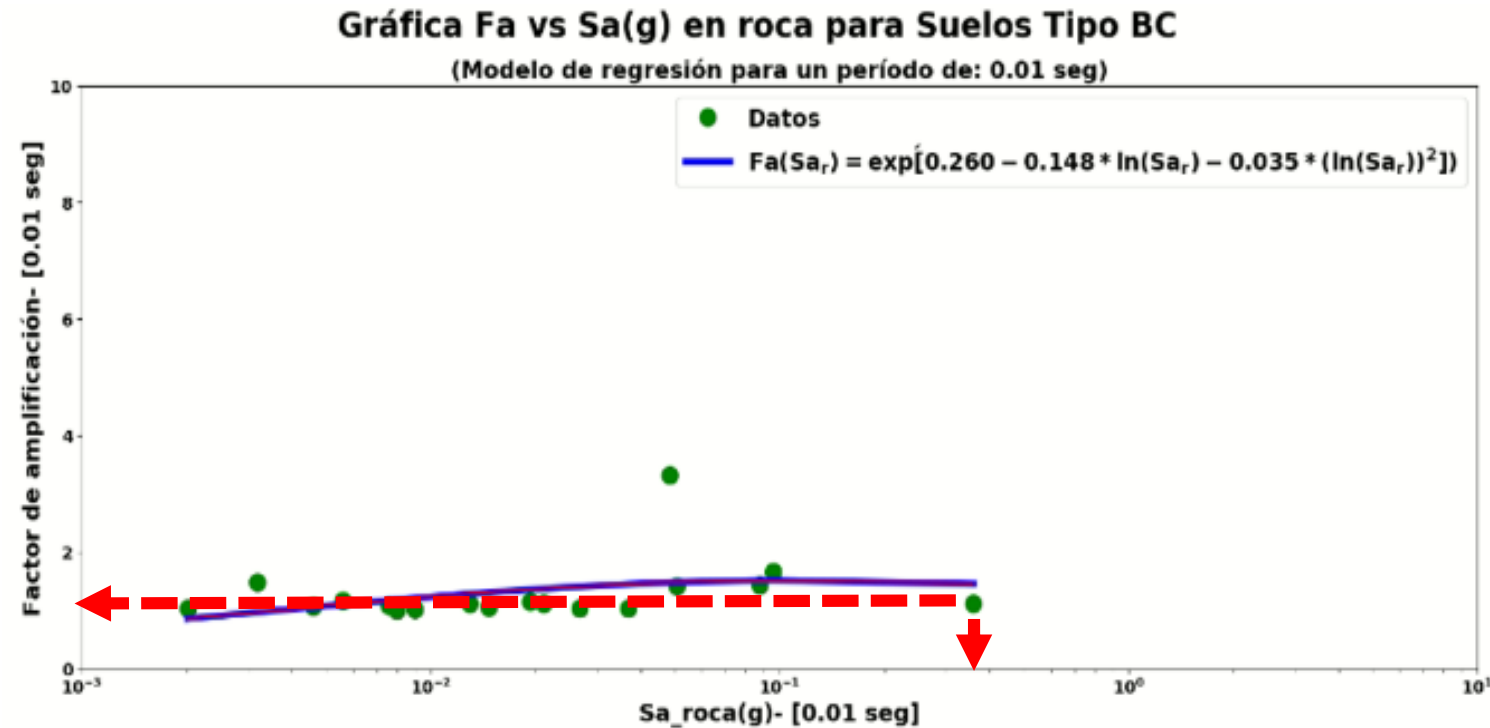
Determinación de funciones de
amplificación empíricas



Efecto de sitio: Métodos empíricos

Determinación de funciones de amplificación empíricas

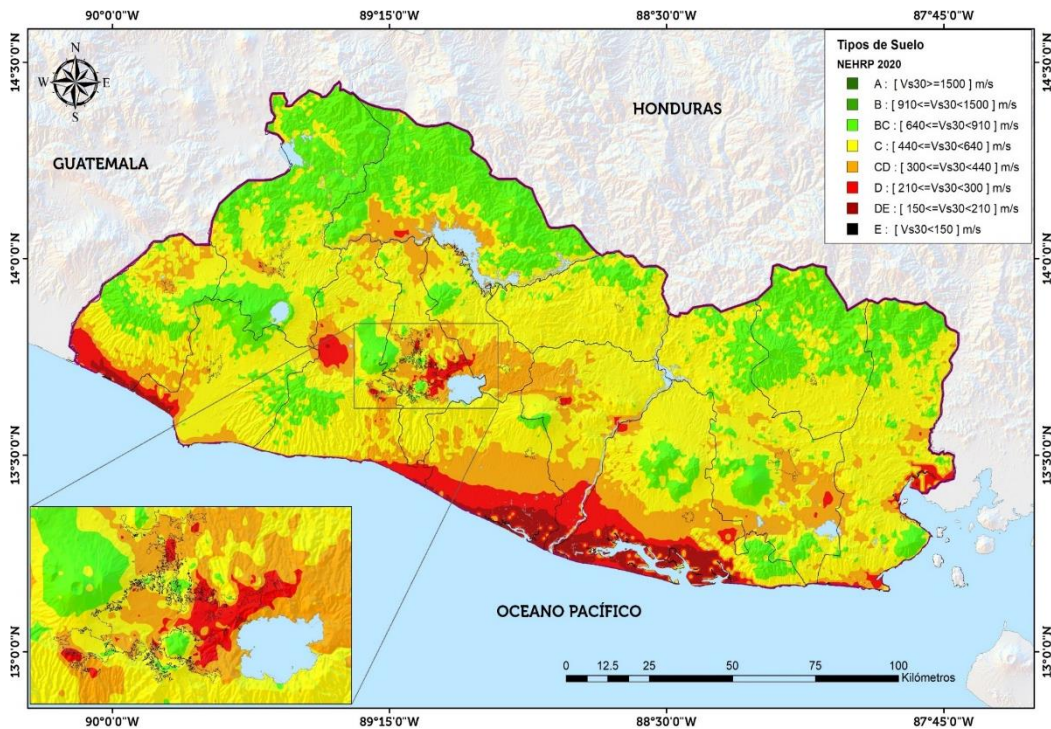
- Post-procesamiento de los resultados correspondientes a las funciones de transferencia obtenidas a partir de las **Técnicas de Borchardt (SSR) y de Ajustes óptimos de GMPEs**.
- Se diferencian de las funciones de transferencia, en que en esta ocasión se relaciona directamente con la **aceleración en roca [Sa (g)]** y no precisamente con el período estructural.



Efecto de sitio: Métodos empíricos

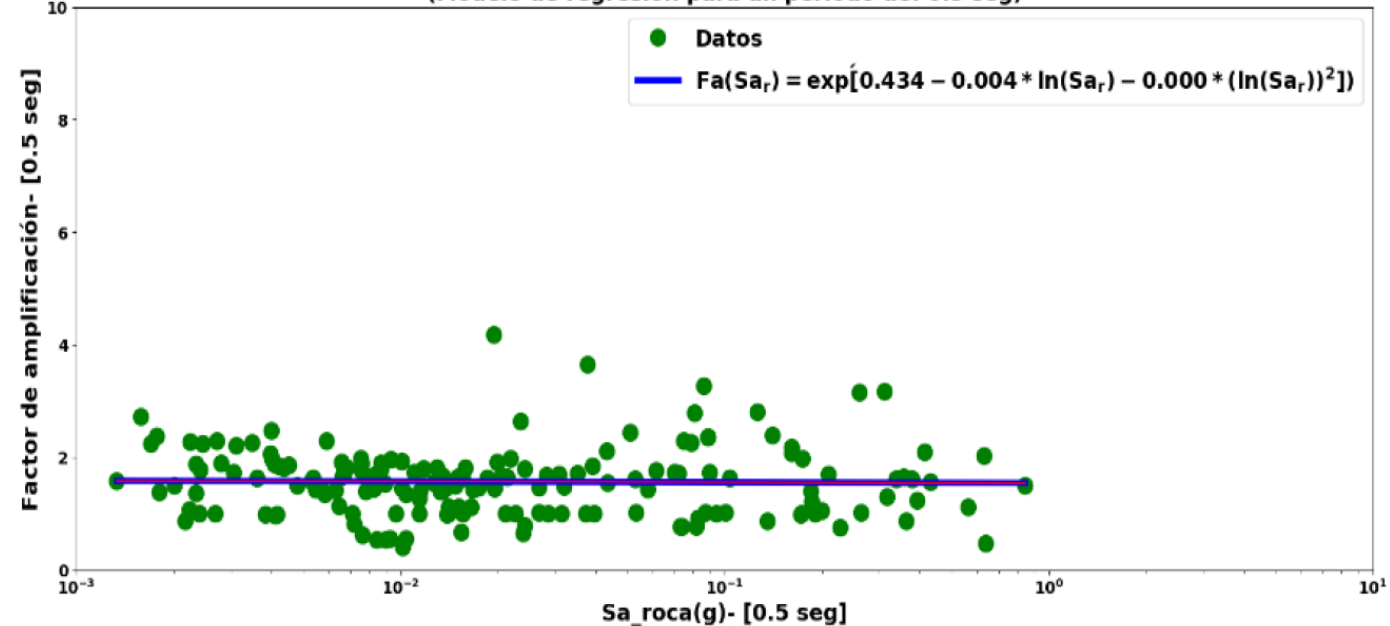
Determinación de funciones de amplificación empíricas

- Estas funciones se determinaron para **los tipos de suelo BC, C, CD y D identificados en el mapa de Vs30**, debido a que solo en estos se emplazaban las estaciones acelerográficas.



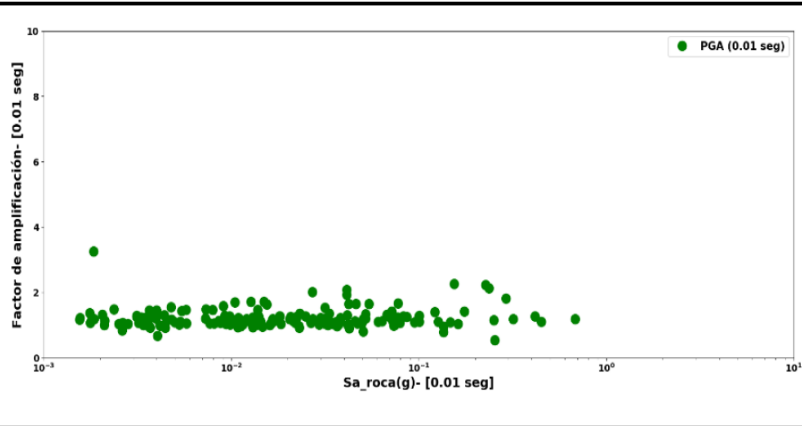
Gráfica Fa vs Sa(g) en roca para Suelos Tipo CD

(Modelo de regresión para un período de: 0.5 seg)

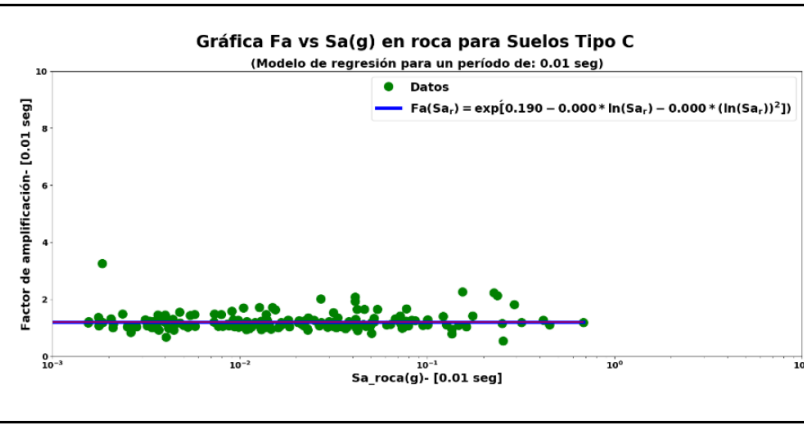


Efecto de sitio: Métodos empíricos

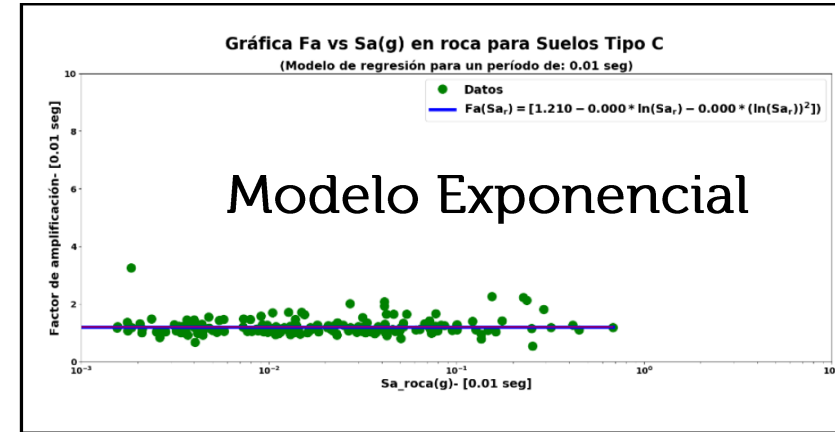
Funciones de amplificación: Suelo Tipo C – Medida: PGA



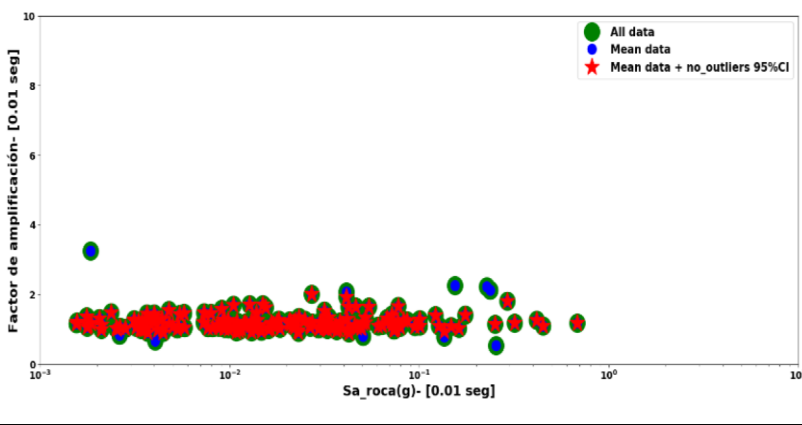
Toda la data (195) de estaciones en Suelo tipo C para medida de intensidad: PGA



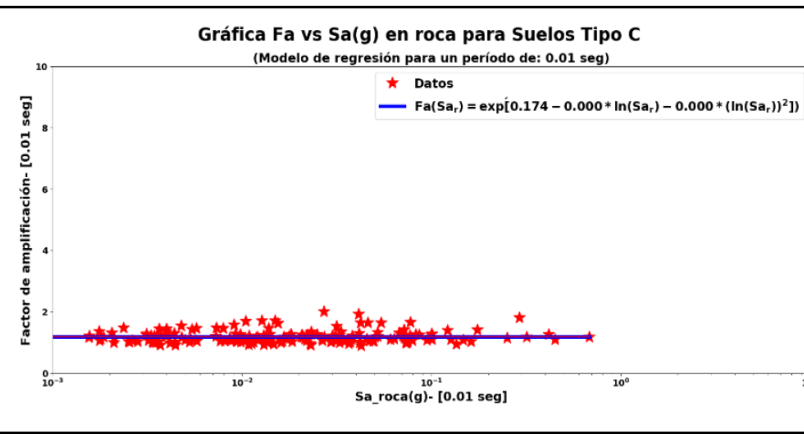
Modelo cuadrático exponencial usando toda la data



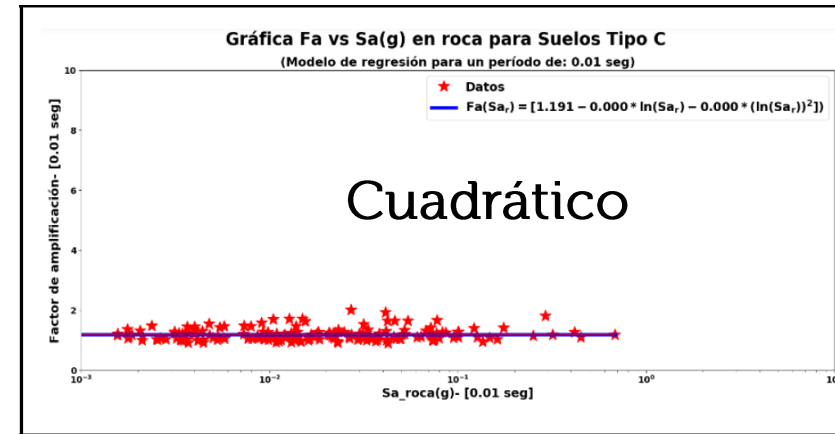
Modelo cuadrático No exponencial usando toda la data



Aplicación de intervalo de confianza del 95 % a toda la data, identificando los datos Outliers (color azul)



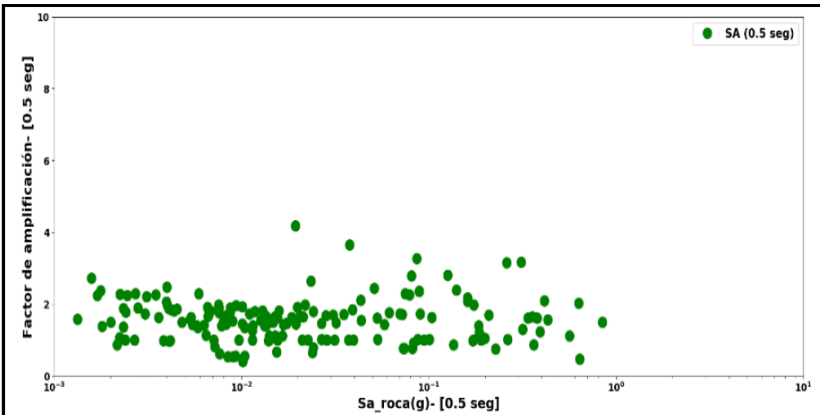
Modelo cuadrático exponencial una vez removidos los Outliers



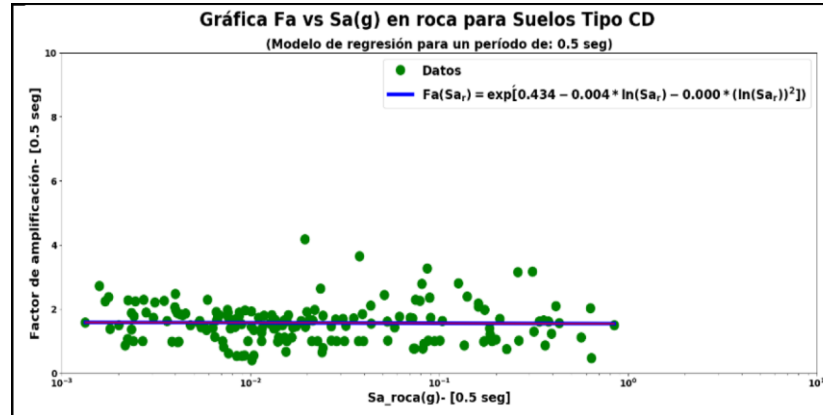
Modelo cuadrático No exponencial una vez removidos los Outliers

Efecto de sitio: Métodos empíricos

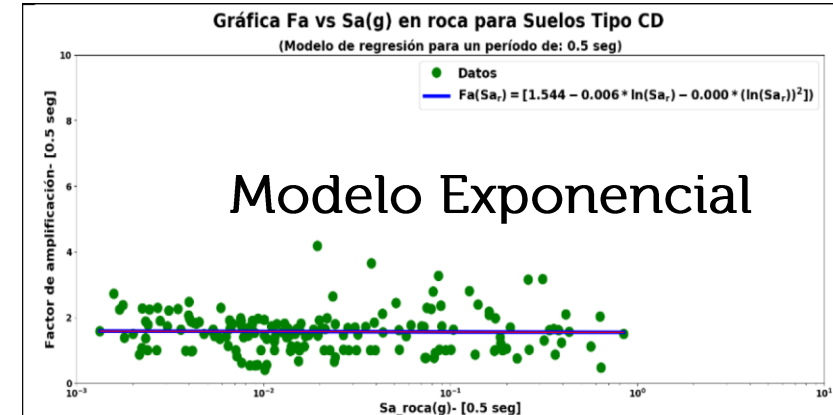
Funciones de amplificación: Suelo Tipo CD – Medida: SA(0.5s)



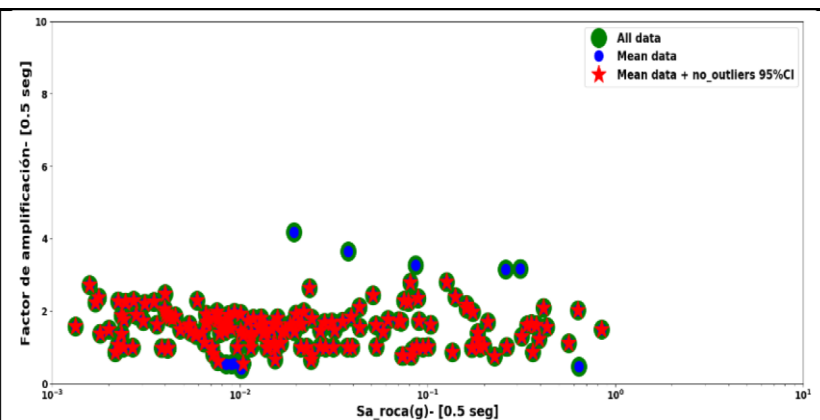
Toda la data (174) de estaciones en suelo tipo CD para medida de intensidad: SA (0.5 seg)



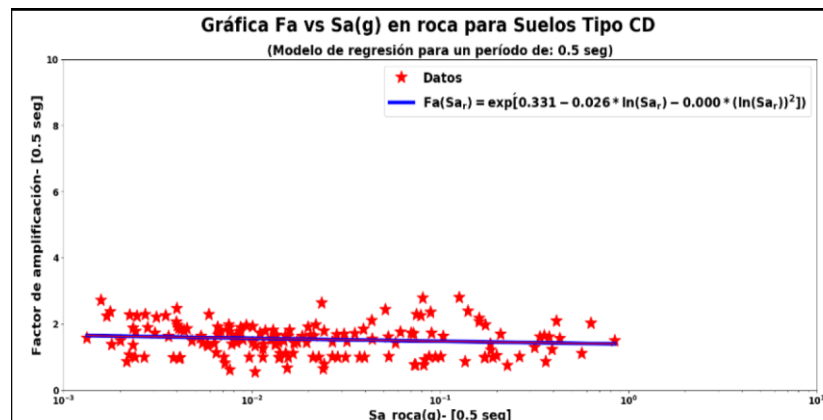
Modelo cuadrático exponencial usando toda la data



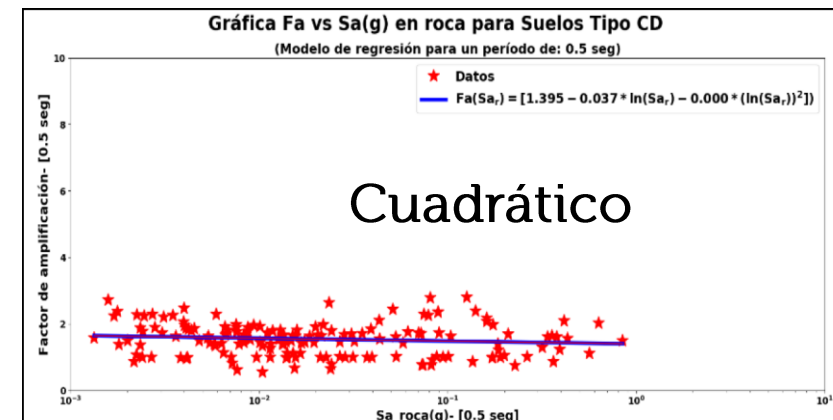
Modelo cuadrático No exponencial usando toda la data



Aplicación de intervalo de confianza del 95% a toda la data, identificando los datos Outliers (color azul)



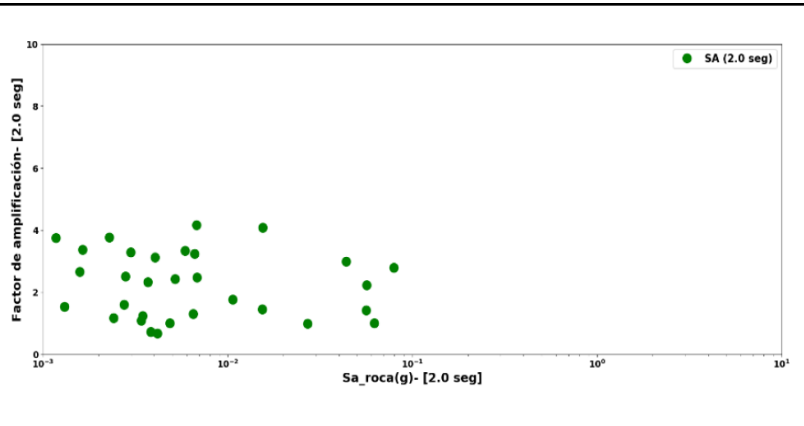
Modelo cuadrático exponencial una vez removidos los Outliers



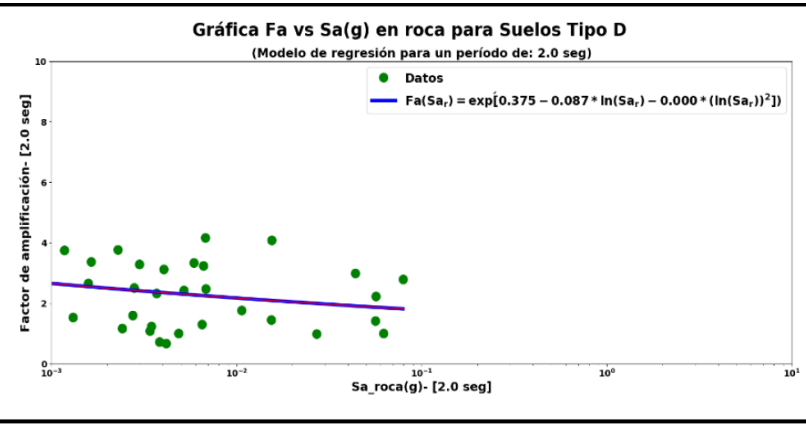
Modelo cuadrático No exponencial una vez removidos los Outliers

Efecto de sitio: Métodos empíricos

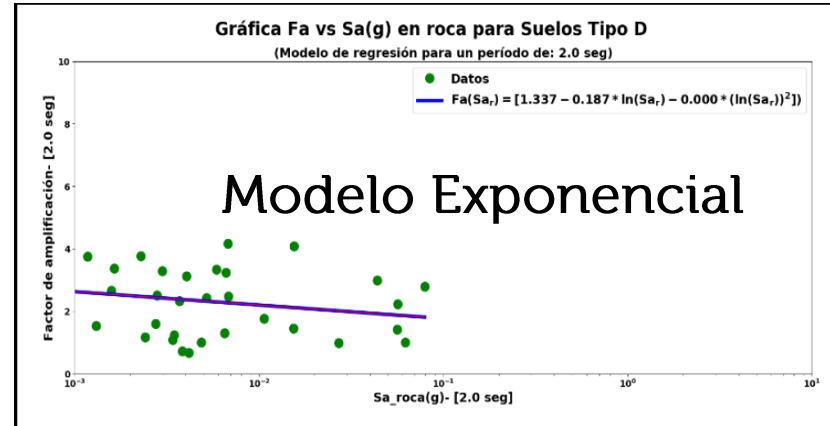
Funciones de amplificación: Suelo Tipo D – Medida: SA(2.0s)



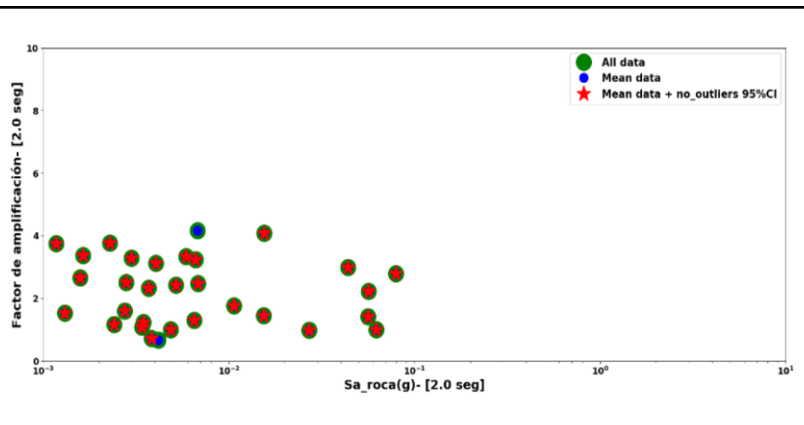
Toda la data (35) de estaciones en suelo tipo D para medida de intensidad: SA (2.0 seg)



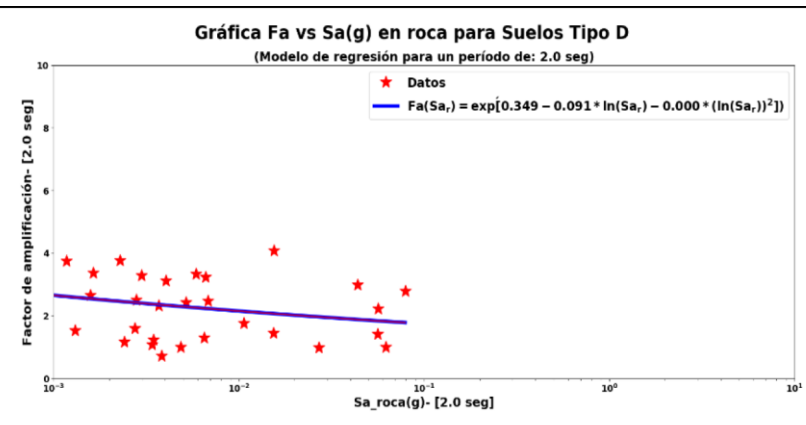
Modelo cuadrático exponencial usando toda la data



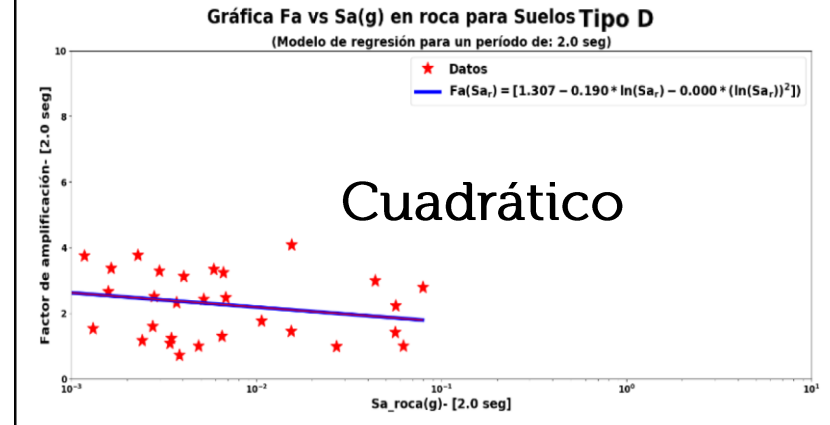
Modelo cuadrático No exponencial usando toda la data



Aplicación de intervalo de confianza del 95 % a toda la data, identificando los datos Outliers (color azul)

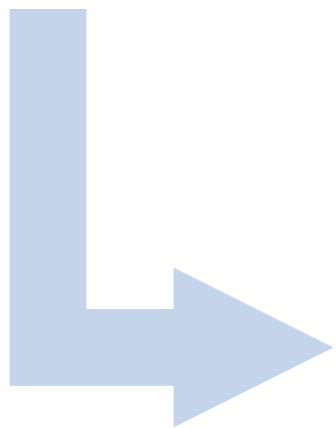


Modelo cuadrático exponencial una vez removidos los Outliers



Modelo cuadrático No exponencial una vez removidos los Outliers

Efecto de sitio: Métodos empíricos



Factores de amplificación
extraídos de funciones



Efecto de sitio: Métodos empíricos

Factores de amplificación extraídos de funciones

4.5.1. Factores de amplificación para PGA [0.01 seg]

Aceleración máxima de terreno [PGA(0.01 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 periodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																				
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.15	1.25	1.28	1.30	1.31	1.31	1.32	1.32	1.32	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
C	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
CD	1.32	1.36	1.38	1.39	1.39	1.39	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
D	1.53	1.56	1.55	1.54	1.52	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.43	1.41	1.40	1.39	1.34	1.31

4.5.5. Factores de amplificación para SA [0.5 seg]

Aceleración espectral de terreno [SA(0.5 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 periodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																				
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.01	1.21	1.24	1.23	1.22	1.21	1.20	1.18	1.17	1.16	1.14	1.13	1.12	1.11	1.10	1.08	1.06	1.04	0.98	0.92
C	1.34	1.35	1.30	1.26	1.23	1.20	1.18	1.16	1.14	1.12	1.11	1.10	1.08	1.07	1.06	1.04	1.02	1.00	0.93	0.88
CD	1.57	1.56	1.56	1.56	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54
D	2.24	2.13	2.03	1.96	1.90	1.85	1.81	1.78	1.75	1.72	1.70	1.67	1.65	1.63	1.61	1.58	1.55	1.53	1.42	1.35

4.5.8. Factores de amplificación para SA [1.0 seg]

Aceleración espectral de terreno [SA(1.0 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 periodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)																				
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.19	1.22	1.23	1.24	1.24	1.24	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
C	1.31	1.23	1.19	1.16	1.14	1.12	1.10	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05	1.05	1.04	1.03	1.02	1.01	1.00	0.96	0.94
CD	1.67	1.66	1.65	1.65	1.65	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
D	2.45	2.47	2.40	2.34	2.29	2.25	2.21	2.18	2.14	2.11	2.09	2.06	2.03	2.01	1.99	1.95	1.91	1.88	1.73	1.63

Table 11.4-1 Short-Period Site Coefficient, F_a

Site Class	Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE _R) Spectral Response Acceleration Parameter at Short Period					
	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.5$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.0$	$S_S = 1.25$	$S_S \geq 1.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	2.4	1.7	1.3	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8
F	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8

Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of S_S .

Table 11.4-2 Long-Period Site Coefficient, F_v

Site Class	Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE _R) Spectral Response Acceleration Parameter at 1-s Period					
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 = 0.5$	$S_1 \geq 0.6$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
D	2.4	2.2 ^a	2.0 ^a	1.9 ^a	1.8 ^a	1.7 ^a
E	4.2	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8
F	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8

Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of S_1 .
^aAlso, see requirements for site-specific ground motions in Section 11.4.8.

Contenido general

1. Justificación de trabajo
2. Amplificación del sitio
3. Antecedentes y estudios realizados a nivel nacional
4. Metodología empleada para caracterización
5. Mapa de zonificación sísmica "homogénea", en términos de V_s30
6. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Empíricos.
7. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Analíticos.
8. Factores de amplificación
9. Conclusiones



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Métodos existentes para estimación de amplificaciones

Existen dos métodos para la estimación de la amplificación de sitio:

Métodos empíricos

Utilizando señales de registros acelerográficos, situados tanto en lugares con suelos poco consolidados como en suelos competentes; tomando de base el mapa de V_s30 .

Métodos analíticos

Son modelaciones numéricas más complejas ya que se necesita información más precisa para poder determinar el comportamiento dinámico de una columna de suelo.

Efecto de sitio: Métodos analíticos



Objetivo general y específico



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Objetivo general y específico

OBJETIVOS GENERALES



Obtención de **funciones de amplificación analíticas-teóricas** para cada uno de los tipos de suelo identificados, bajo un enfoque **lineal-equivalente** de simulaciones 1-D.

OBJETIVO ESPECÍFICO



Generación de **múltiples perfiles de suelo estocásticos***, a través de simulaciones MonteCarlo, utilizando información geológica y geotécnica recopilada de **pozos de exploración en El Salvador**.



Sometidas a diferentes terremotos con niveles de intensidad sísmica en roca específicos (**compatibles con la amenaza sísmica de El Salvador**)

Efecto de sitio: Métodos analíticos



Parámetros influyentes en
propiedades dinámicas



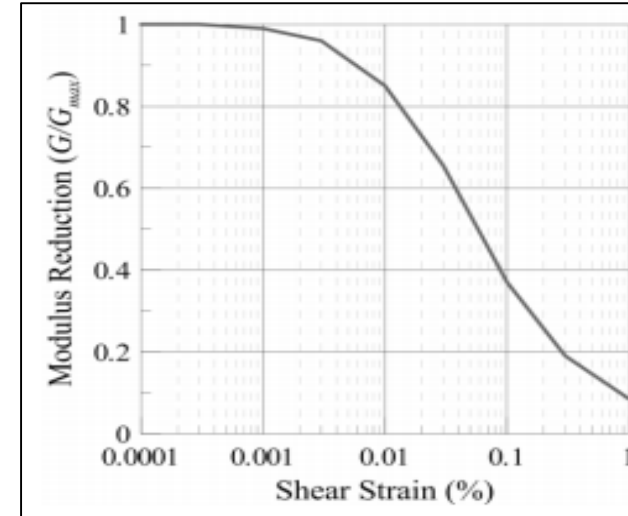
Efecto de sitio: Métodos analíticos

Teoría básica sobre análisis

- Conocer el comportamiento esfuerzo-deformación de los diferentes suelos que componen una columna estratigráfica, cuando es sometido a cargas sísmicas de diferente intensidad.

- Independientemente el tipo de suelo que sea, éste presentará características de deformación no lineales, evidenciando cambios de su módulo de corte y amortiguamiento

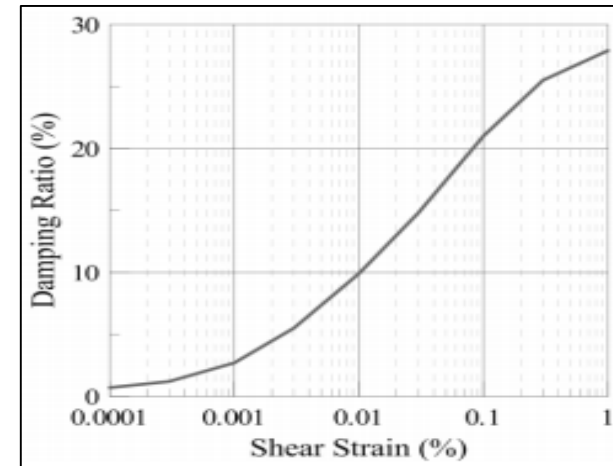
Curva de reducción de módulo de corte



Fuente: Seed e Idriss, 1970

A mayor amplitud de deformación por corte del suelo, la rigidez del suelo decae de forma no lineal

Curva de amortiguamiento histerético



Fuente: Seed e Idriss, 1970

A mayor amplitud de deformación por corte del suelo, el material comienza a disipar energía internamente

Efecto de sitio: Métodos analíticos

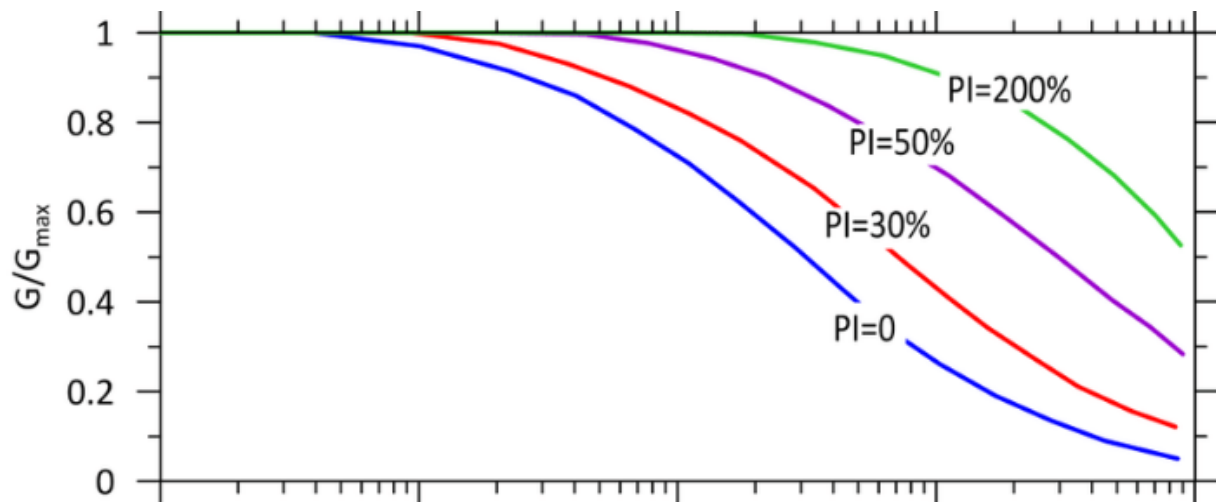
Parámetros influyentes en propiedades dinámicas

- Índice de plasticidad (PI),
- Esfuerzo de confinamiento medio efectivo (σ'_m),
- Frecuencia de carga (f),
- Número de ciclos de carga (N) y
- Índice de sobreconsolidación (OCR)

Hechos tomados en cuenta:

1. Suelos caracterizados con **altos valores de (PI)** experimentan **altos valores de G_s/G_0** para una deformación (γ_c).

2. Con el **aumento del (σ'_m)**, las curvas de amortiguamiento tienden a disminuir para todas las amplitudes de deformación.



Efecto de sitio: Métodos analíticos



**Metodología de análisis:
Consideraciones principales**

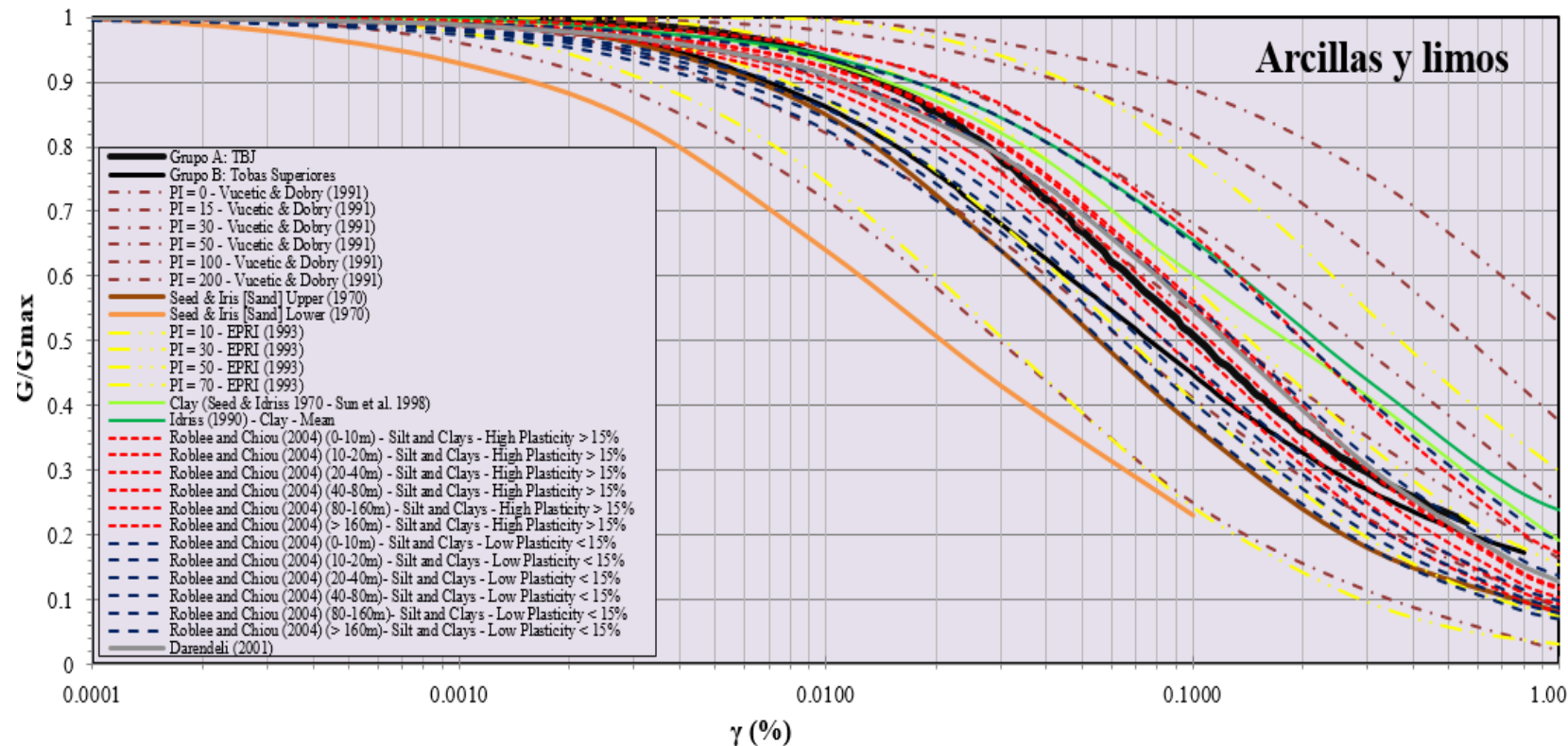


Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Consideraciones principales

1. Dado que aún se está calibrando Cámara triaxial de columna resonante, se decidió lo siguiente:

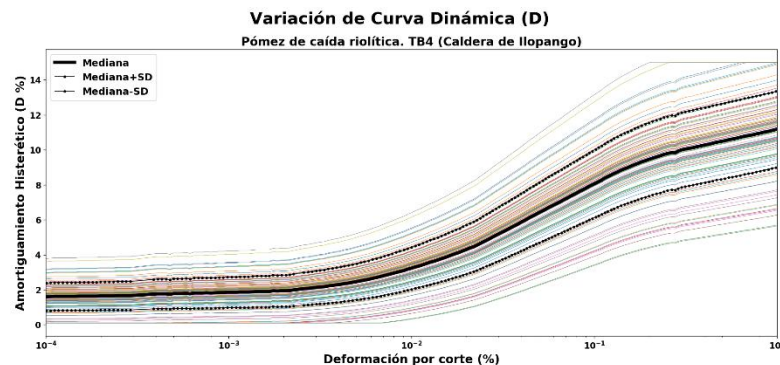
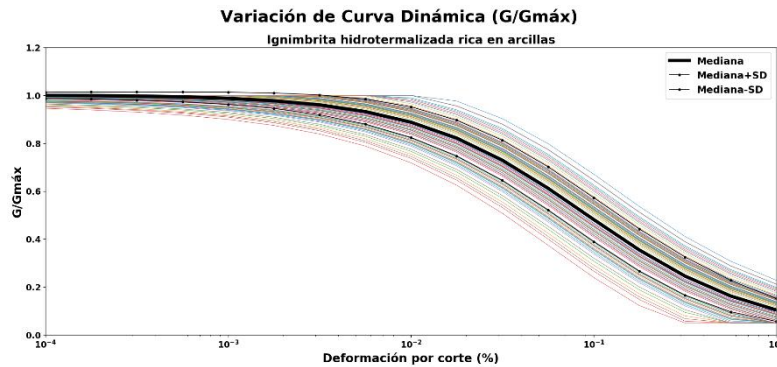
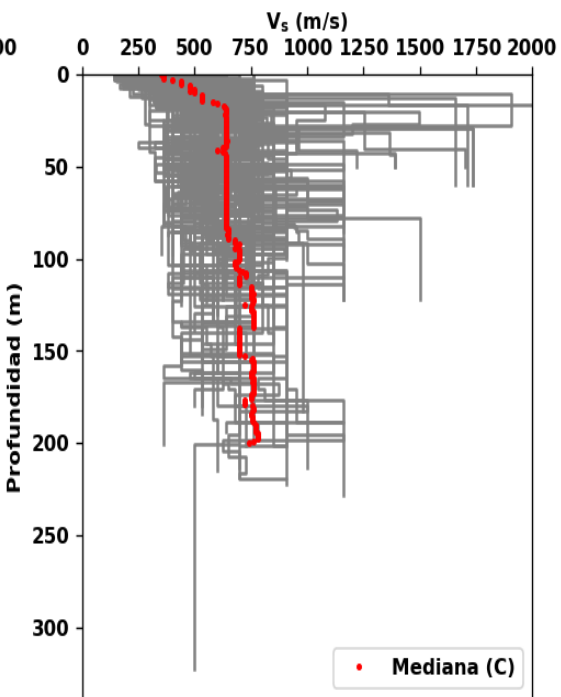
Las propiedades dinámicas de cada una de las capas identificadas **serán asignadas por medio de curvas dinámicas empíricas (extraídas de la literatura)**



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Consideraciones principales

2. Al no saber con certeza las propiedades dinámicas se decide utilizar un procedimiento basado en la **generación de múltiples perfiles de suelo estocásticos**, y evaluar la respuesta a través de simulaciones MonteCarlo.



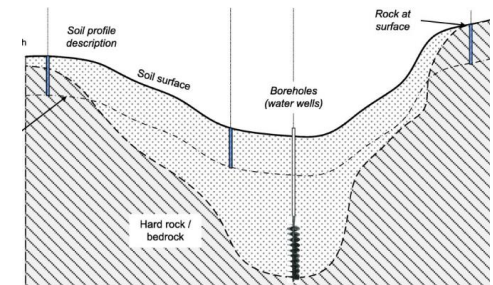
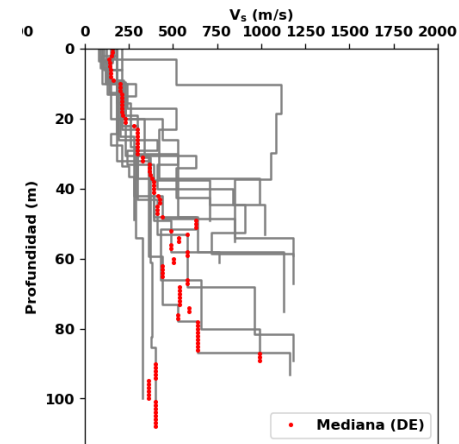
Donde se variarán las diferentes propiedades estáticas y dinámicas mediante una **caracterización estadística** de cada parámetro, y estimar la variabilidad de la respuesta sísmica de un sitio

Efecto de sitio: Métodos analíticos

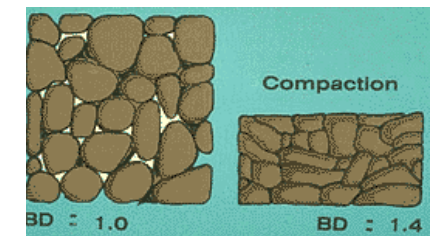
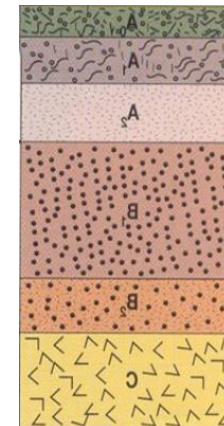
Metodología de análisis: Consideraciones principales

3. A partir de la información disponible se realizará la caracterización estadística de las propiedades siguientes:

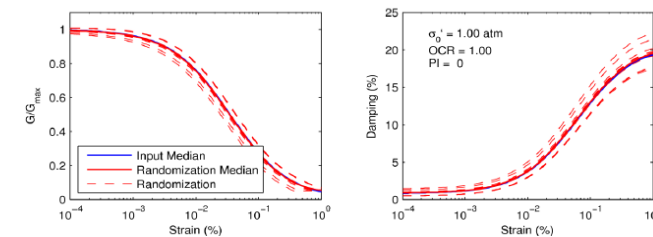
- Perfiles de velocidades de ondas de corte (V_s)
- Profundidad al lecho rocoso en cada perfil.
- Espesores de las capas de suelo.
- Densidad bulk de cada una de las capas.
- Propiedades dinámicas (modelos de rigidez al corte y amortiguación histerética).



Fuente: Shangguan, et al., 2016



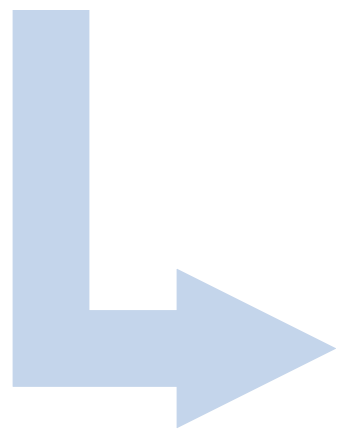
Fuente: Pennsylvania State University, 2003



Fuente: slideplayer.es/slide/20835/

Fuente: Kottke, A. et al, 2013

Efecto de sitio: Métodos analíticos



**Metodología de análisis:
se enmarca en 2 etapas**



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Consideraciones principales

1era etapa

Evaluación **de la respuesta de sitio de 16 pozos** con conocimiento directo de su estructura de velocidades, a través de un **enfoque cuasi-determinístico**

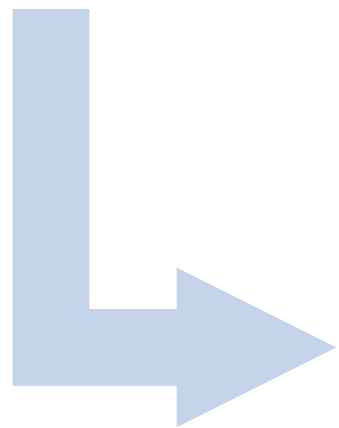
Únicamente se variarán las propiedades dinámicas de cada capa identificada. Se mantendrán las densidades, espesores, velocidades de corte y profundidad al lecho rocoso, propios de cada perfil.

2da etapa

Visión probabilística de estimación de funciones de amplificación **a nivel nacional**, enmarcadas en **zonas homogéneas** de respuesta similar, en términos del parámetro V_s30 .

Se evaluarán las variaciones estadísticas de todas las propiedades físico-estáticas y dinámicas que caracterizan a cada uno de los perfiles agrupados dentro de cada zona homogénea

Efecto de sitio: Métodos analíticos



Metodología de análisis

14 pasos

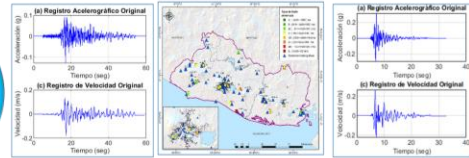


Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Resumen

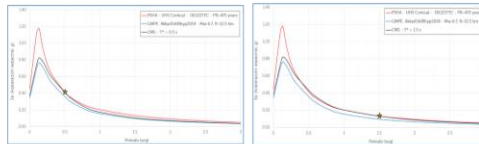
Selección de Registros Acelerográficos provenientes de estaciones cercanas a los 16 sitios de pozos

8



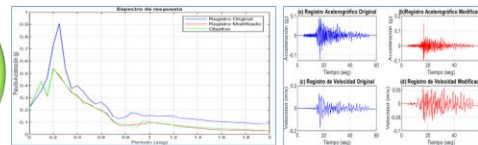
Determinación de espectros medios condicionales (CMS), condicionando cuatro periodos estructurales [PGA, SA (0.1333s, 0.5s y 0.15s)]

9



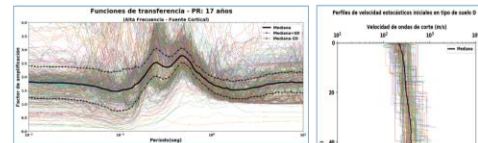
Matcheo de espectros acelerográficos a CMS, deconvolución y obtención de 167,738 registros en suelo firme (roca)

10



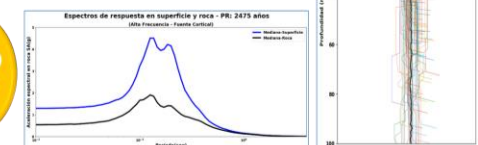
Ejecución de modelos analíticos en Strata para Etapa 1 y Etapa 2, considerando variaciones

11



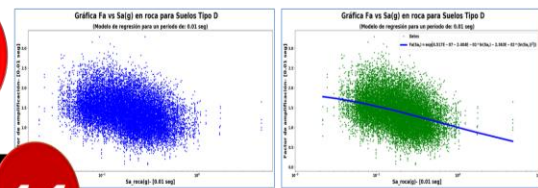
Determinación de funciones de transferencia y periodos predominantes para los 16 sitios de Etapa 1 y en cinco tipos de suelo en Etapa 2

12



Determinación de funciones de amplificación a cada tipo de suelo, para Etapa 2

13



Tabulación de factores de amplificación para los cinco tipos de suelo y 14 medidas de intensidad sísmica en Etapa 2

14

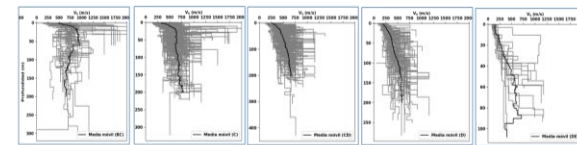
1

Generación de Mapa de Respuesta Sísmica Homogénea a nivel Nacional, categorizadas en tipos de suelo BC, C, CD, D y DE



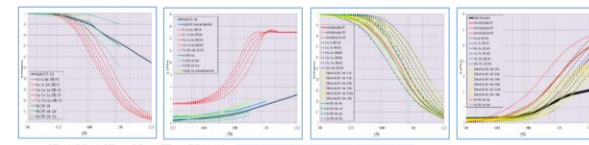
2

Compilación de Perfiles de velocidad de ondas de corte en bases de datos y clasificar por cinco tipos de suelo



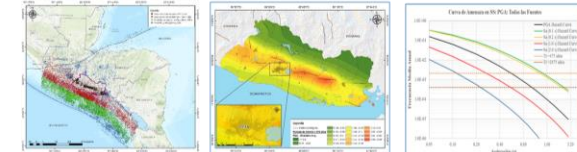
3

Investigación y selección de curvas dinámicas empíricas desde un punto de vista geotécnico



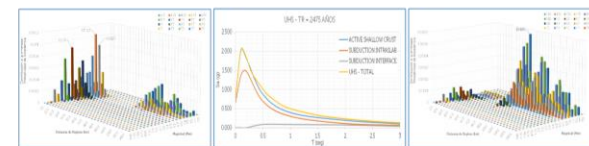
4

Evaluación probabilística de amenaza sísmica en suelo firme a nivel nacional para 7 periodos de retorno: (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)



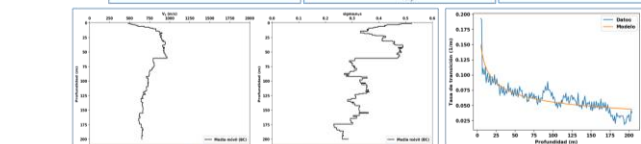
5

Desagregación sísmica en ubicación de 16 pozos, para los 7 PR y 4 medidas de intensidad sísmica [PGA, SA (0.1333s, 0.5s y 0.15s)]



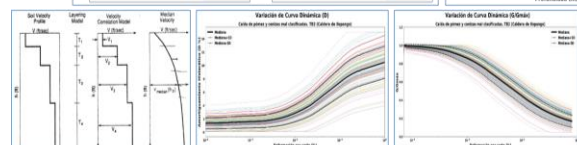
6

Caracterización estadística de propiedades de suelos a variar: Velocidad de corte, espesores de capas, profundidad a la roca, densidad y curvas dinámicas.



7

Variación de propiedades de los suelos vía Monte Carlo. En etapa 1 solo se variarán las propiedades dinámicas



Efecto de sitio: Métodos analíticos



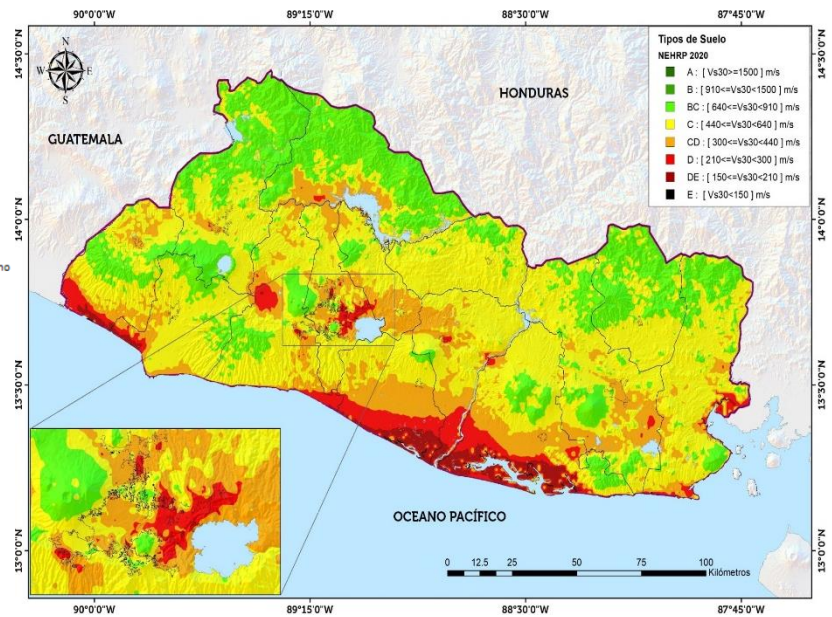
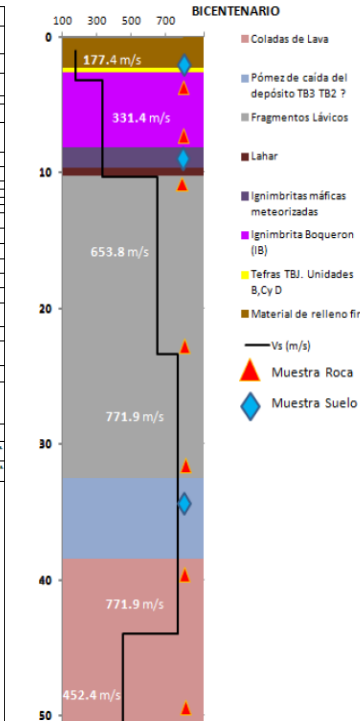
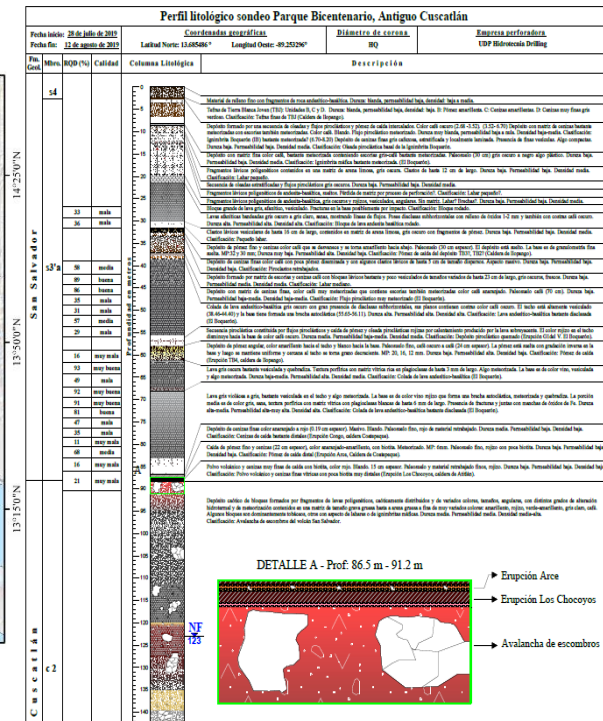
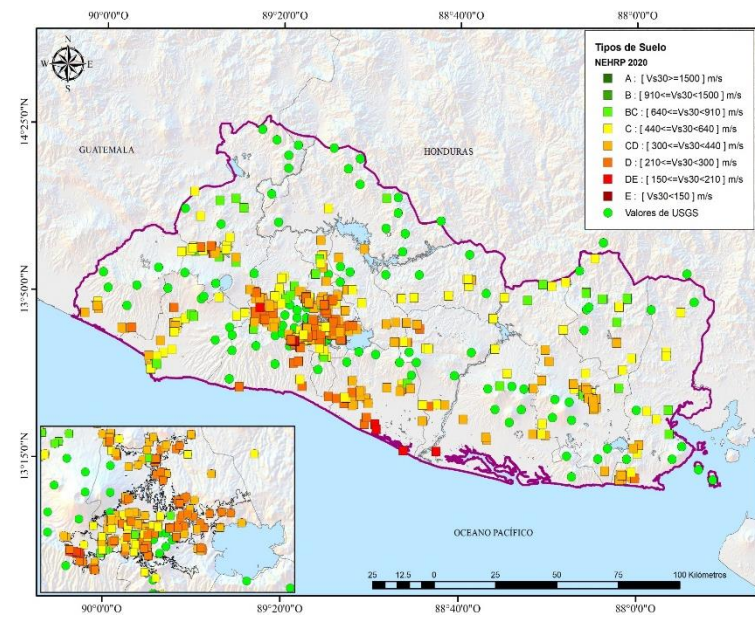
Metodología de análisis: Paso #1



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: **Paso #1**

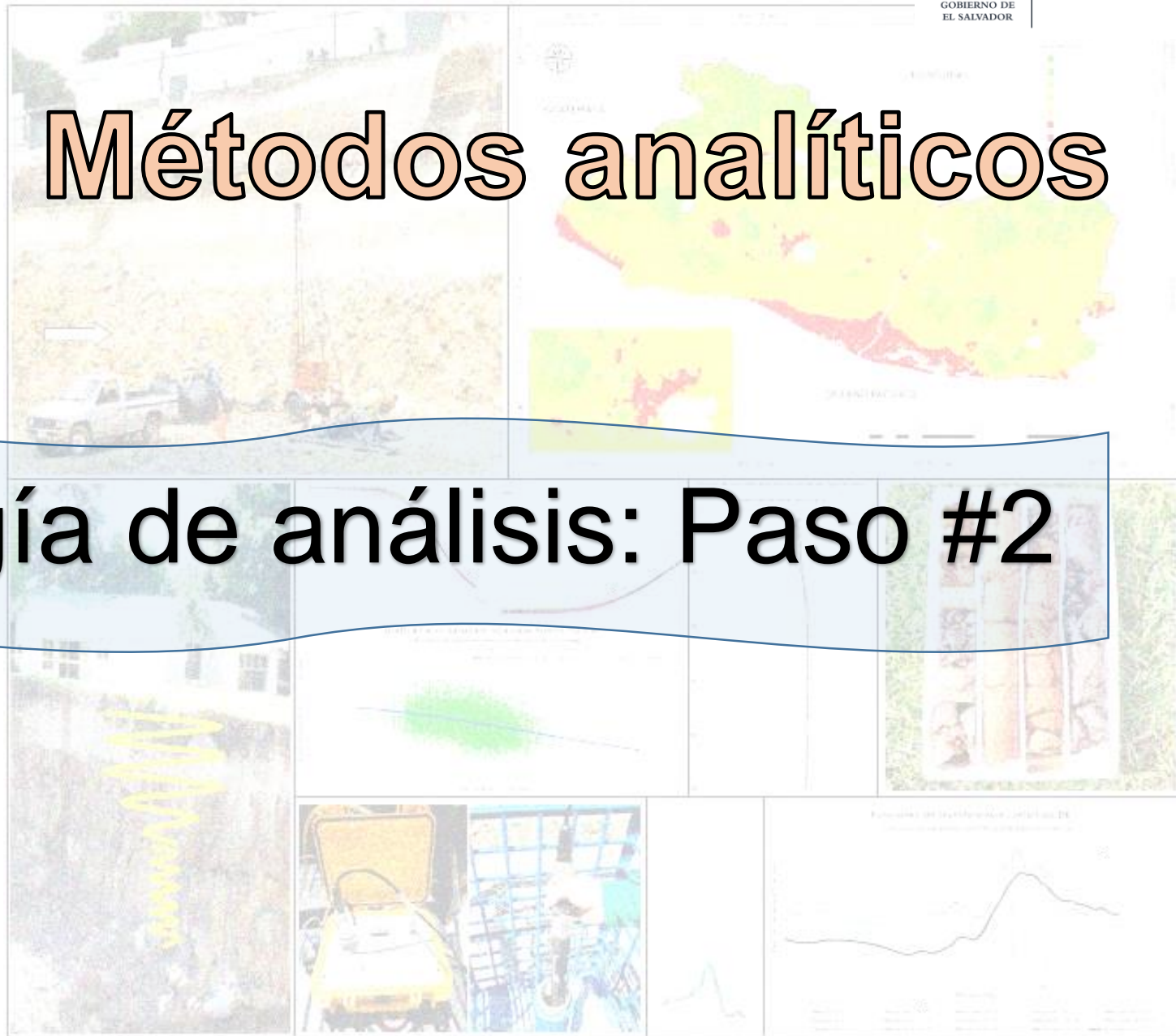
I. Generación de mapa de respuesta sísmica homogénea a nivel nacional, categorizadas en tipos de suelo BC, C, CD, D y DE



Efecto de sitio: Métodos analíticos



Metodología de análisis: Paso #2

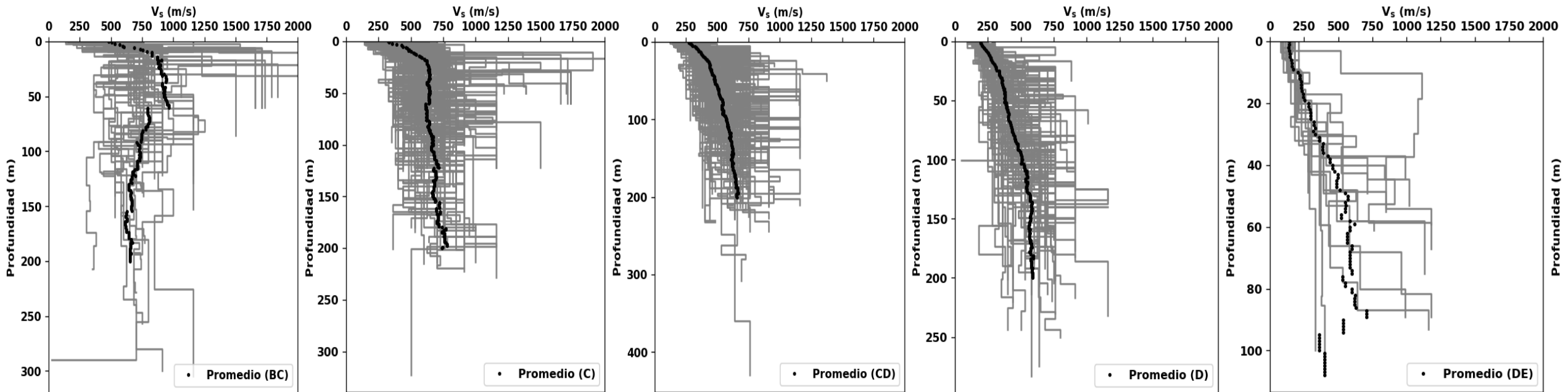
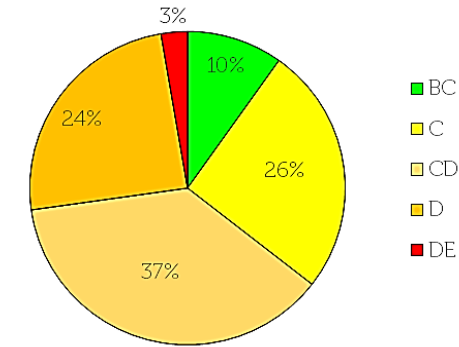


Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #2

II. Compilación de perfiles de velocidad de ondas de corte (V_s) almacenados en base datos, clasificar por tipos de suelo, extraer un perfil representativo junto con su desviación estándar.

Distribución de tipos de suelo



Suelo BC
51 perfiles

Suelo C
133 perfiles

Suelo CD
193 perfiles

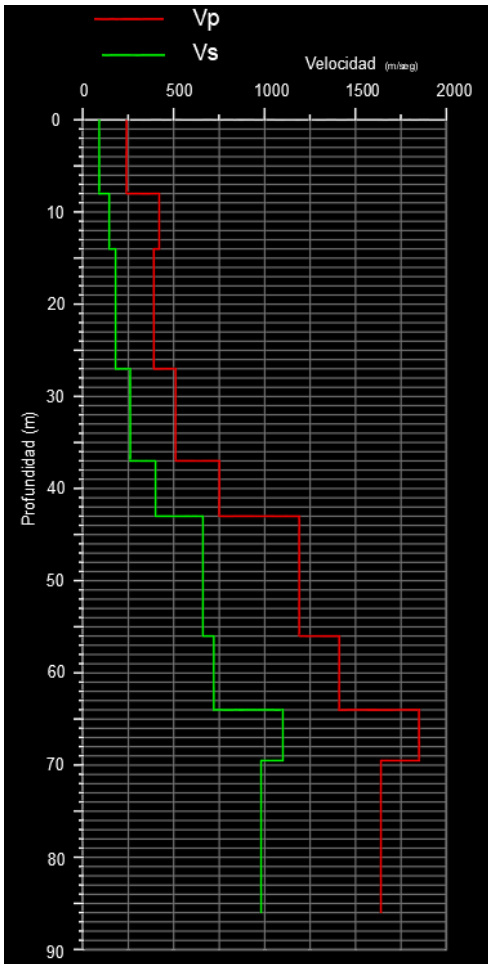
Suelo D
127 perfiles

Suelo DE
14 perfiles

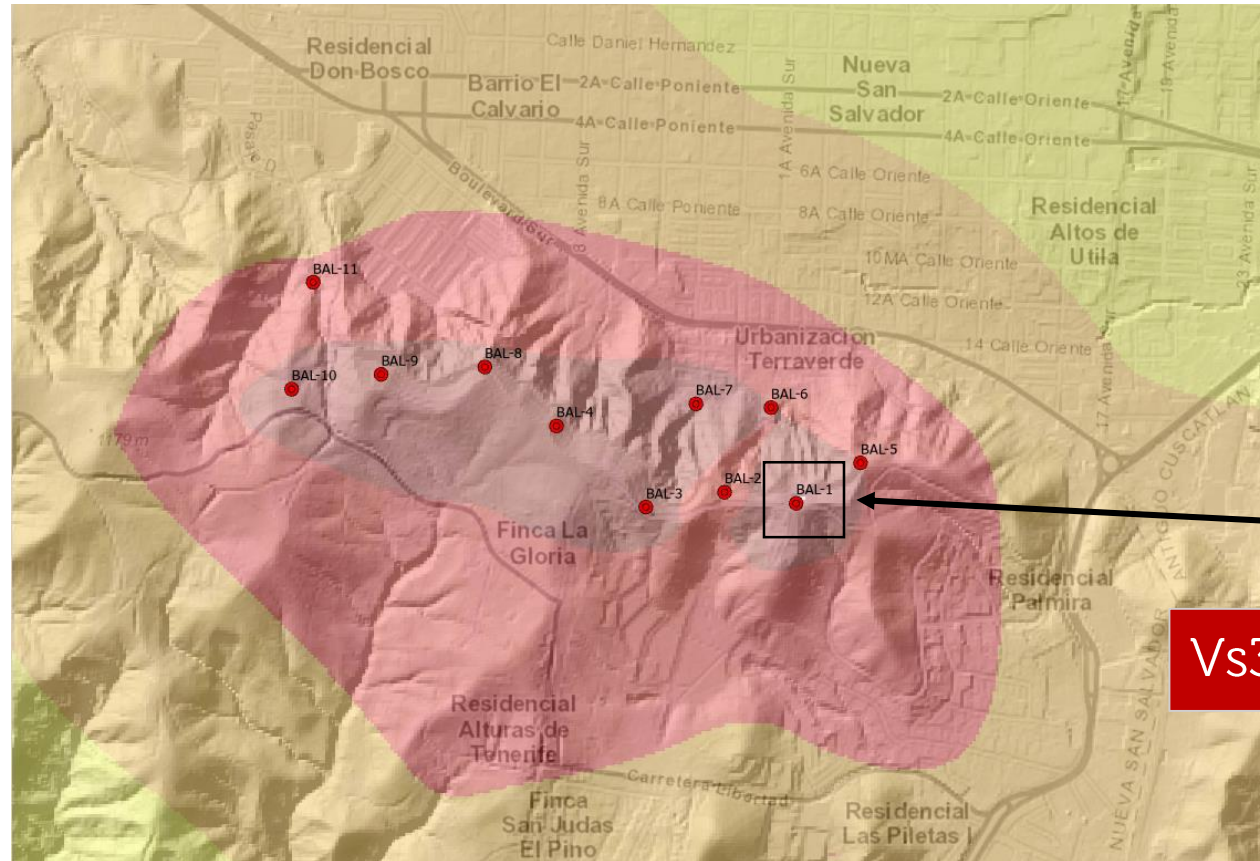
Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #2

II. Compilación de perfiles de velocidad de ondas de corte (V_s) almacenados en base datos, clasificar por tipos de suelo, extraer **un perfil representativo** con su **desviación estándar**.



Suelo E
1 perfil



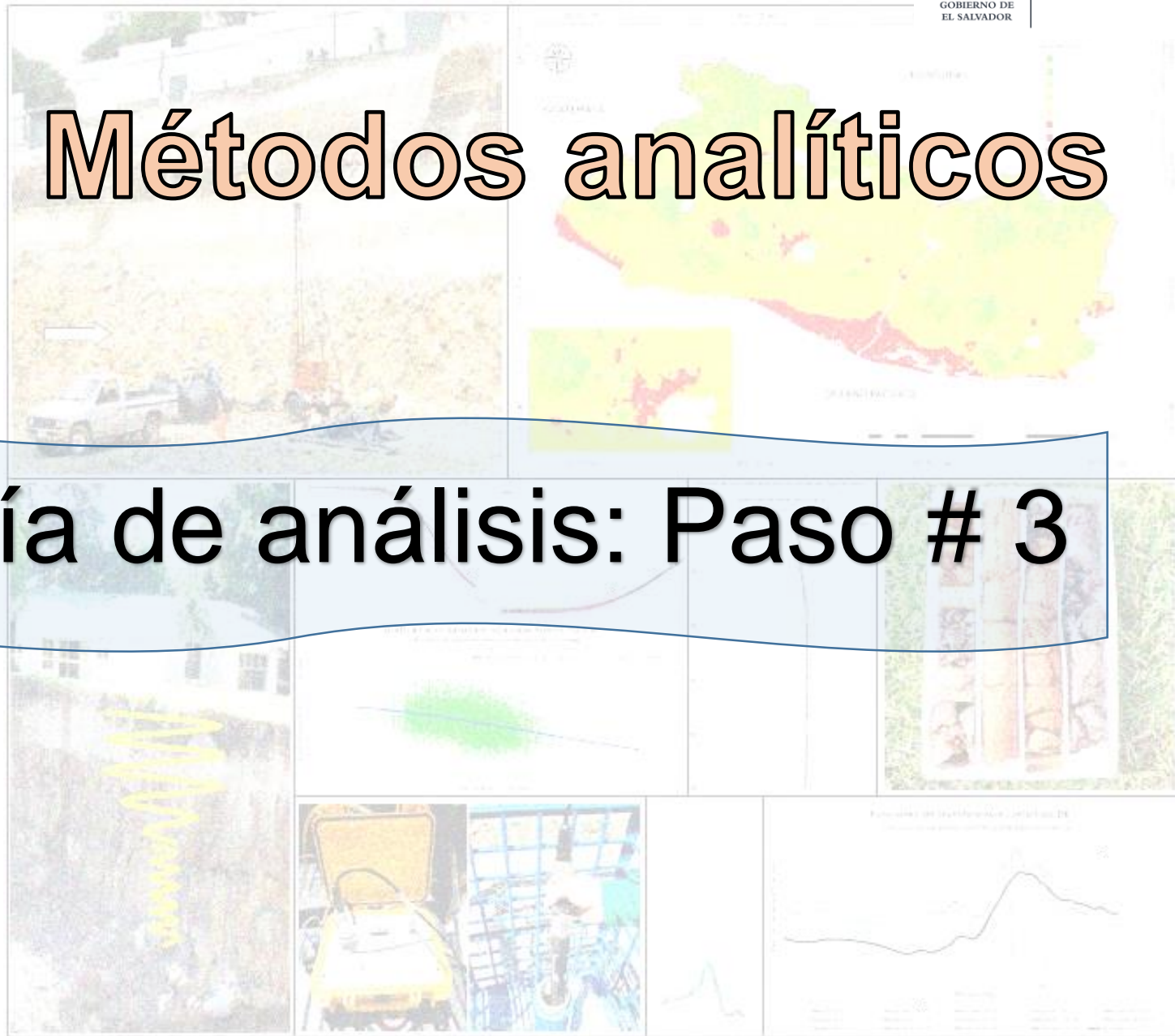
BAL - 1

$V_{s30} = 140.17 \text{ m/s}$

Efecto de sitio: Métodos analíticos



Metodología de análisis: Paso # 3

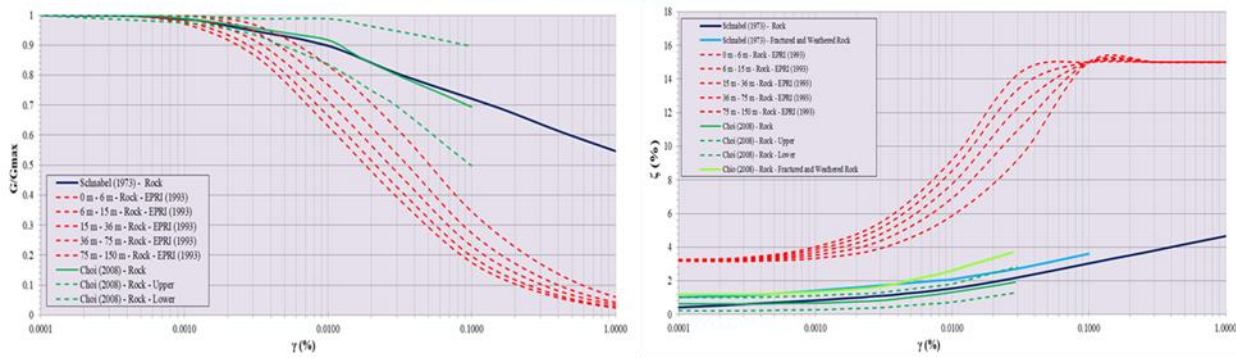


Efecto de sitio: Métodos analíticos

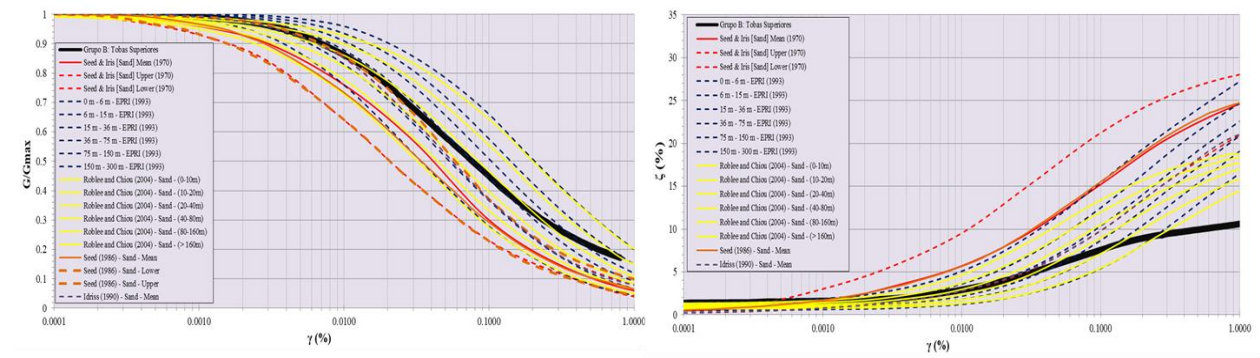
Metodología de análisis: **Paso #3**

III. Investigación bibliográfica, selección de curvas dinámicas empíricas desde un punto de vista geotécnico y ajuste a modelos de curvas genéricas.

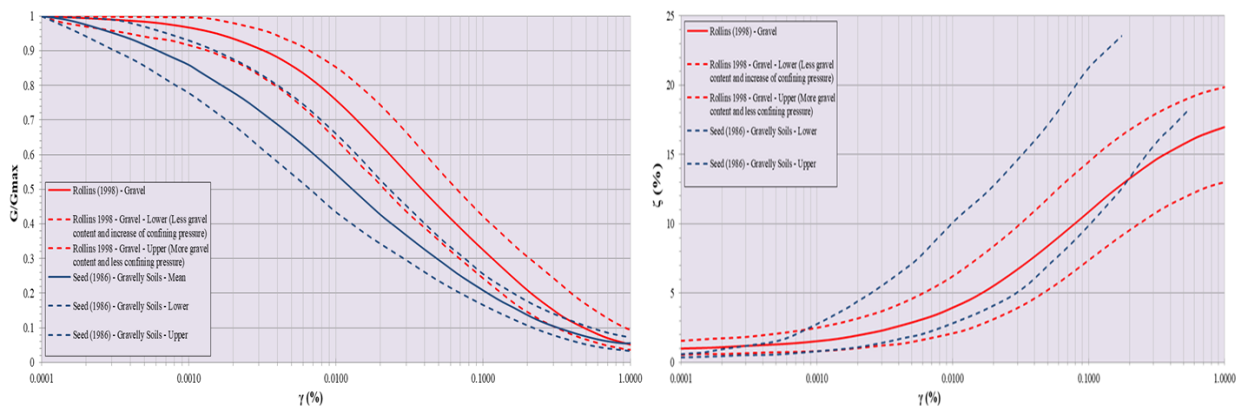
Curvas para ROCAS - LAVAS



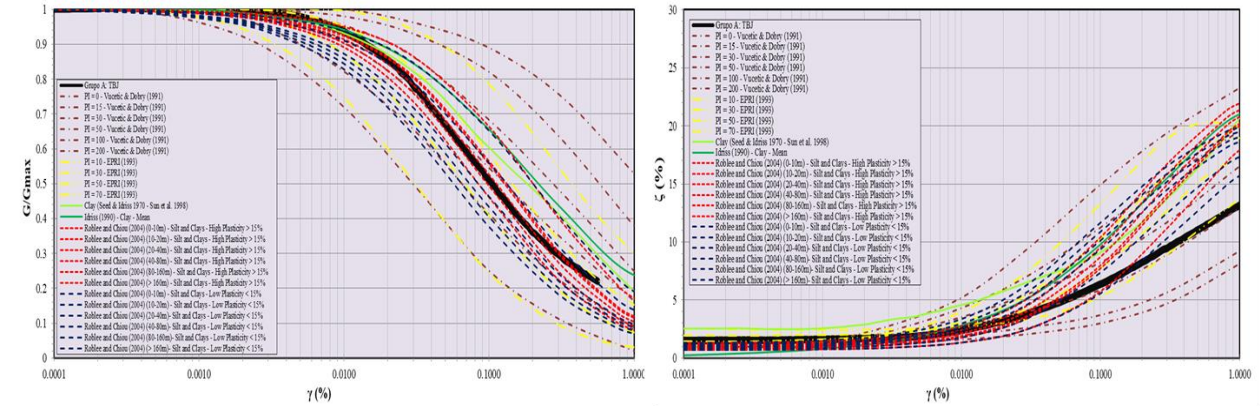
Curvas para ARENAS Y ARENAS GRAVOSAS



Curvas para GRAVAS



Curvas para LIMOS Y ARCILLAS

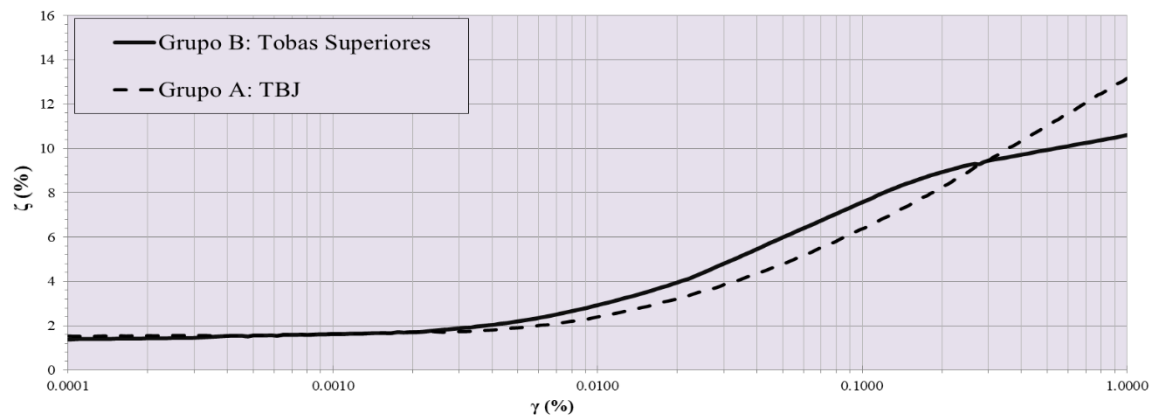


Efecto de sitio: Métodos analíticos

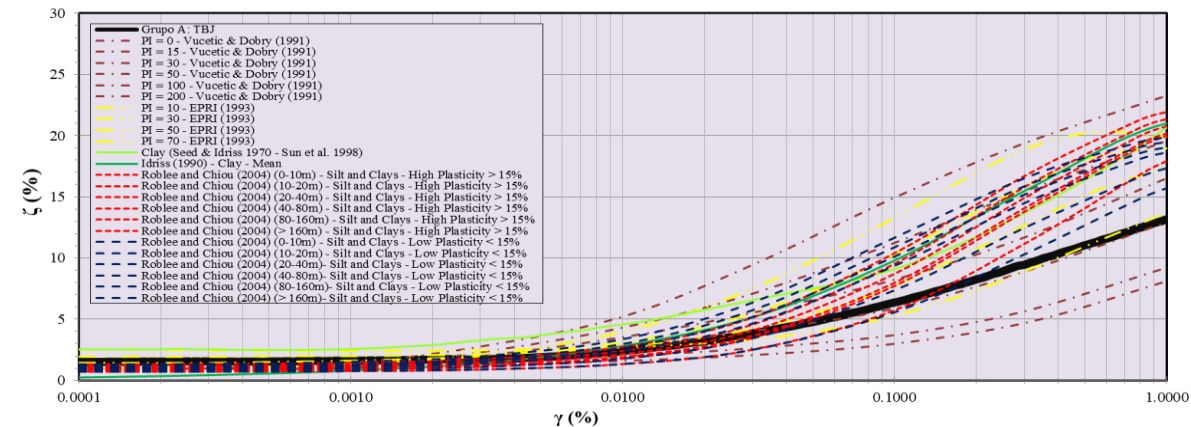
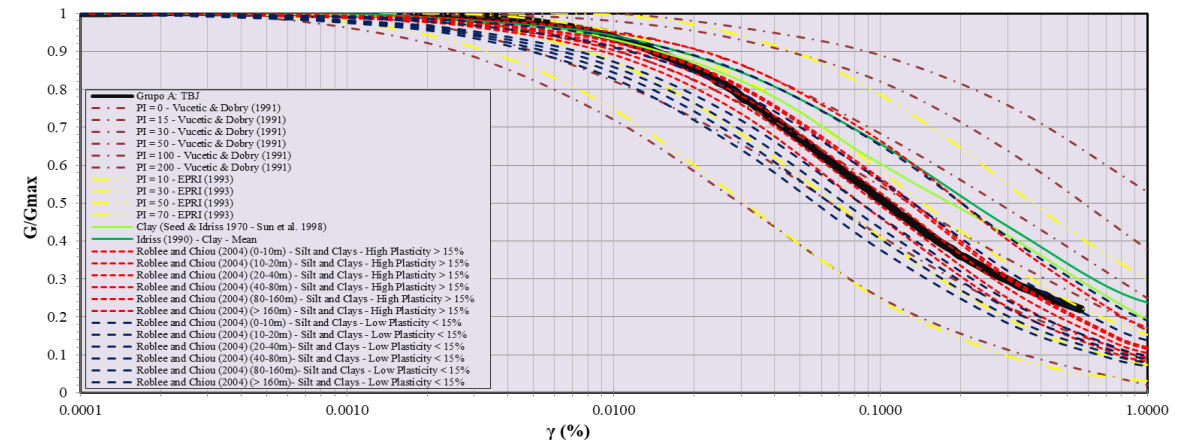
Metodología de análisis: Paso #3

III. Investigación bibliográfica, selección de curvas dinámicas empíricas desde un punto de vista geotécnico y ajuste a modelos de curvas genéricas.

Curvas extraídas de estudio ITALTEKNA Cons.



Curvas que más se ajustan a las curvas de TBJ.

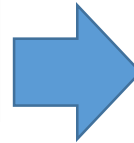
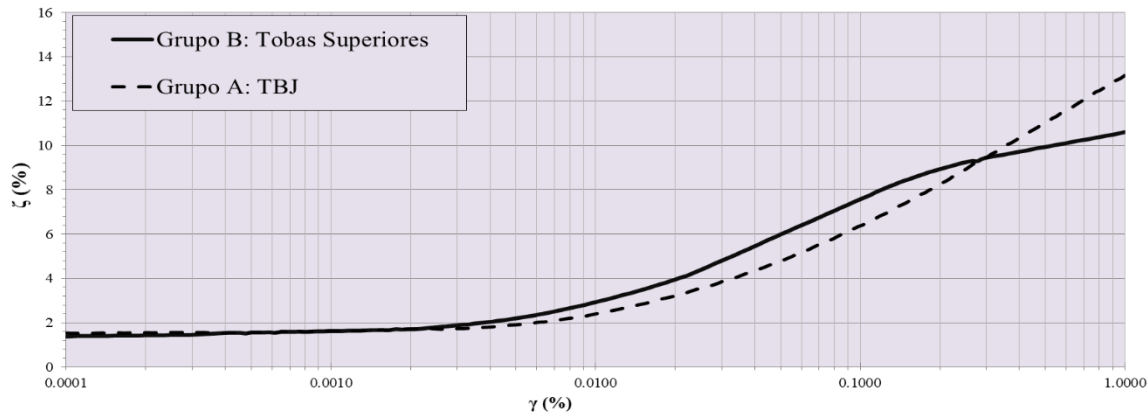
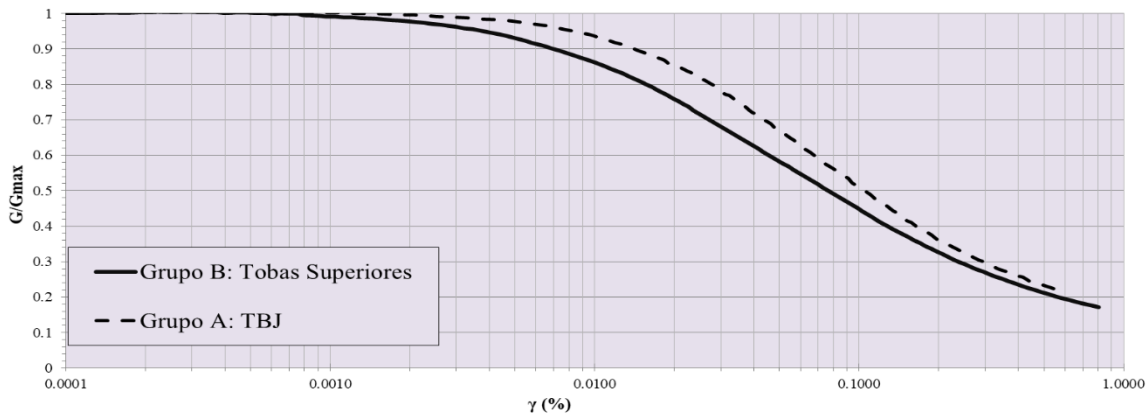


Efecto de sitio: Métodos analíticos

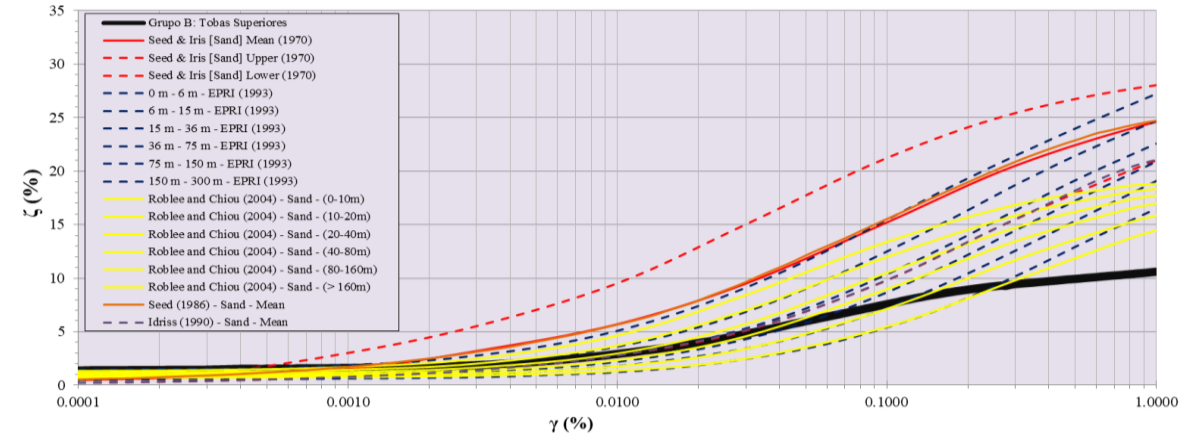
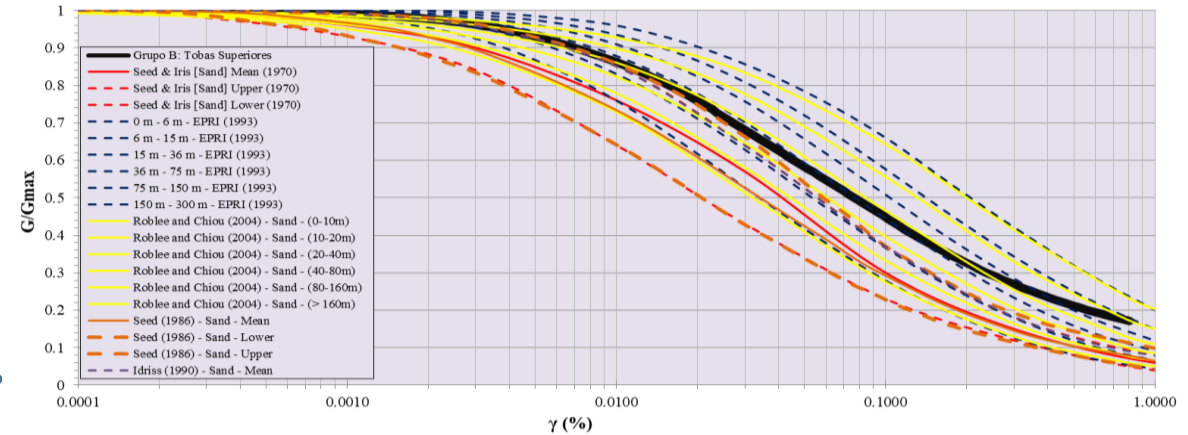
Metodología de análisis: Paso #3

III. Investigación bibliográfica, selección de curvas dinámicas empíricas desde un punto de vista geotécnico y ajuste a modelos de curvas genéricas.

Curvas extraídas de estudio ITALTEKNA Cons.



Curvas que más se ajustan a las curvas de Tobas Sup.



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #3

III. Investigación bibliográfica, selección de curvas dinámicas empíricas desde un punto de vista geotécnico y ajuste a modelos de curvas genéricas.

Modelo de Curvas de Darendeli (2001). Aplicable para todo tipo de suelos

Input Parameters

Plasticity Index (PI)	40 %
Mean Effective Confining Pressure (σ'_m)	3.5 atm
Overconsolidation Ratio (OCR)	1
Loading Frequency (frq)	1
Number of Loading Cycles (N)	10

Intermediate Calculated Parameters

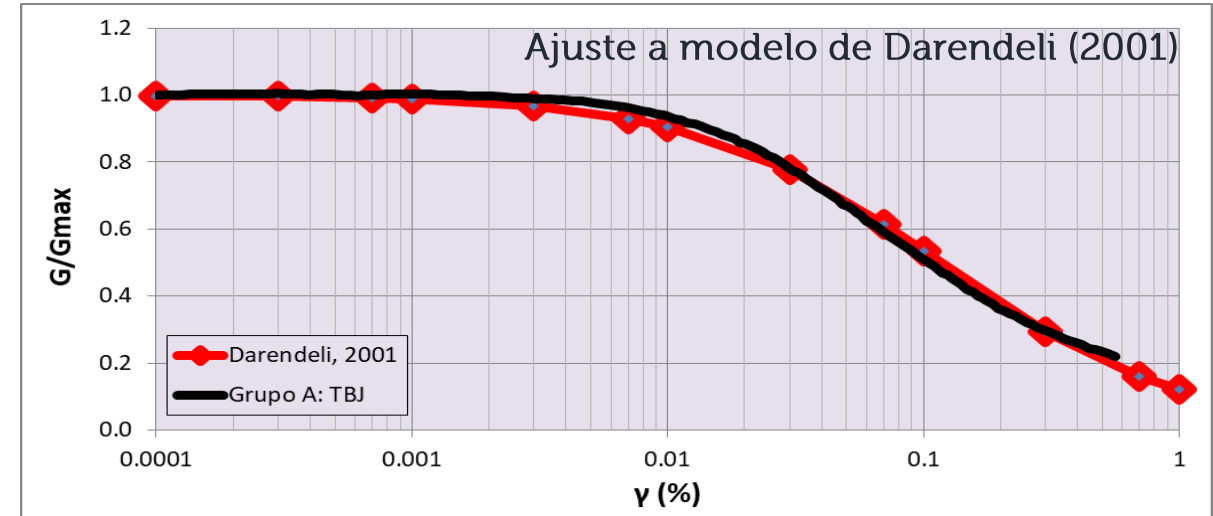
Reference Strain (γ_r)	0.1163367%
Curvature Coefficient (a)	0.9190
Scaling Coefficient (b)	0.619775265
Small Strain Material Damping Ratio (D_{min})	0.916726119%
C1	1.022199878
C2	-0.00676184
C3	6.15195E-05

Results

γ	G/G _{max}	D _{masing, a=1.0}	D _{masing}	D _{adjusted}
0.0001	0.9985	0.0182	0.0186	0.9283
0.0003	0.9958	0.0547	0.0558	0.9513
0.0007	0.9910	0.1273	0.1300	0.9972
0.001	0.9875	0.1816	0.1854	1.0315
0.003	0.9665	0.5403	0.5503	1.2566
0.007	0.9298	1.2398	1.2570	1.6901
0.01	0.9051	1.7495	1.7680	2.0016
0.03	0.7765	4.8600	4.8152	3.8265
0.07	0.6146	9.9230	9.5376	6.5471
0.1	0.5347	12.9976	12.2789	8.0651
0.3	0.2951	25.6711	22.8256	13.4383
0.7	0.1612	36.7426	31.4812	17.1732
1	0.1216	41.0820	34.8473	18.4116

Parámetros: Índice de plasticidad, presión efectiva de confinamiento, OCR, frecuencia de carga y número de ciclos de carga

Este modelo **es presión dependiente**. Toma en cuenta la variación del esfuerzo efectivo



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #3

III. Investigación bibliográfica, selección de curvas dinámicas empíricas desde un punto de vista geotécnico y ajuste a modelos de curvas genéricas.

Modelo de Curvas de Menq (2003). Aplicable para tipo de suelos arenosos

Input Parameters

Coefficient of Uniformity (C_u)	5
Mean Effective Confining Pressure (σ'_m)	3.5 atm
Median Grain Size (D_{50})	0.08 mm
Number of Loading Cycles (N)	10

Intermediate Calculated Parameters

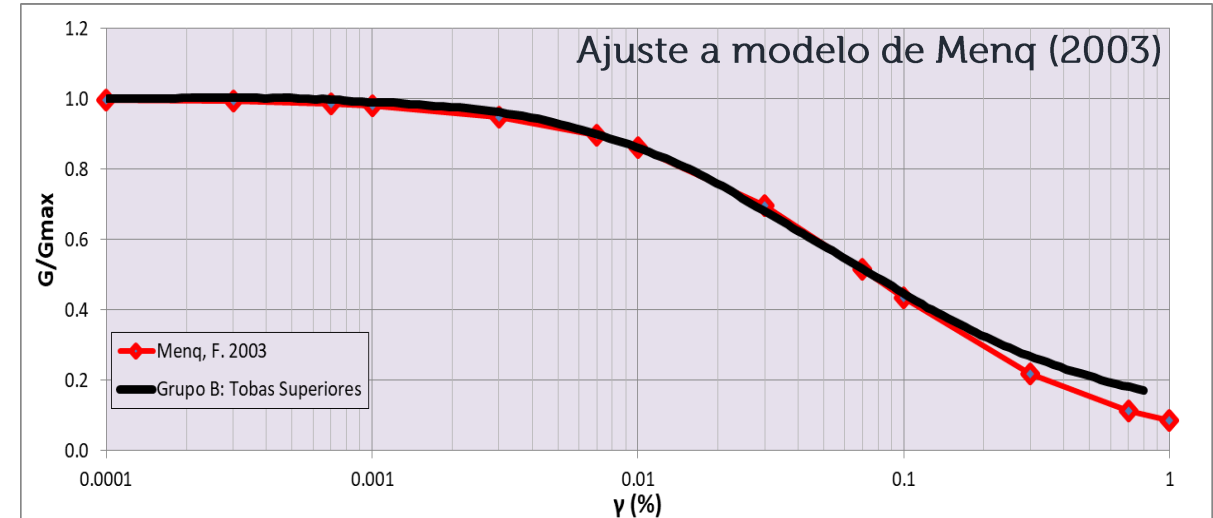
Reference Strain (γ_r)	0.07472846 %
Curvature Coefficient (a)	0.9144
Scaling Coefficient (b)	0.61977526
Small Strain Material Damping Ratio (D_{min})	1.28072774%
c_1	1.023032
c_2	-0.0071136
c_3	6.4811E-05

Results

γ	G/G_{max}	$D_{masing, a=1.0}$	D_{masing}	$D_{adjusted}$
0.0001	0.9976	0.0284	0.0290	1.3126
0.0003	0.9936	0.0850	0.0869	1.3484
0.0007	0.9862	0.1979	0.2021	1.4197
0.001	0.9810	0.2821	0.2880	1.4727
0.003	0.9498	0.8352	0.8495	1.8184
0.007	0.8971	1.8996	1.9181	2.4706
0.01	0.8628	2.6637	2.6758	2.9287
0.03	0.6973	7.1351	6.9608	5.4560
0.07	0.5149	13.8257	12.9556	8.8085
0.1	0.4338	17.6017	16.1566	10.5057
0.3	0.2191	31.5033	27.1953	15.7753
0.7	0.1145	42.0729	35.2767	18.8980
1	0.0853	45.9153	38.2494	19.8289

Parámetros: Coeficiente de uniformidad, presión efectiva de confinamiento, Tamaño de grano (D_{50}) y número de ciclos de carga

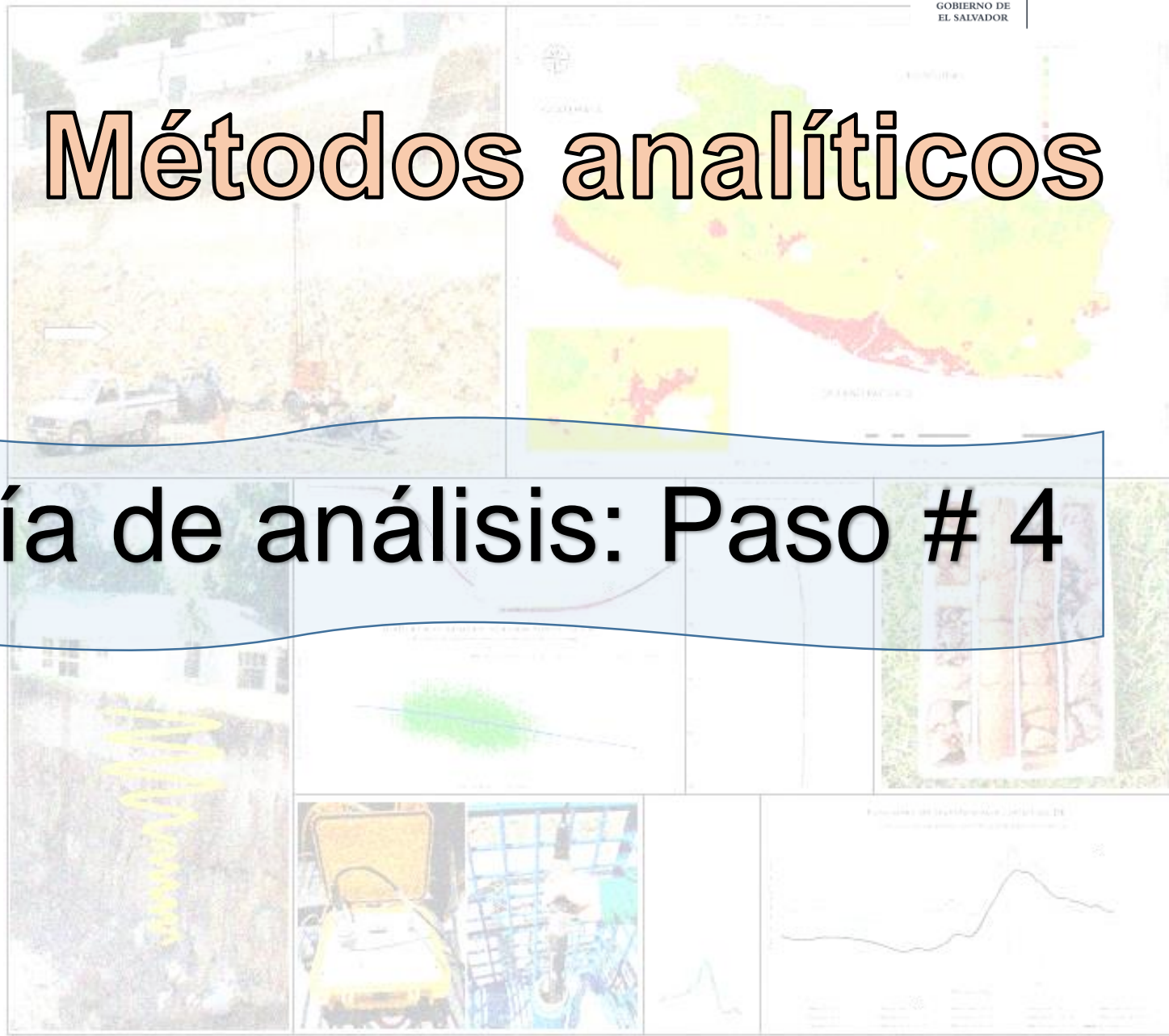
Este modelo **es presión dependiente**. Toma en cuenta la variación del esfuerzo efectivo



Efecto de sitio: Métodos analíticos



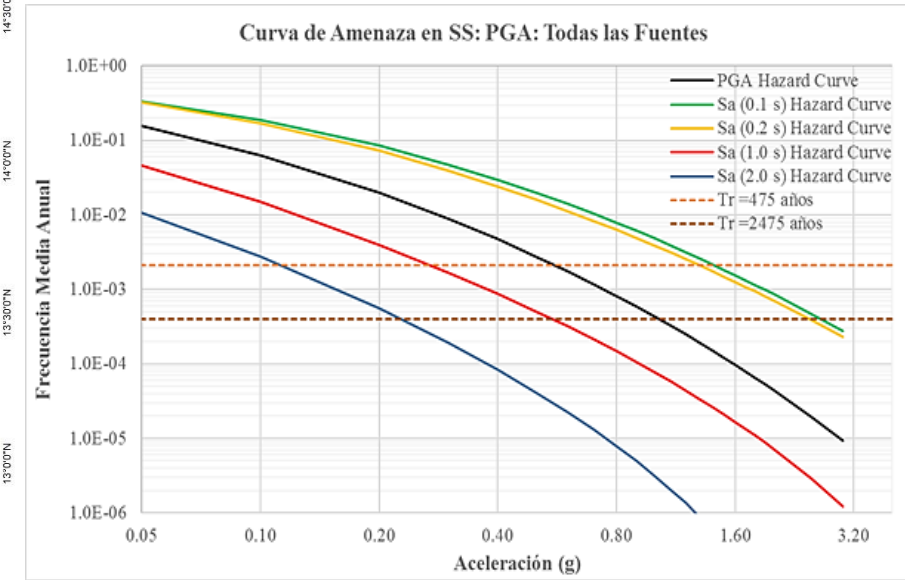
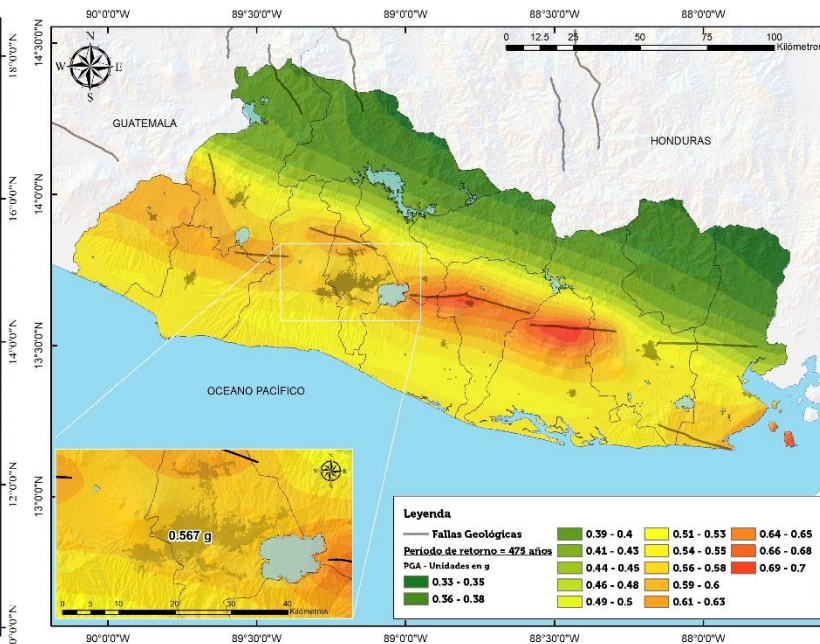
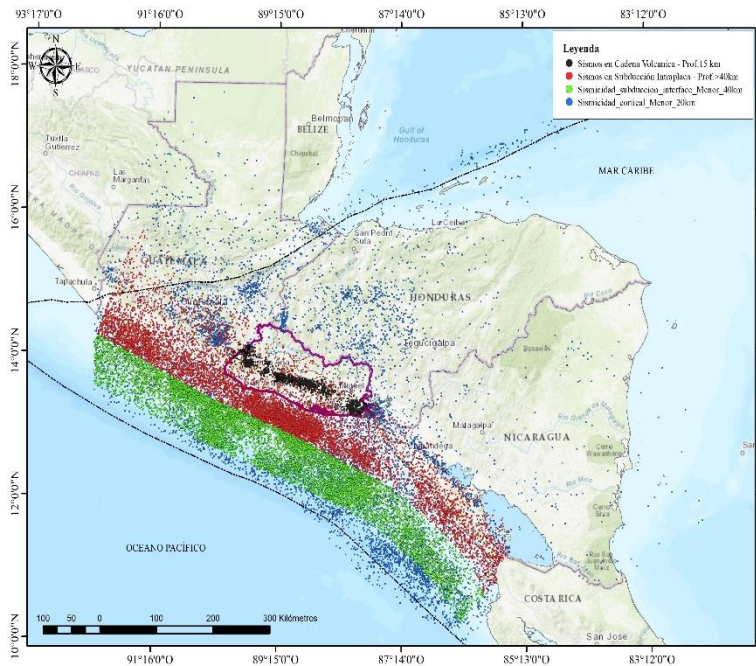
Metodología de análisis: Paso # 4



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: **Paso #4**

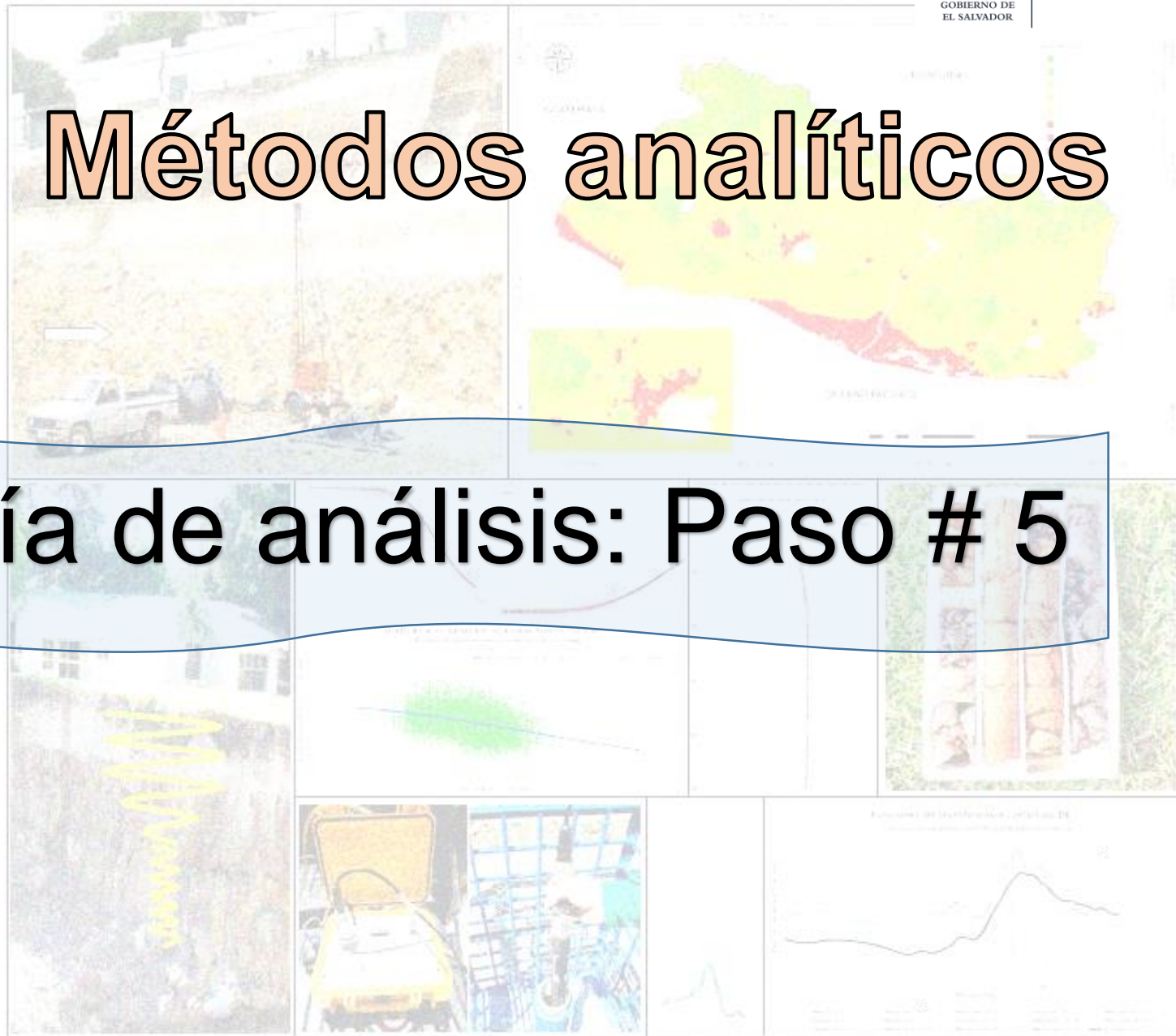
IV. Evaluación probabilística de amenaza sísmica en suelo firme a nivel nacional para 7 períodos de retorno: 17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años; y 14 medidas de intensidad: PGA, SA(0.1 seg ... 4.0 seg)



Efecto de sitio: Métodos analíticos



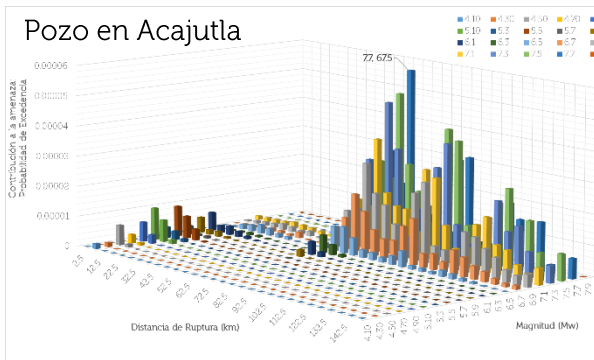
Metodología de análisis: Paso # 5



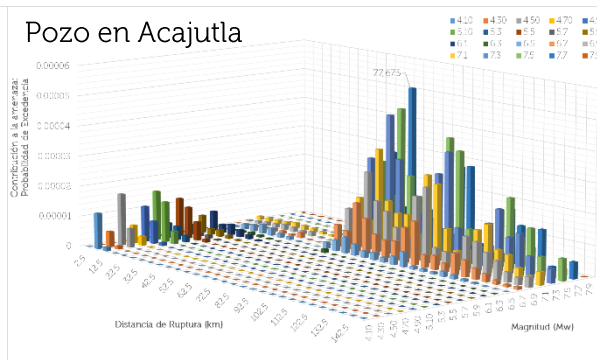
Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #5

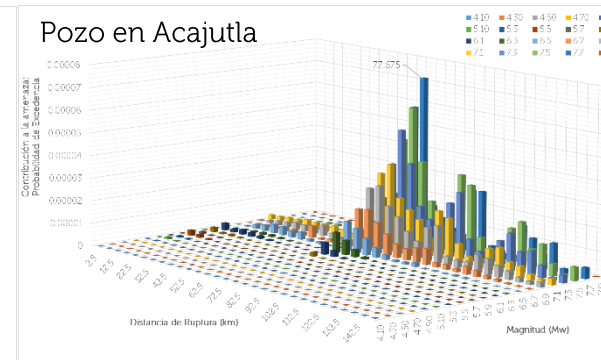
V. Desagregación sísmica para las 2 fuentes sísmicas: **Cortical** y **Subducción Intraplaca**; en ubicación de 15 pozos, para los 7 PR y solamente 4 medidas de intensidad.



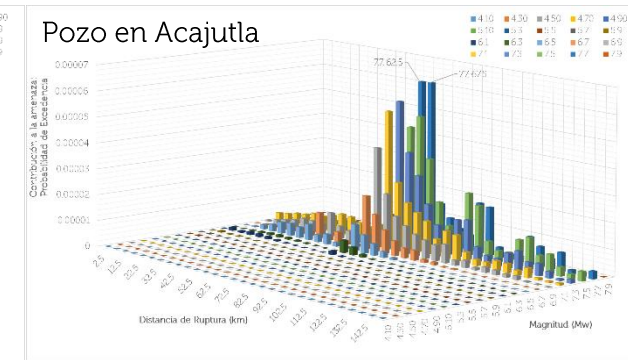
PGA= 0.01 seg



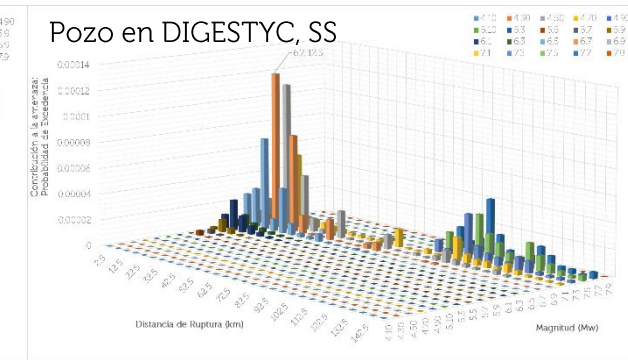
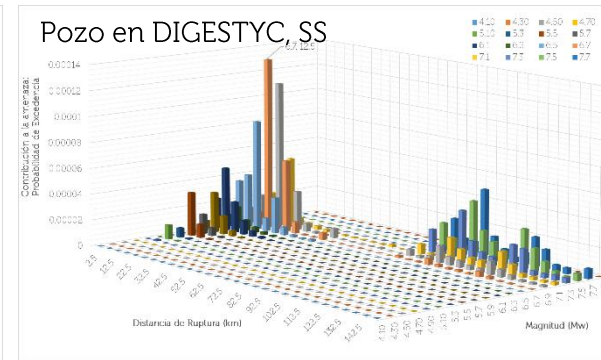
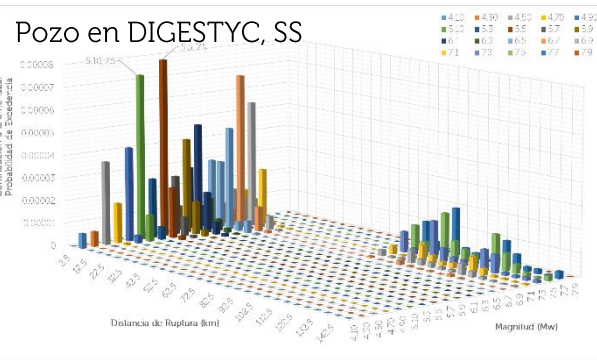
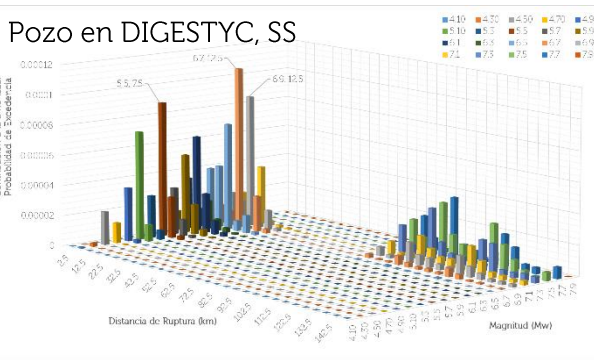
SA(0.1333 seg)



SA(0.50 seg)



SA(1.50 seg)



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #5

V. Desagregación sísmica en ubicación de 15 pozos

Tabla 9. Contribuciones por fuente sísmica a la peligrosidad en 16 sitios de pozos

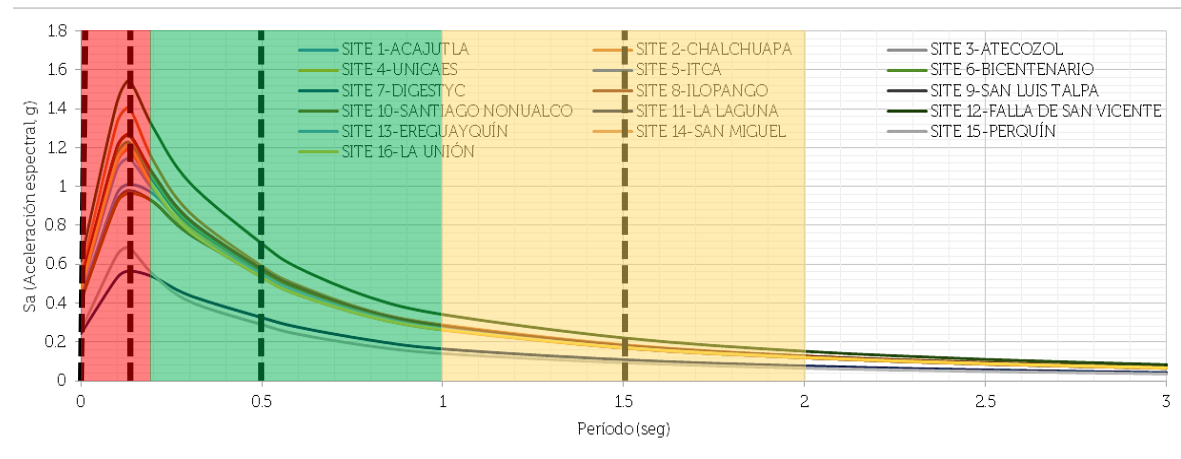
Medida de intensidad	SITIO 1: ACAJUTLA			SITIO 7: DIGESTYC			SITIO 13: EREGUAYQUÍN		
	Fuentes corticales	Fuente subducción interfase	Fuente subducción intraplaca	Fuentes corticales	Fuente subducción interfase	Fuente subducción intraplaca	Fuentes corticales	Fuente subducción interfase	Fuente subducción intraplaca
PGA	8 %	10 %	82 %	64 %	0 %	36 %	53 %	0 %	46 %
SA (0.1333 s)	14 %	4 %	82 %	64 %	11 %	25 %	65 %	0 %	35 %
SA (0.5 s)	8 %	33 %	58 %	59 %	4 %	36 %	52 %	7 %	41 %
SA (0.15 s)	27 %	39 %	33 %	70 %	8 %	22 %	66 %	11 %	24 %
SITIO 2: CHALCHUAPA									
PGA	73 %	0 %	27 %	63 %	0 %	37 %	64 %	0 %	36 %
SA (0.1333 s)	84 %	0 %	16 %	75 %	0 %	25 %	76 %	0 %	24 %
SA (0.5 s)	68 %	2 %	30 %	59 %	4 %	37 %	61 %	4 %	36 %
SA (0.15 s)	78 %	5 %	18 %	70 %	8 %	22 %	75 %	6 %	20 %
SITIO 3: ATECOZOL									
PGA	48 %	1 %	51 %	17 %	4 %	79 %	43 %	0 %	57 %
SA (0.1333 s)	62 %	0 %	38 %	24 %	2 %	75 %	59 %	0 %	41 %
SA (0.5 s)	41 %	11 %	48 %	21 %	21 %	58 %	51 %	0 %	49 %
SA (0.15 s)	57 %	16 %	28 %	29 %	45 %	26 %	77 %	0 %	23 %
SITIO 4: UNICAES									
PGA	66 %	0 %	34 %	11 %	6 %	83 %	69 %	0 %	31 %
SA (0.1333 s)	79 %	0 %	21 %	16 %	3 %	81 %	80 %	0 %	20 %
SA (0.5 s)	62 %	3 %	35 %	14 %	27 %	60 %	68 %	3 %	29 %
SA (0.15 s)	76 %	5 %	19 %	32 %	33 %	35 %	81 %	4 %	15 %
SITIO 5: ITCA									
PGA	53 %	0 %	47 %	17 %	0 %	83 %	17 %	0 %	83 %
SA (0.1333 s)	66 %	0 %	34 %	21 %	0 %	79 %	21 %	0 %	79 %
SA (0.5 s)	47 %	8 %	45 %	38 %	2 %	60 %	38 %	2 %	60 %
SA (0.15 s)	61 %	13 %	26 %	72 %	2 %	26 %	72 %	2 %	26 %
SITIO 6: BICENTENARIO									
PGA	57 %	0 %	43 %	85 %	0 %	15 %	85 %	0 %	15 %
SA (0.1333 s)	70 %	0 %	30 %	91 %	0 %	9 %	91 %	0 %	9 %
SA (0.5 s)	51 %	7 %	42 %	81 %	1 %	18 %	81 %	1 %	18 %
SA (0.15 s)	64 %	11 %	25 %	83 %	4 %	13 %	83 %	4 %	13 %
SITIO 8: AEROPUERTO DE ILOPANGO									
PGA	63 %	0 %	37 %	17 %	4 %	79 %	43 %	0 %	57 %
SA (0.1333 s)	75 %	0 %	25 %	24 %	2 %	75 %	59 %	0 %	41 %
SA (0.5 s)	59 %	4 %	37 %	21 %	21 %	58 %	51 %	0 %	49 %
SA (0.15 s)	70 %	8 %	22 %	29 %	45 %	26 %	77 %	0 %	23 %
SITIO 9: SAN LUIS TALPA									
PGA	17 %	4 %	79 %	11 %	6 %	83 %	69 %	0 %	31 %
SA (0.1333 s)	24 %	2 %	75 %	16 %	3 %	81 %	80 %	0 %	20 %
SA (0.5 s)	21 %	21 %	58 %	14 %	27 %	60 %	68 %	3 %	29 %
SA (0.15 s)	29 %	45 %	26 %	32 %	33 %	35 %	81 %	4 %	15 %
SITIO 10: SANTIAGO NONUALCO									
PGA	11 %	6 %	83 %	17 %	0 %	83 %	17 %	0 %	83 %
SA (0.1333 s)	16 %	3 %	81 %	21 %	0 %	79 %	21 %	0 %	79 %
SA (0.5 s)	14 %	27 %	60 %	38 %	2 %	60 %	38 %	2 %	60 %
SA (0.15 s)	32 %	33 %	35 %	72 %	2 %	26 %	72 %	2 %	26 %
SITIO 11: LA LAGUNA									
PGA	17 %	0 %	83 %	17 %	0 %	83 %	17 %	0 %	83 %
SA (0.1333 s)	21 %	0 %	79 %	21 %	0 %	79 %	21 %	0 %	79 %
SA (0.5 s)	38 %	2 %	60 %	38 %	2 %	60 %	38 %	2 %	60 %
SA (0.15 s)	72 %	2 %	26 %	72 %	2 %	26 %	72 %	2 %	26 %
SITIO 12: FALLA DE SAN VICENTE									
PGA	85 %	0 %	15 %	85 %	0 %	15 %	85 %	0 %	15 %
SA (0.1333 s)	91 %	0 %	9 %	91 %	0 %	9 %	91 %	0 %	9 %
SA (0.5 s)	81 %	1 %	18 %	81 %	1 %	18 %	81 %	1 %	18 %
SA (0.15 s)	83 %	4 %	13 %	83 %	4 %	13 %	83 %	4 %	13 %
SITIO 14: SAN MIGUEL									
PGA	64 %	0 %	36 %	63 %	0 %	37 %	64 %	0 %	36 %
SA (0.1333 s)	76 %	0 %	24 %	75 %	0 %	25 %	76 %	0 %	24 %
SA (0.5 s)	61 %	4 %	36 %	59 %	4 %	37 %	61 %	4 %	36 %
SA (0.15 s)	75 %	6 %	20 %	70 %	8 %	22 %	75 %	6 %	20 %
SITIO 15: PERQUÍN									
PGA	43 %	0 %	57 %	43 %	0 %	57 %	43 %	0 %	57 %
SA (0.1333 s)	59 %	0 %	41 %	59 %	0 %	41 %	59 %	0 %	41 %
SA (0.5 s)	51 %	0 %	49 %	51 %	0 %	49 %	51 %	0 %	49 %
SA (0.15 s)	77 %	0 %	23 %	77 %	0 %	23 %	77 %	0 %	23 %
SITIO 16: LA UNIÓN									
PGA	69 %	0 %	31 %	69 %	0 %	31 %	69 %	0 %	31 %
SA (0.1333 s)	80 %	0 %	20 %	80 %	0 %	20 %	80 %	0 %	20 %
SA (0.5 s)	68 %	3 %	29 %	68 %	3 %	29 %	68 %	3 %	29 %
SA (0.15 s)	81 %	4 %	15 %	81 %	4 %	15 %	81 %	4 %	15 %

Para 7 Períodos de retorno = 17, 37, 73, 174, 475, 975, 2475 años

Con el objetivo de abarcar múltiples niveles de aceleración, y enfocarse en el de 2475 años para el terremoto máximo creíble

4 períodos estructurales $T_e = (PGA=0.01, 0.1333, 0.5 \text{ y } 1.5 \text{ seg.})$

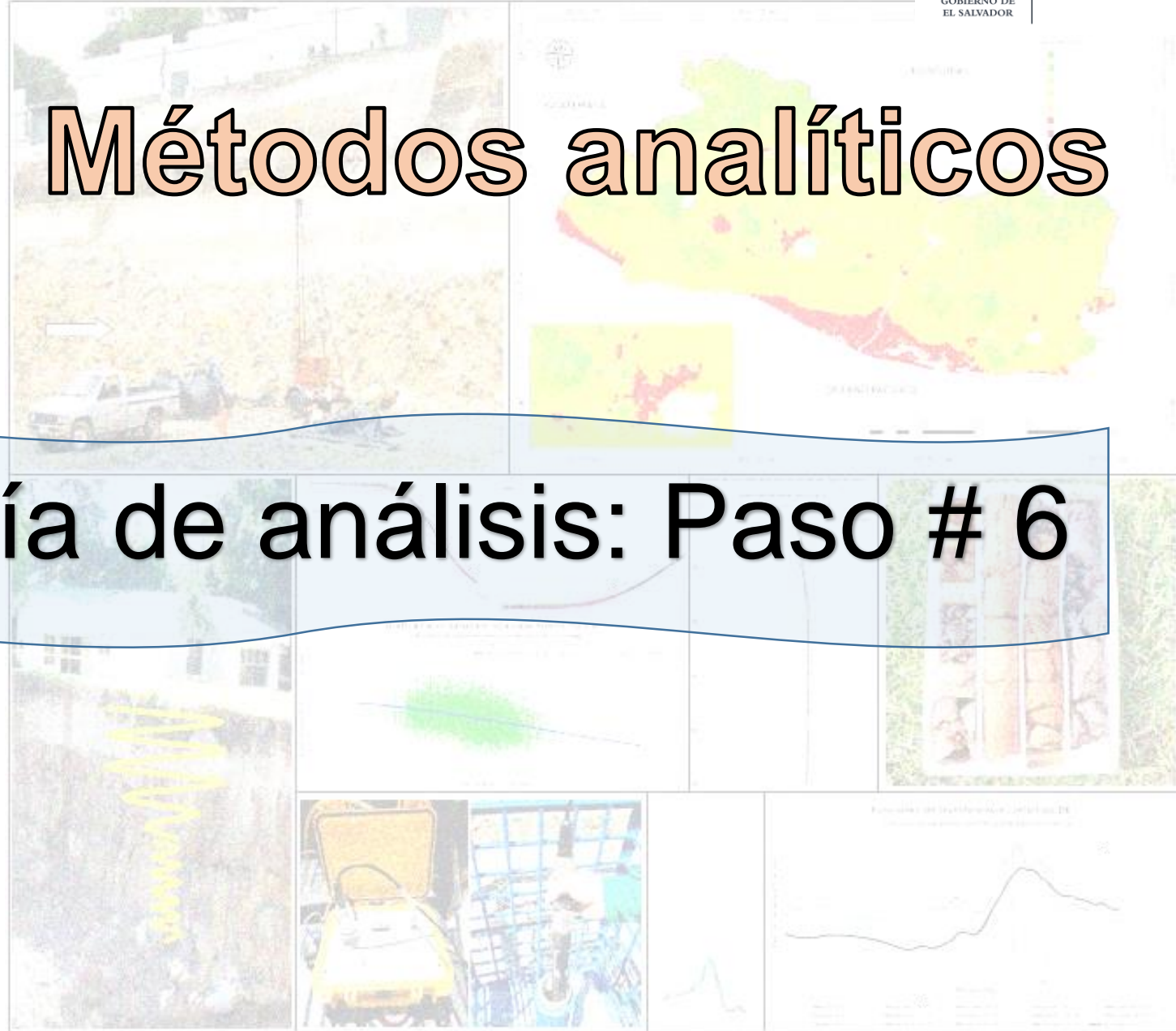
Con el objetivo de abarcar las porciones de **alta (5-10 Hz)**, **media (1-5 Hz)** y **baja frecuencia (0.5-1 Hz)** del espectro de amenaza uniforme en roca.



Efecto de sitio: Métodos analíticos



Metodología de análisis: Paso # 6

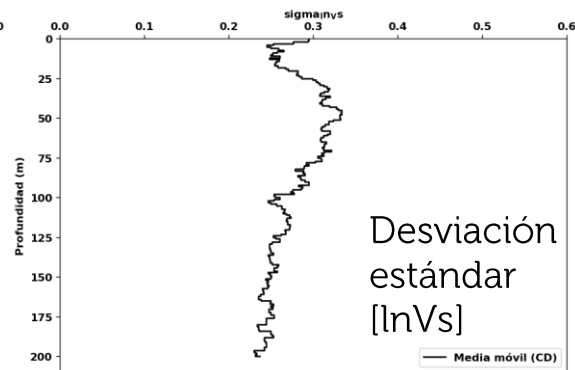
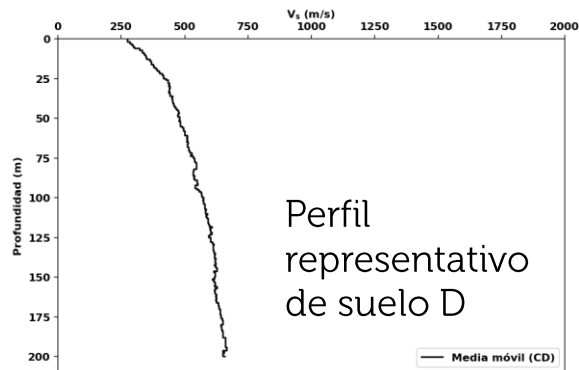
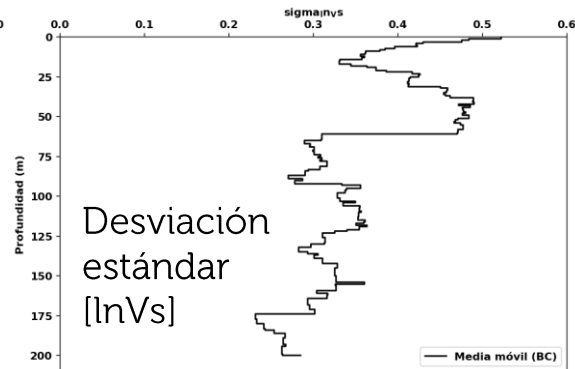
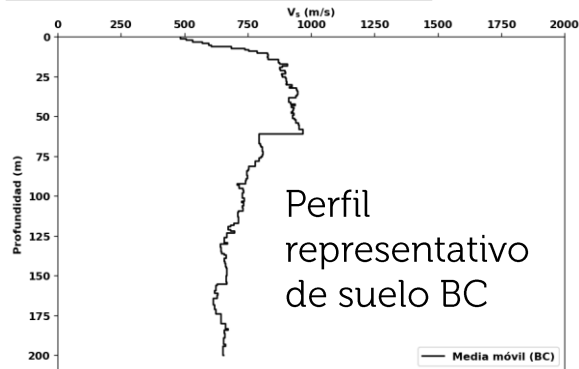


Efecto de sitio: Métodos analíticos

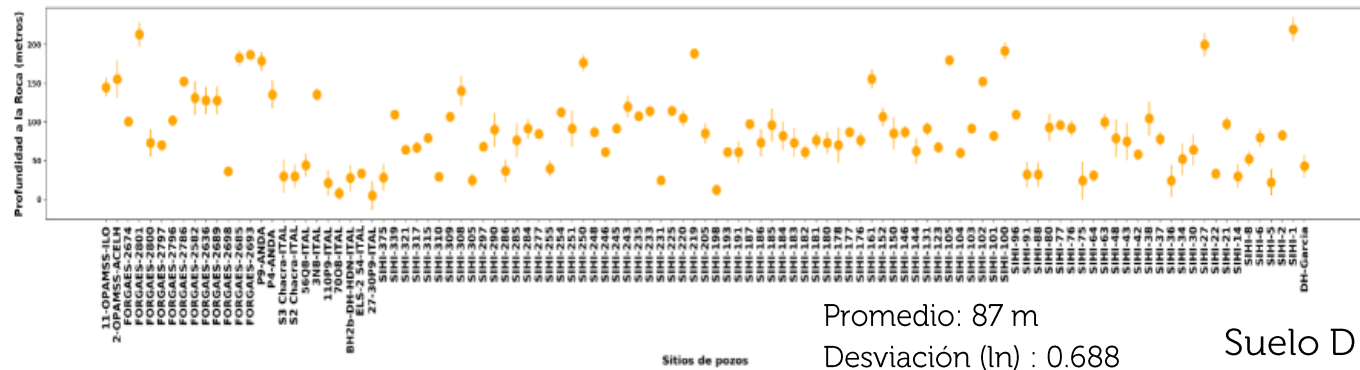
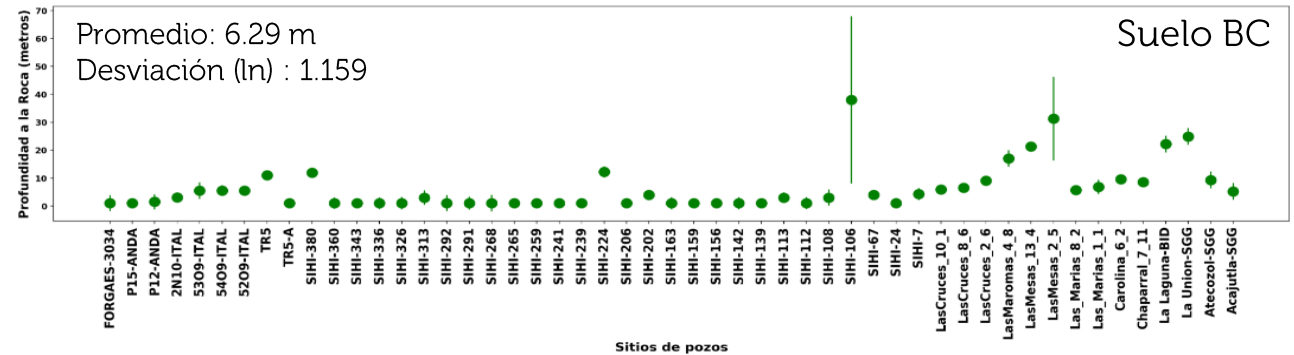
Metodología de análisis: Paso #6

VI. Caracterización estadística de propiedades de suelos a variar: a) Velocidad de corte, b) Espesores de capas, c) Prof. a la roca, d) Densidad bulk y e) Curvas dinámicas.

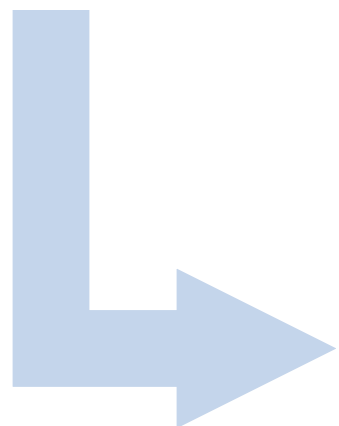
Velocidad de Corte



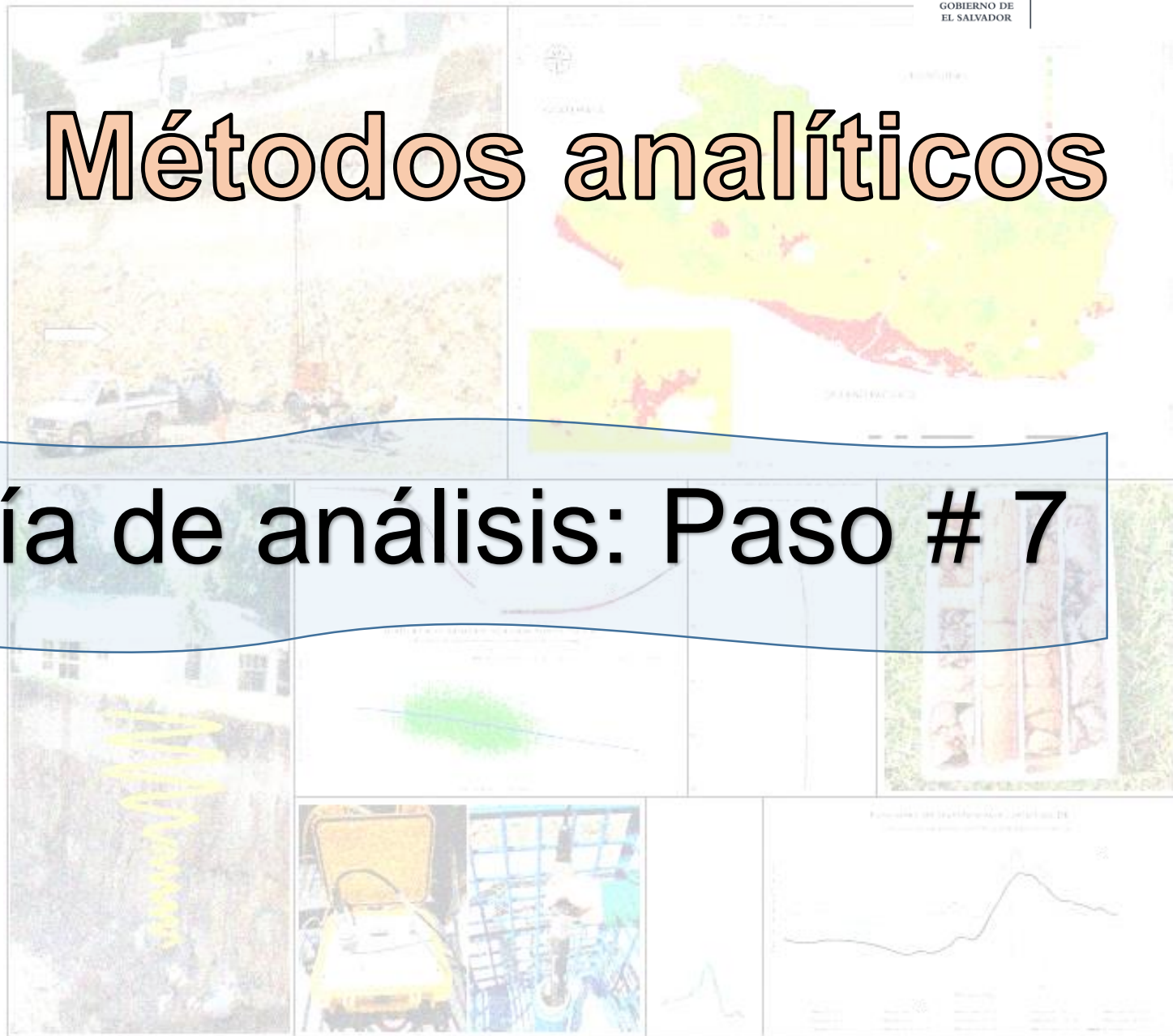
Profundidad a la Roca



Efecto de sitio: Métodos analíticos



Metodología de análisis: Paso # 7



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #7

VII. Variación de propiedades de suelo *vía simulaciones MonteCarlo.*

El objetivo **es estimar las propiedades estadísticas** de la respuesta de un sistema complejo y **considerar las principales fuentes de incertidumbre** asociadas a la determinación de las propiedades de un suelo (variables aleatorias).

Las simulaciones de Monte Carlo estiman la respuesta generando parámetros del sistema en base a **distribuciones estadísticas definidas**

Las distribuciones **Normal y Logarítmica Normal** se usan típicamente, ya que se pueden describir fácilmente usando un media (μ) y desviación estándar (σ)

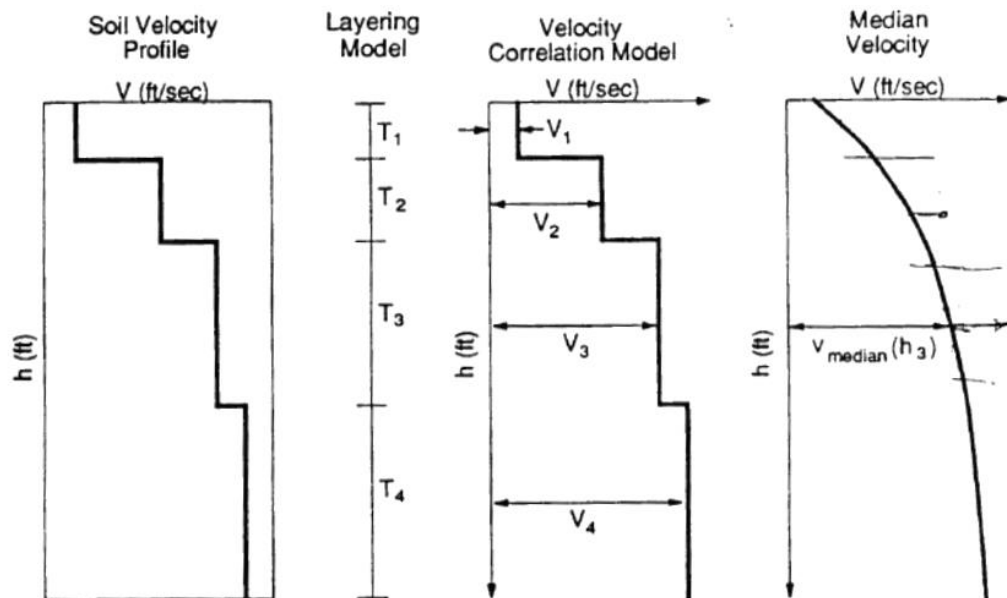


Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #7

VII. Variación de propiedades de suelo **vía simulaciones MonteCarlo.**

a) Caracterización de la **distribución estadística**, **incertidumbre** y **correlación** entre los **espesores de capas** y las **velocidades (V_s)**



Fuente: Kottke, A. et al, 2013

❑ Modelo de estratificación de capas (Toro1995)

Se calcula la tasa de transición de capa promedio en Prof. Representa el número de límites de capa por metro. Se modela como proceso de **Poisson no homogéneo**.

❑ Modelo de velocidades de capas (Toro1995)

Describe la variación estadística (mediante una **distribución Log-Normal**) de la V_s dentro de cada capa y asigna las V_s a las capas en el perfil simulado.

❑ Modelo de correlación entre capas (Toro1995)

Existe correlación entre capas adyacentes respecto a su velocidad, a medida se va profundizando. Excepción: Lavas intercaladas entre sedimentos.

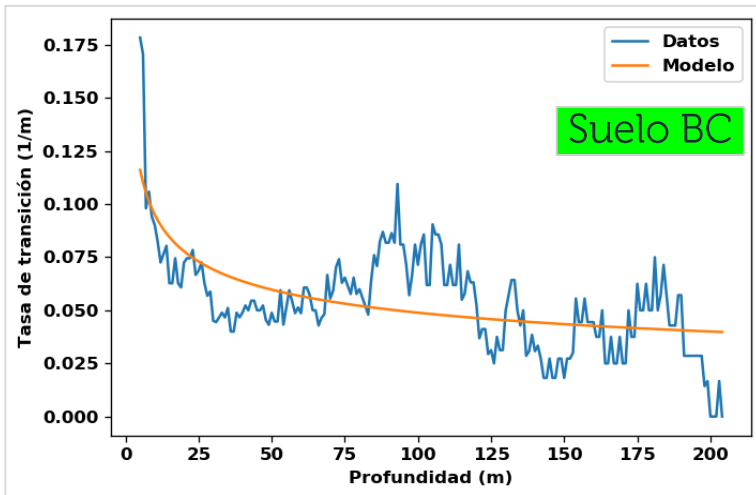
Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #7

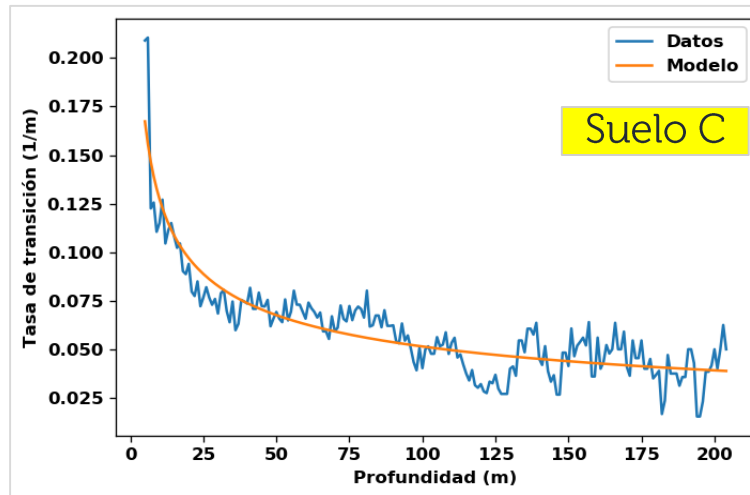
VII. Variación de propiedades de suelo vía simulaciones MonteCarlo.

Se determinan nuevos coeficientes para los perfiles de suelo compilados para cada zona homogénea de El Salvador. Toro95 lo hizo para perfiles de California.

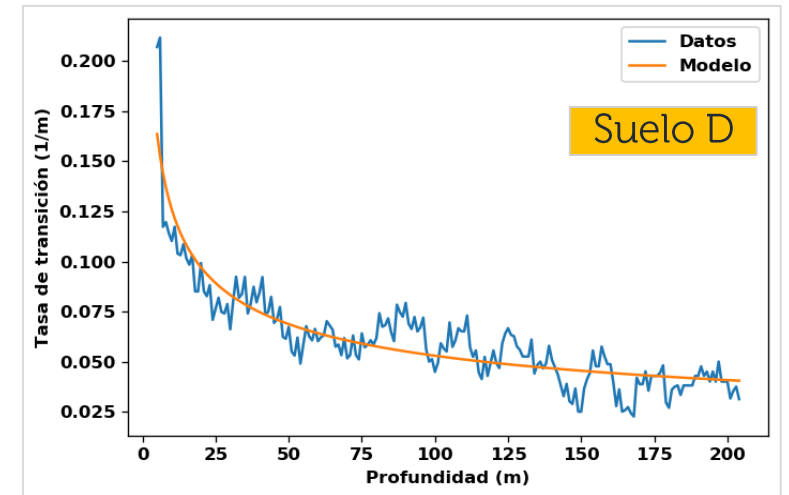
$$\lambda_{BC} = 0.185 \cdot (h + 6.383 \times 10^{-9})^{-0.289}$$



$$\lambda_C = 0.315 \cdot (h + 3.743 \times 10^{-9})^{-0.394}$$



$$\lambda_D = 0.30 \cdot (h + 8.108 \times 10^{-9})^{-0.377}$$



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #7

VII. Variación de propiedades de suelo vía simulaciones MonteCarlo.

Modelo de Darendeli (2001)

Ofrece manejar la incertidumbre en las estimaciones empíricas de las propiedades dinámicas del suelo.

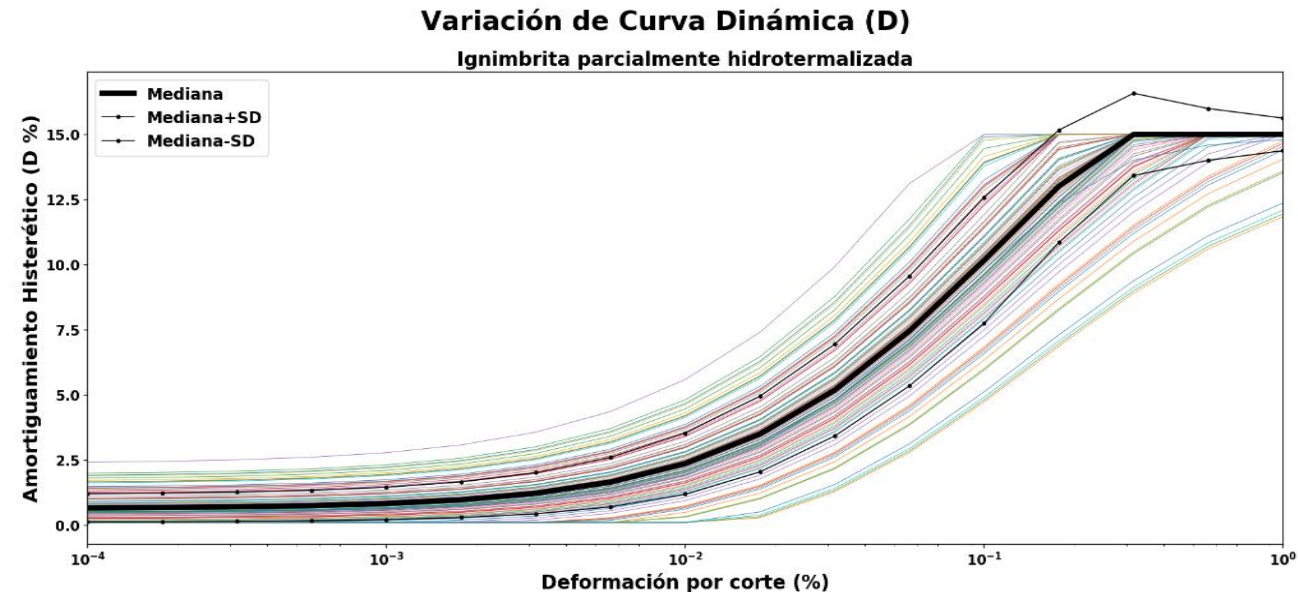
Se modela con una distribución normal truncada. Para evitar valores negativos físicamente imposibles: Deformaciones muy grandes.

$$\sigma_{[G/G_{m\acute{a}x}]} = 0.015 + 0.16 \cdot \sqrt{0.25 - (G/G_{m\acute{a}x} - 0.5)^2}$$

$$\sigma_{[D]} = 0.0067 + 0.78 \cdot \sqrt{D(\%)}$$

Ofrece la correlación existente entre $G/G_{m\acute{a}x}$ y (D). Esta correlación es negativa.

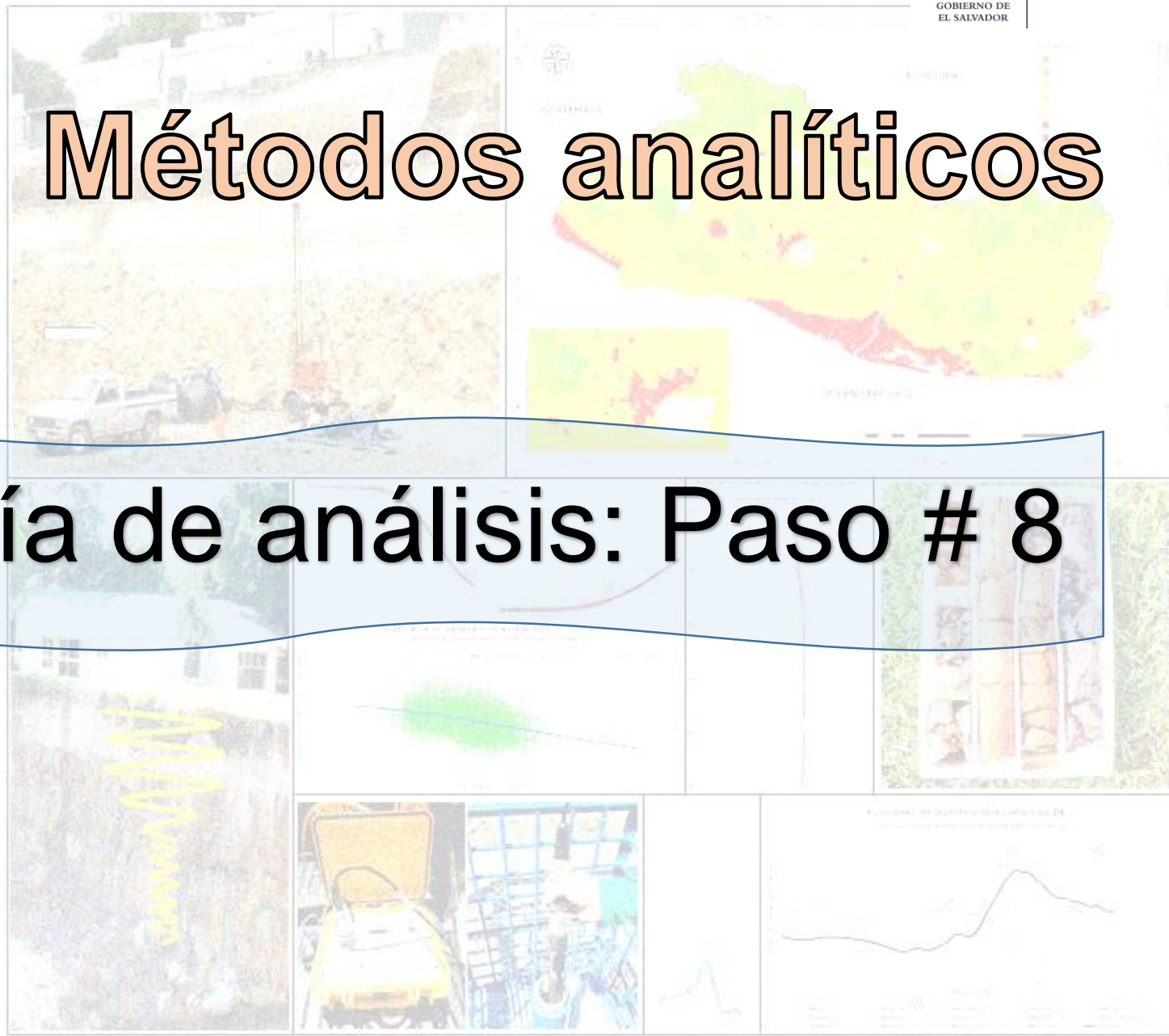
A medida que aumenta la linealidad del sistema, la amortiguación disminuye



Efecto de sitio: Métodos analíticos



Metodología de análisis: Paso # 8



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #8

VIII. Selección de registros acelerográficos provenientes de estaciones cercanas a los 15 sitios de pozos

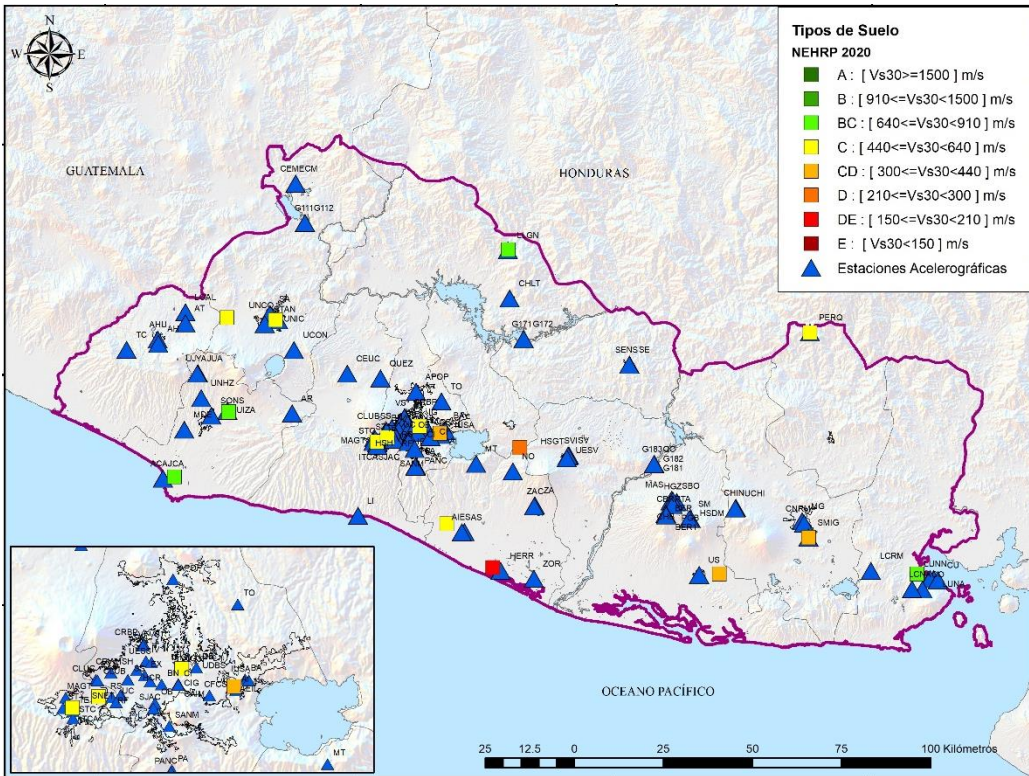
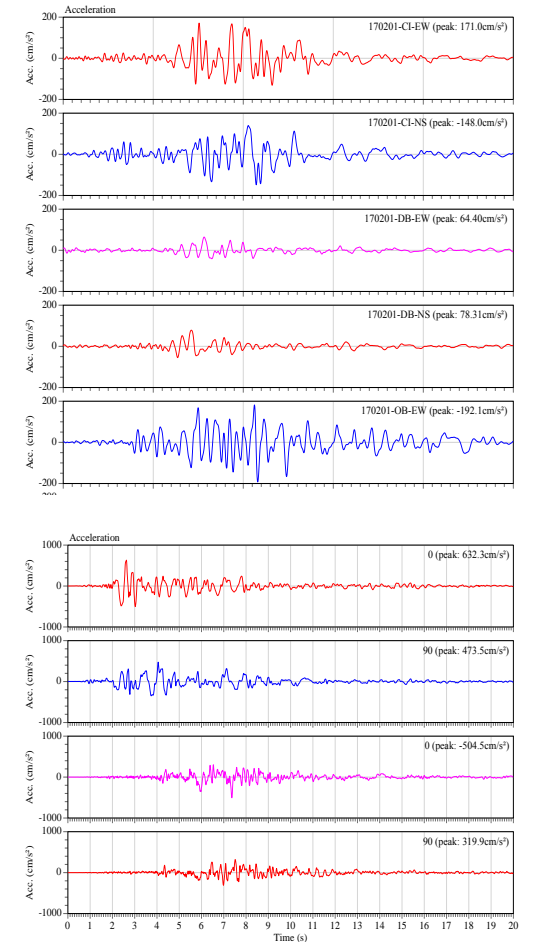


Tabla 12. Número total de registros acelerográficos por fuente sísmica y en cada estación acelerográfica, a ser considerados para el matcheo en cada pozo.

No	Ubicación	Estaciones Acelerográficas seleccionadas	Número de Registros			Total		
			Cortical	Subducción Intraplaca	Sub-total			
1	C.E. Cantón el Zope, Acajutla	ACAJ, CA	8	166	174	24 + 4648	4672	
2	Centro Escolar Ranulfo Castro, Chalchuapa	AT, LOAL, SA, STAN, UNCO, UNIC	4+38+0+6+9 4+48 = 190	0+92+2+8+106 +118 = 326	516	5264 + 7172	12436	
3	Turicentro Atecozol, Izalco	MDE, SONS, UIZA, UNHZ	0+134+0+0 = 134	4+560+6+6 = 576	710	2112 + 16128	18240	
4	Santa Ana, UNICAES	SA, STAN, UNCO, UNIC	0+4+94+48 = 146	2+8+106+118 = 234	380	3942 + 6084	10026	
5	ITCA, Frente a edificio Rectoría, Santa Tecla	HSH, ITCA, ST, TE	2+56+4+6 = 68	2+96+6+54 = 158	226	1848 + 4424	6272	
6	Parque Bicentenario, San Salvador/Antiguo Cuscatlán	CLUB, CLUC, CPRS, RS, UC	44+198+88+4+6 = 340	212+204+182+12+14 = 624	964	9520 + 17360	26880	
7	DIGESTYC, Ciudad de Delgado	CI, IG, IGNS, IV	6+2+24+2 = 34	6+12+145+2 = 165	199	918 + 4424	5342	
8	Aeropuerto de Ilopango	AEIL, AI, BA	32+2+14 = 48	310+8+60 = 378	426	1344 + 10472	11816	
9	Centro Escolar Cantón Teculuya, San Luis Talpa	AIES	24	816	840	24 + 22736	22760	
10	Centro Escolar Caserio San Cristóbal, Santiago Nonualco	HERR	2	88	90	2112	2112	
11	Centro Escolar de La Laguna, Chalatenango	LLGN	18	34	52	232 + 952	1184	
12	Falla de San Vicente	HSGT, MT, SV, UESV	28+0+6+26 = 60	58+6+2+450 = 516	576	1680 + 10320	12000	
13	Centro Escolar de Ereguayquín	SM, US	4+0 = 4	16+4 = 20	24	112 + 400	512	
14	Universidad de El Salvador San Miguel	CNRM, MG, SMIG	28+0+126 = 154	50+2+406 = 458	612	4158 + 9618	13776	
15	Unidad de Salud de Perquín Morazán	PERQ	2	22	24	42 + 440	482	
16	Hospital Nacional de La Unión, La Unión	CO, CU, LCNA, LUNA, LUNN	0+2+292+14 2+0 = 436	2+2+192+146+6 = 348	784	12208 + 6920	19128	
					TOTAL	6597	167,738	



Efecto de sitio: Métodos analíticos



Metodología de análisis: Paso # 9



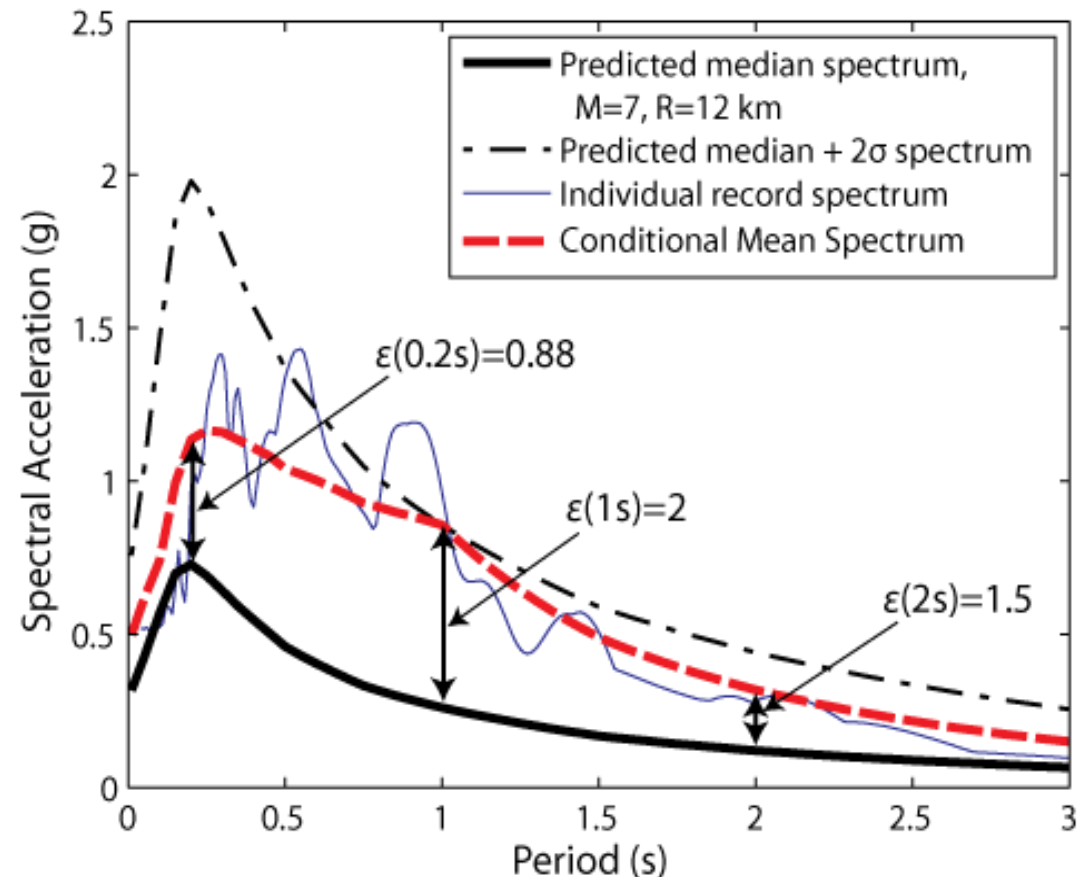
Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: **Paso #9**

IX. Determinación de espectros medios condicionales (CMS) **en suelo firme**, condicionando los 4 períodos: (0.01, 0.1333, 0.5 y 1.5 seg.)

Proporciona una predicción **más realista y menos conservadora** de la respuesta del sistema ante un sismo.

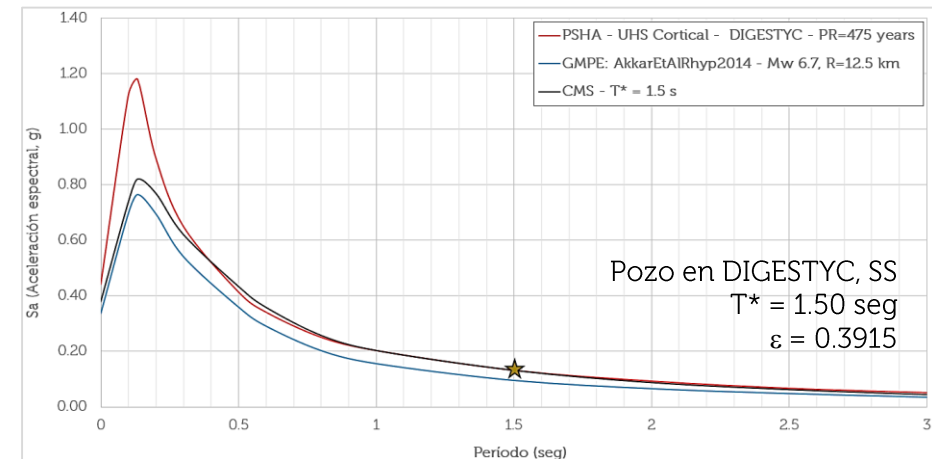
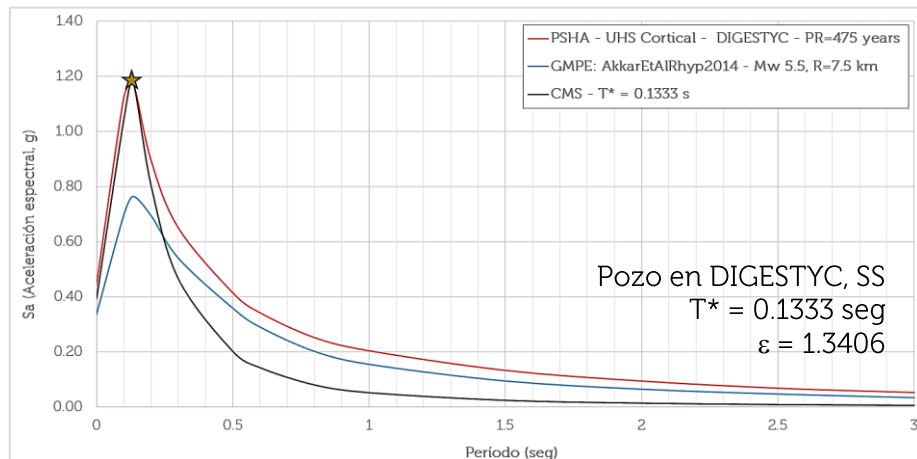
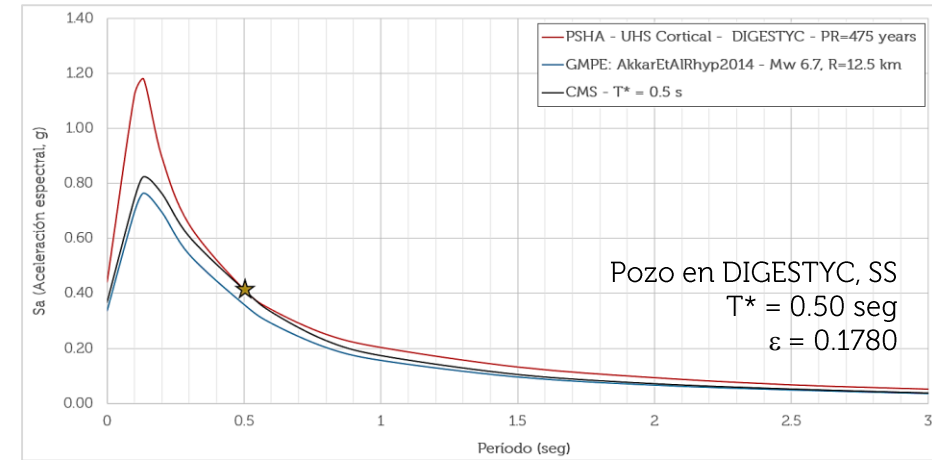
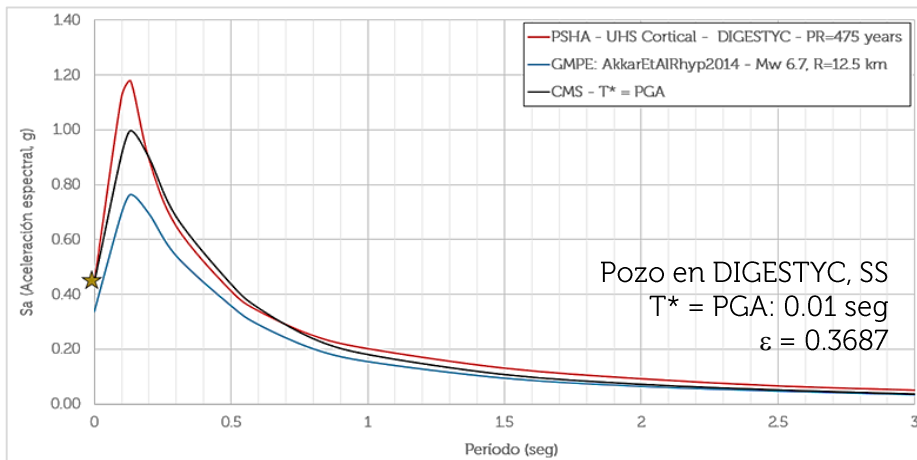
El CMS se ajusta a una aceleración espectral **condicionada a un período de interés**, determinando los valores de otros períodos con factores de correlación.



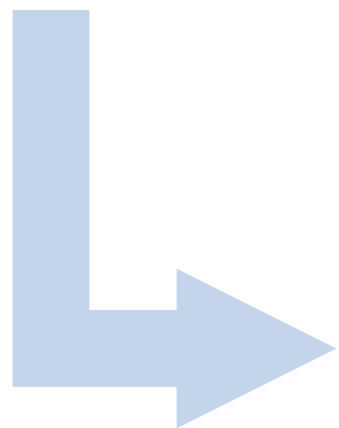
Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #9

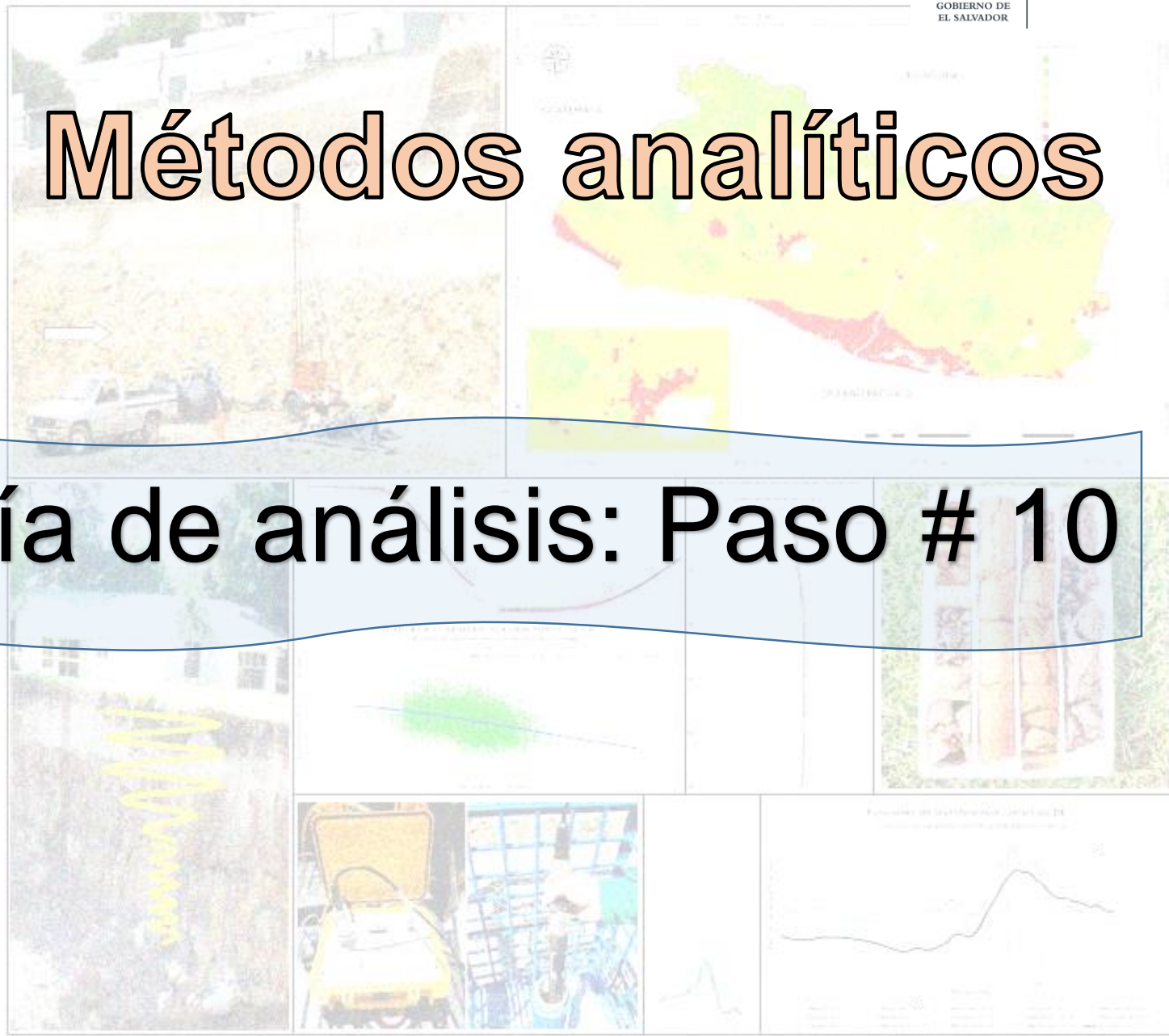
IX. Determinación de espectros medios condicionales (CMS) en suelo firme, condicionando los 4 períodos: (0.01, 0.1333, 0.5 y 1.5 seg.)



Efecto de sitio: Métodos analíticos



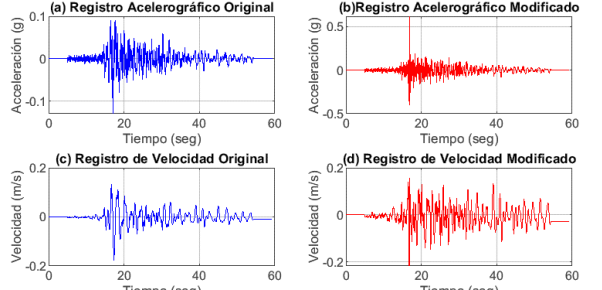
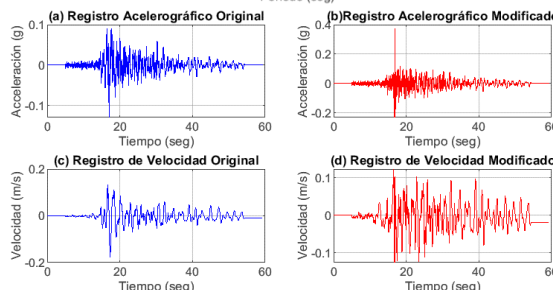
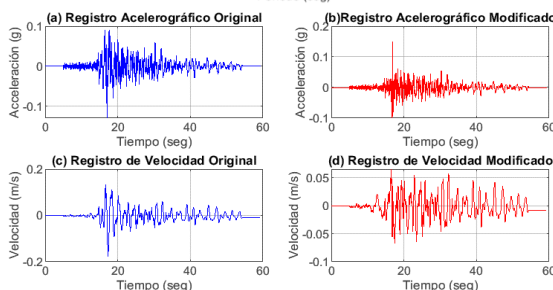
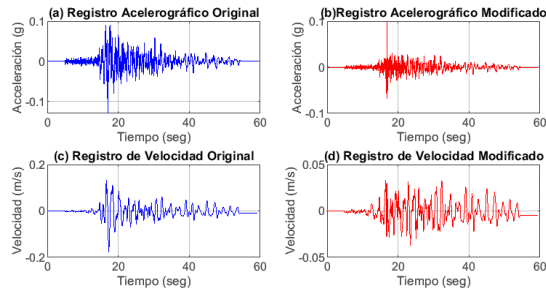
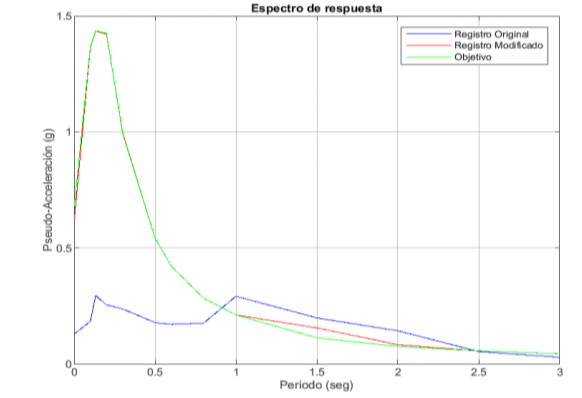
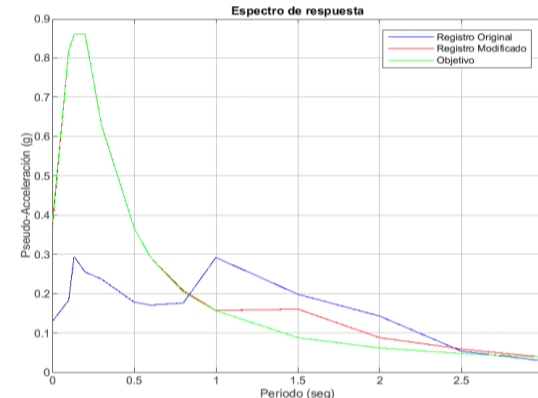
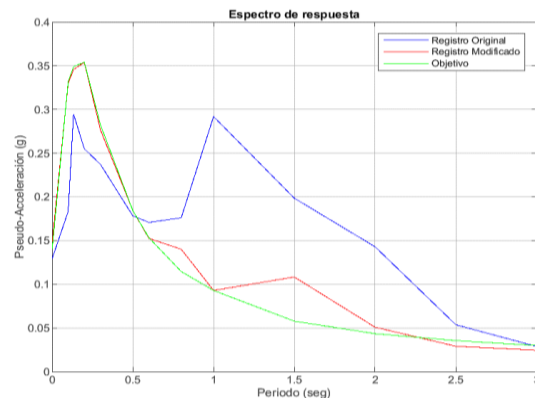
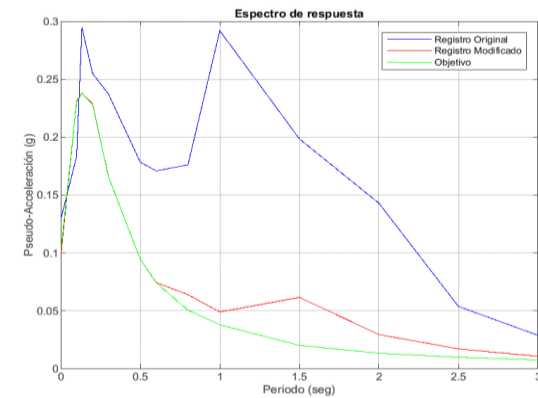
Metodología de análisis: Paso # 10



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #10

X. Matcheo de espectros de respuesta de registros acelerográficos **en superficie** a los espectros CMS **en suelo firme**. Aplicar deconvolución y obtener acelerogramas en suelo firme. Se hizo para 7 PR y 4 períodos estructurales.



Medida de intensidad: PGA
Período de retorno de 37 años
Registro en Acajutla
Sismo intraplaca 13/01/2001 – Mw 7.7

Medida de intensidad: PGA
Período de retorno de 73 años
Registro en Acajutla
Sismo intraplaca 13/01/2001 – Mw 7.7

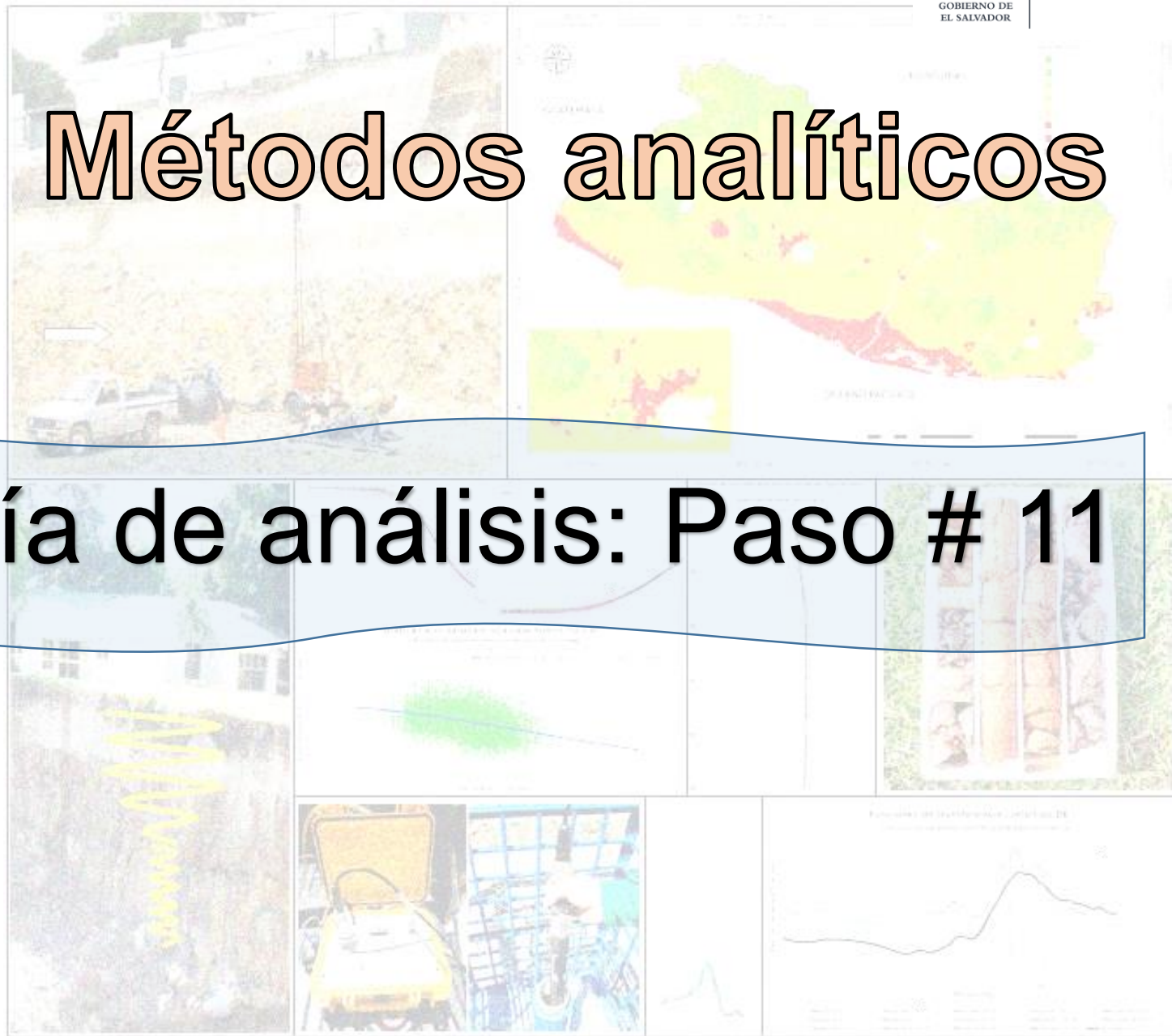
Medida de intensidad: PGA
Período de retorno de 475 años
Registro en Acajutla
Sismo intraplaca 13/01/2001 – Mw 7.7

Medida de intensidad: PGA
Período de retorno de 2475 años
Registro en Acajutla
Sismo intraplaca 13/01/2001 – Mw 7.7

Efecto de sitio: Métodos analíticos



Metodología de análisis: Paso # 11



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #11

XI. Ejecución de modelos analíticos en Strata para Etapa 1 y Etapa 2

Strata utiliza el mismo algoritmo del software SHAKE.

Calcula la respuesta dinámica del sitio de una columna de suelo 1-D utilizando el método de análisis lineal-equivalente, es decir, mediante la propagación de ondas lineales con propiedades dinámicas de los suelos dependientes de la deformación

The screenshot displays the Strata software interface for a project titled "Sitio 8 - Autoridad de Aviación Civil - AAC-AEIL - Municipio de Ilopango - 80 metros". The interface includes a menu bar (File, Edit, Tools, Window, Help), a toolbar, and a main workspace divided into several panels.

Project Information:
Title: Sitio 8 - Autoridad de Aviación Civil - AAC-AEIL - Municipio de Ilopango - 80 metros
Notes: Perforación realizada en proyecto de BID-UCA-MOP-MARN en el año 2019-2020. Inicio de perforación: 06 de diciembre 2019. Fin de perforación: 13 de diciembre 2019. Nivel freático: >80 m. Elevación: 615.67 msnm. Coordenadas: N13.69616; W-89.116861. Empresa: Rodio Swissboring. Geólogo: Msc. Walter Hernández Modelación. Msc. Luis Mixco, MSc. Mario Reyes y MSc. Valeria García Año 2020 - POST-COVID 19

Soil Profile Data:

Layer	Thickness (m)	Unit Weight (kN/m³)	Modulus (kN/m²)	Damping Ratio (%)
1	h_1	ρ_1	G_1	D_1
2	h_2	ρ_2	G_2	D_2
...
m	h_m	ρ_m	G_m	D_m
m + 1	h_{m+1}	ρ_{m+1}	G_{m+1}	D_{m+1}
...
n	h_n	ρ_n	G_n	D_n

Analysis Results:
The interface shows two plots of "Response Ratio (R)" versus "Period (s)". The top plot shows a broad peak around 0.5s, while the bottom plot shows a sharp peak around 0.2s. The plots include multiple lines representing different soil layers and analysis iterations.

Calculation Parameters:
Error tolerance: 10.0 %
Maximum number of iterations: 20
Effective strain ratio: 0.65

Layer Discretization:
Maximum frequency: 20 Hz
Wavelength fraction: 0.20

Computing Statistics:
[46 of 50] Computing site response for motion: GEM6/P174nios_SAO13_BA_1_Intra_mam2001aabc_accmodi.AT2
Estimating strains using PGV and shear velocity.
Computing wave propagation using EQL method
Iteration: 1 Maximum Error: 289.36 %
Iteration: 2 Maximum Error: 53.33 %
Iteration: 3 Maximum Error: 12.37 %
Iteration: 4 Maximum Error: 5.72 %
[47 of 50] Computing site response for motion: GEM6/P174nios_PGA_BA_1_Intra_mam2001aabb_accmodi.AT2
Estimating strains using PGV and shear velocity.
Computing wave propagation using EQL method
Iteration: 1 Maximum Error: 303.98 %
Iteration: 2 Maximum Error: 72.48 %
Iteration: 3 Maximum Error: 19.81 %
Iteration: 4 Maximum Error: 7.53 %
[48 of 50] Computing site response for motion: GEM6/P174nios_SAO13_BA_1_Intra_mam2001aabc_accmodi.AT2
Estimating strains using PGV and shear velocity.
Computing wave propagation using EQL method
Iteration: 1 Maximum Error: 323.29 %
Iteration: 2 Maximum Error: 64.97 %
Iteration: 3 Maximum Error: 19.36 %
Iteration: 4 Maximum Error: 7.54 %
[49 of 50] Computing site response for motion: GEM6/P174nios_PGA_BA_1_Intra_mam2001aabc_accmodi.AT2
Estimating strains using PGV and shear velocity.
Computing wave propagation using EQL method
Iteration: 1 Maximum Error: 319.08 %
Iteration: 2 Maximum Error: 66.93 %
Iteration: 3 Maximum Error: 24.50 %
Iteration: 4 Maximum Error: 9.72 %
[50 of 50] Computing site response for motion: GEM6/P174nios_PGA_BA_1_Intra_mam2001aabb_accmodi.AT2
Estimating strains using PGV and shear velocity.
Computing wave propagation using EQL method
Iteration: 1 Maximum Error: 300.25 %
Iteration: 2 Maximum Error: 63.91 %
Iteration: 3 Maximum Error: 20.37 %
Iteration: 4 Maximum Error: 8.94 %
Computing statistics.

Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #11

XI. Ejecución de modelos analíticos en Strata para Etapa 1 y Etapa 2

Etapa 1

Type of Analysis

Method:

Approach:

Vary the properties

Site Property Variation

Number of realizations:

Only use profiles that converge

Vary the nonlinear properties

- shear-modulus reduction curve
- damping ratio curve
- damping of the bedrock

Vary the site profile

- shear-wave velocity
- layer thickness
- depth to bedrock

Specify seed number

Configuración de variación de curvas dinámicas en Etapa 1 en pozo de DIGESTYC

Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	Suelo de relleno con una capa fina, gris, suelto y material de TBJ de relleno	275.00
2	2.38	Caída de pómez y cenizas mal clasificadas. TB2 (Caldera de Ilopango)	275.00
3	4.50	Flujos y oleadas piroclásticas. TB3 (Caldera de Ilopango)	275.00
4	6.00	Flujos y oleadas piroclásticas. TB3 (Caldera de Ilopango)	670.00
5	6.90	Flujos piroclásticos y pómez de caída dactílicos. G1 (Volcán Boquerón)	670.00
6	9.60	Pómez de caída riolítica. TB4 (Caldera de Ilopango)	670.00
7	15.75	Ignimbrita hidrotermalizada rica en arcillas	670.00
8	16.90	Ignimbrita hidrotermalizada rica en arcillas	908.00
9	18.90	Ignimbrita parcialmente hidrotermalizada	908.00
10	23.55	Ignimbrita_1 félsica indiferenciada (Caldera de Ilopango)	908.00
11	31.50	Ignimbrita_1 félsica indiferenciada (Caldera de Ilopango)	1368.00
12	36.60	Sedimentos retrabajados	1368.00
13	39.05	Ignimbrita_2 félsica indiferenciada (Caldera de Ilopango)	1368.00
14	43.30	Ignimbrita_2 félsica indiferenciada (Caldera de Ilopango)	1388.00
15	44.10	Ignimbrita_2 félsica indiferenciada (Caldera de Ilopango)	1388.00
16	50.00	Half-Space Bedrock	1388.00

Asignación de velocidades de corte para pozo de DIGESTYC en Strata

Nonlinear Curve Variation Parameters

Standard deviation model:

Normalized shear modulus (G/G_max):

Ln. Stdev: Min: Max:

Damping:

Ln. Stdev: Min: Max:

G/G_max, Damping Correlation Coefficient (p):

Aplicación de modelo de variación de propiedades dinámicas basadas en relaciones de Darendeli (2001)

Name	Unit Weight (kN/m ³)	G/G_max Model	Damping Model
1	Suelo de relleno con una capa fina, gris, suelto y material de TBJ de relleno	18.49	Grupo A: TBJ
2	Caída de pómez y cenizas mal clasificadas. TB2 (Caldera de Ilopango)	16.93	Grupo B: Tobas Superiores
3	Flujos y oleadas piroclásticas. TB3 (Caldera de Ilopango)	21.78	Grupo B: Tobas Superiores
4	Flujos y oleadas piroclásticas. TB3 (Caldera de Ilopango)	21.78	Grupo B: Tobas Superiores
5	Flujos piroclásticos y pómez de caída dactílicos. G1 (Volcán Boquerón)	21.44	Rollins 1998 - Gravel - Mean
6	Pómez de caída riolítica. TB4 (Caldera de Ilopango)	21.78	Grupo B: Tobas Superiores
7	Pómez de caída riolítica. TB4 (Caldera de Ilopango)	22.55	Darendeli & Stokoe (2001)
8	Ignimbrita hidrotermalizada rica en arcillas	22.55	Darendeli & Stokoe (2001)
9	Ignimbrita parcialmente hidrotermalizada	22.55	Darendeli & Stokoe (2001)
10	Ignimbrita_1 félsica indiferenciada (Caldera de Ilopango)	23.73	Rollins 1998 - Gravel - Upper (increase confining pressure)
11	Ignimbrita_1 félsica indiferenciada (Caldera de Ilopango)	23.73	Rollins 1998 - Gravel - Upper (less confining pressure)
12	Sedimentos retrabajados	26.65	Menq 2003 - Cu=8 - D50=3mm - 5.54 atm
13	Sedimentos retrabajados	26.65	Menq 2003 - Cu=8 - D50=3mm - 5.54 atm
14	Ignimbrita_2 félsica indiferenciada (Caldera de Ilopango)	26.91	Rollins 1998 - Gravel - Upper (increase confining pressure)
15	Ignimbrita_2 félsica indiferenciada (Caldera de Ilopango)	26.91	Rollins 1998 - Gravel - Upper (less confining pressure)
16	Half-Space Bedrock		

Asignación de tipos de suelo, peso unitario y curvas dinámicas para pozo de DIGESTYC en Strata

Name	Description	Type	PGA (g)	PGV (cm/s)	Scale Factor
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_PGA_CL_I_Cort_marn1986aaab_accmodi.AT2	P975sanios_PGA_CL_I_Cort_marn1986aaab_accmodi	Outcrop (2A)	0.36	25.50	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_SA013_CL_I_Cort_marn1986aaab_accmodi.AT2	P975sanios_SA013_CL_I_Cort_marn1986aaab_accmodi	Outcrop (2A)	0.33	10.82	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_PGA_CL_I_Cort_marn2001aaav_accmodi.AT2	P975sanios_PGA_CL_I_Cort_marn2001aaav_accmodi	Outcrop (2A)	0.38	22.69	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_SA013_CL_I_Cort_marn2001aaav_accmodi.AT2	P975sanios_SA013_CL_I_Cort_marn2001aaav_accmodi	Outcrop (2A)	0.44	11.09	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_PGA_CL_I_Cort_marn2001aaaz_accmodi.AT2	P975sanios_PGA_CL_I_Cort_marn2001aaaz_accmodi	Outcrop (2A)	0.40	24.01	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_SA013_CL_I_Cort_marn2001aaaz_accmodi.AT2	P975sanios_SA013_CL_I_Cort_marn2001aaaz_accmodi	Outcrop (2A)	0.51	11.85	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_PGA_CL_I_Cort_marn1986aaab_accmodi.AT2	P975sanios_PGA_CL_I_Cort_marn1986aaab_accmodi	Outcrop (2A)	0.35	31.41	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_SA013_CL_I_Cort_marn1986aaab_accmodi.AT2	P975sanios_SA013_CL_I_Cort_marn1986aaab_accmodi	Outcrop (2A)	0.38	12.98	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_PGA_CL_I_Cort_marn2001aaav_accmodi.AT2	P975sanios_PGA_CL_I_Cort_marn2001aaav_accmodi	Outcrop (2A)	0.39	26.33	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_SA013_CL_I_Cort_marn2001aaav_accmodi.AT2	P975sanios_SA013_CL_I_Cort_marn2001aaav_accmodi	Outcrop (2A)	0.42	16.02	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_PGA_CL_I_Cort_marn2001aaaz_accmodi.AT2	P975sanios_PGA_CL_I_Cort_marn2001aaaz_accmodi	Outcrop (2A)	0.39	27.25	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_SA013_CL_I_Cort_marn2001aaaz_accmodi.AT2	P975sanios_SA013_CL_I_Cort_marn2001aaaz_accmodi	Outcrop (2A)	0.38	10.41	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_PGA_IGNS_I_Cort_marn2014aabl_accmodi.AT2	P975sanios_PGA_IGNS_I_Cort_marn2014aabl_accmodi	Outcrop (2A)	0.57	13.01	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_SA013_IGNS_I_Cort_marn2014aabl_accmodi.AT2	P975sanios_SA013_IGNS_I_Cort_marn2014aabl_accmodi	Outcrop (2A)	0.57	8.49	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_PGA_IGNS_I_Cort_marn2014aabl_accmodi.AT2	P975sanios_PGA_IGNS_I_Cort_marn2014aabl_accmodi	Outcrop (2A)	0.39	15.95	1.00
<input checked="" type="checkbox"/> GEMs/P975sanios_SA013_IGNS_I_Cort_marn2014aabl_accmodi.AT2	P975sanios_SA013_IGNS_I_Cort_marn2014aabl_accmodi	Outcrop (2A)	0.36	10.73	1.00

Asignación de registros acelerográficos en suelo firme para pozo de DIGESTYC en Strata

Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #11

XI. Ejecución de modelos analíticos en Strata para Etapa 1 y Etapa 2

Etapa 2

Name	Unit Weight (kN/m ³)	G/G_max Model	Damping Model	Damp. Li	
1	0	18.39	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
2	1	18.46	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
3	2	18.80	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
4	3	19.30	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
5	4	19.76	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
6	5	19.91	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
7	6	20.18	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
8	7	20.30	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
9	8	20.43	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
10	9	20.41	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
11	10	20.60	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
12	11	20.80	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
13	12	20.92	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
14	13	21.03	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
15	14	21.26	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
16	15	21.37	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
17	16	21.45	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
18	17	21.64	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5
19	18	21.68	Darendeli & Stokoe (2001)	Darendeli & Stokoe (2001)	0.5

Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)	Minimum (m/s)	Maximum (m/s)	Varied	
1	0.00	1.00	0	324.77	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
2	1.00	1.00	1	329.71	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
3	2.00	1.00	2	353.32	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
4	3.00	1.00	3	390.27	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
5	4.00	1.00	4	426.83	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
6	5.00	1.00	5	439.51	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
7	6.00	1.00	6	462.60	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
8	7.00	1.00	7	473.54	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
9	8.00	1.00	8	485.26	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
10	9.00	1.00	9	483.41	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
11	10.00	1.00	10	500.63	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
12	11.00	1.00	11	519.86	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
13	12.00	1.00	12	530.70	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
14	13.00	1.00	13	541.91	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
15	14.00	1.00	14	565.11	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
16	15.00	1.00	15	576.24	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
17	16.00	1.00	16	584.37	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
18	17.00	1.00	17	604.62	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
19	18.00	1.00	18	608.93	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
20	19.00	1.00	19	623.33	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
21	20.00	1.00	20	622.90	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>

Type of Analysis

Method:

Approach:

Vary the properties

Site Property Variation

Number of realizations:

Only use profiles that converge

Vary the nonlinear properties

- shear-modulus reduction curve
- damping ratio curve
- damping of the bedrock

Vary the site profile

- shear-wave velocity
- layer thickness
- depth to bedrock

Specify seed number

Configuración de variación de curvas dinámicas en Etapa 2 para suelo tipo C

Asignación de tipos de suelo, peso unitario y curvas dinámicas para suelo tipo C en Strata

Asignación de velocidades de corte para suelo tipo C en Strata

Nonlinear Curve Variation Parameters

Standard deviation model:

Normalized shear modulus (G/G_max):

Ln. Stdev: Min: Max:

Damping:

Ln. Stdev: Min: Max:

G/G_max, Damping Correlation Coefficient (ρ):

Aplicación de modelo de variación de propiedades dinámicas basadas en relaciones de Darendeli (2001)

Variation of the Site Profile

Toro (1992) Site Variation Model

Vary the shear-wave velocity of the layers

Vary the layer thickness

Vary the depth to bedrock

Velocity Variation Parameters

Layer Thickness Variation Parameters

Parameters:

Layer rate model: $\lambda(d) = a(d + b)^c$

Coefficient (a):

Initial (b):

Exponent (c):

Correlation applied in **meters**

Bedrock Depth Variation Parameters

Distribution:

Standard deviation:

Minimum depth to bedrock:

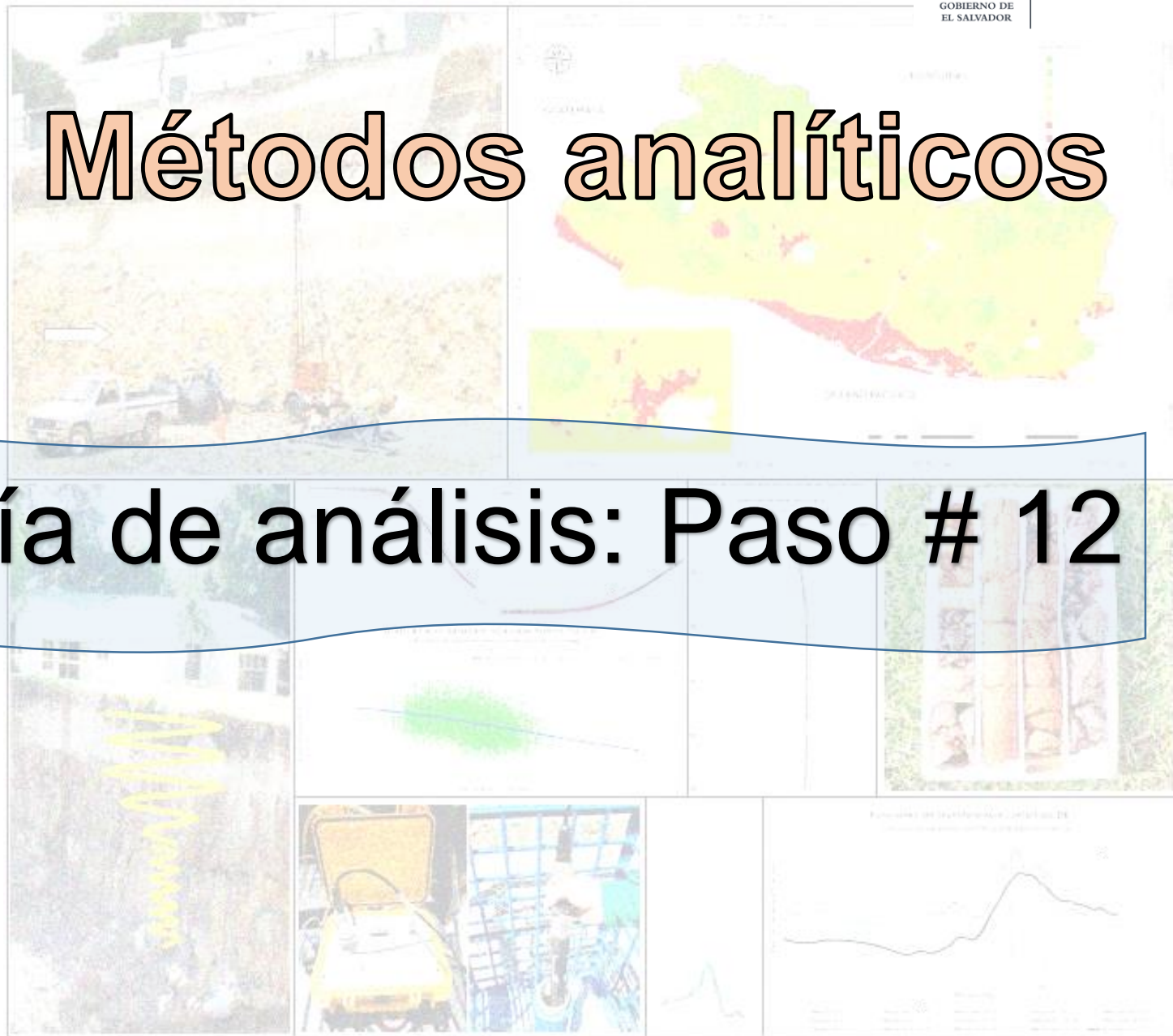
Maximum depth to bedrock:

Asignación de coeficientes para la variación de propiedades del suelo tipo C en Strata

Efecto de sitio: Métodos analíticos



Metodología de análisis: Paso # 12

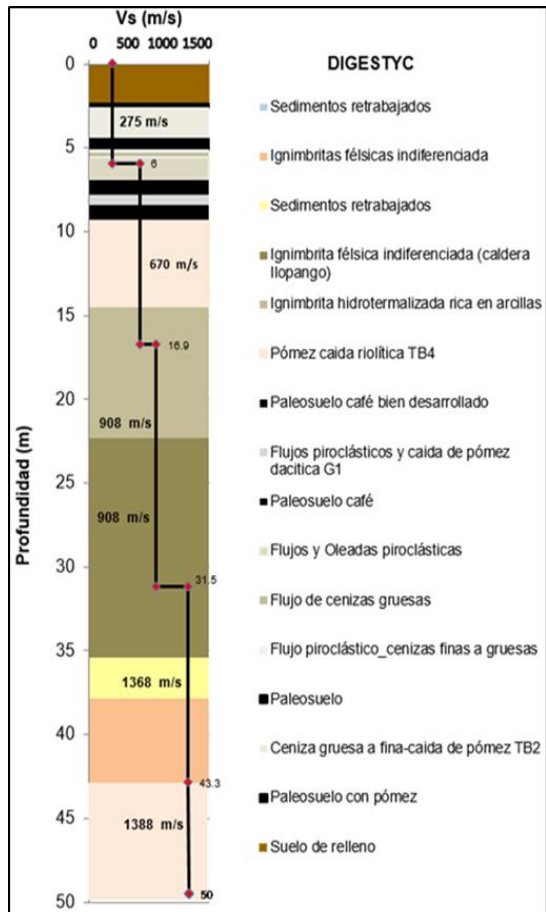


Efecto de sitio: Métodos analíticos

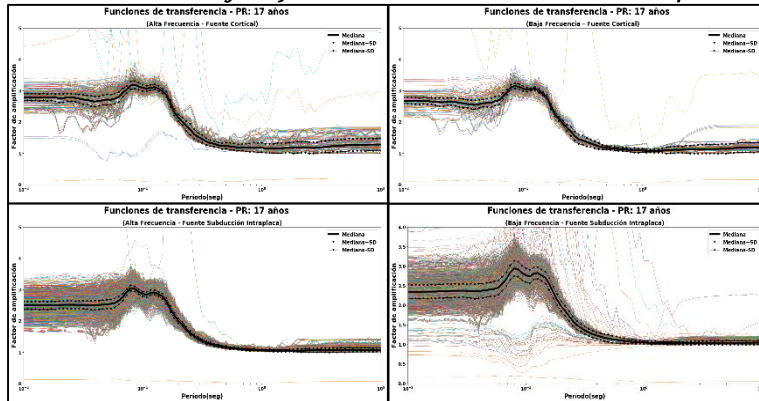
Metodología de análisis: **Paso #12**

Etapa 1

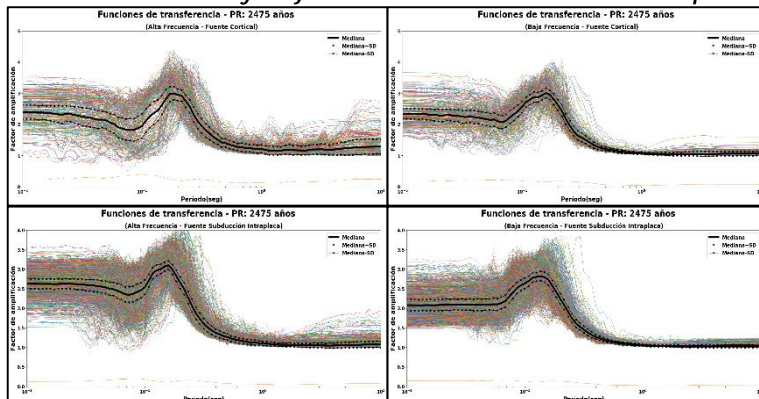
XII. Cálculo de **funciones de transferencia** y **períodos predominantes** para **15 sitios de pozos** (Etapa 1) y cinco tipos de suelo (Etapa2)



Período de retorno: 17 años
Alta Frecuencia y Baja Frecuencia – Cortical e Intraplaca

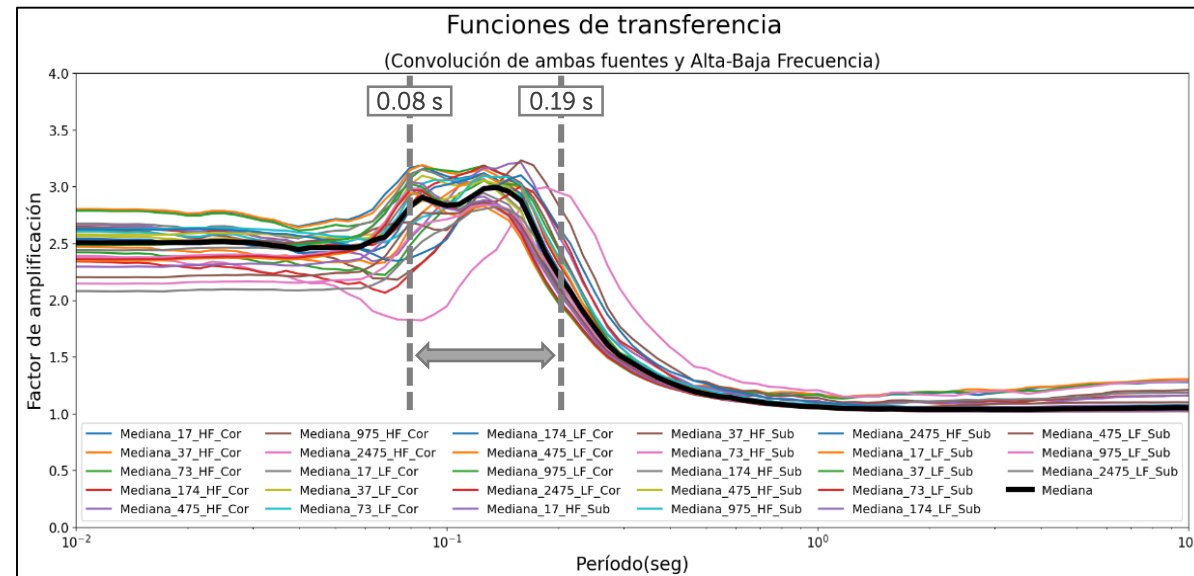


Período de retorno: 2475 años
Alta Frecuencia y Baja Frecuencia – Cortical e Intraplaca



Se utilizaron un total de **952 registros de fuente superficial** y **4424 registros de subducción intraplaca**, distribuidos en los 7 períodos de retorno y los dos grupos de períodos condicionantes (Alta y Baja Frecuencia)

100 realizaciones para las modelaciones vía MonteCarlo

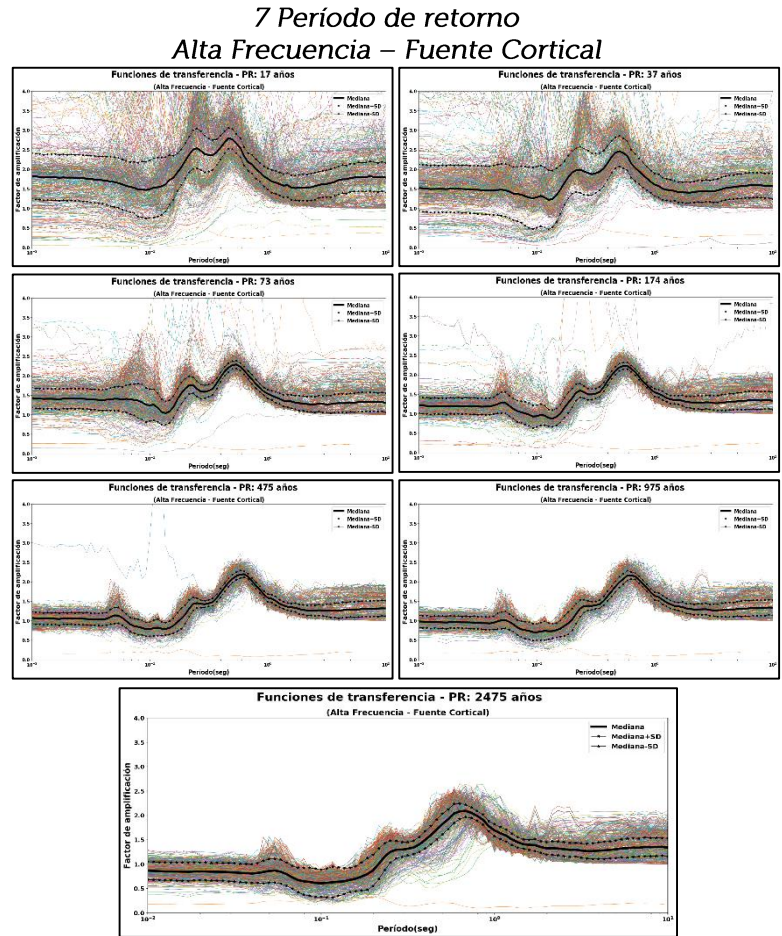
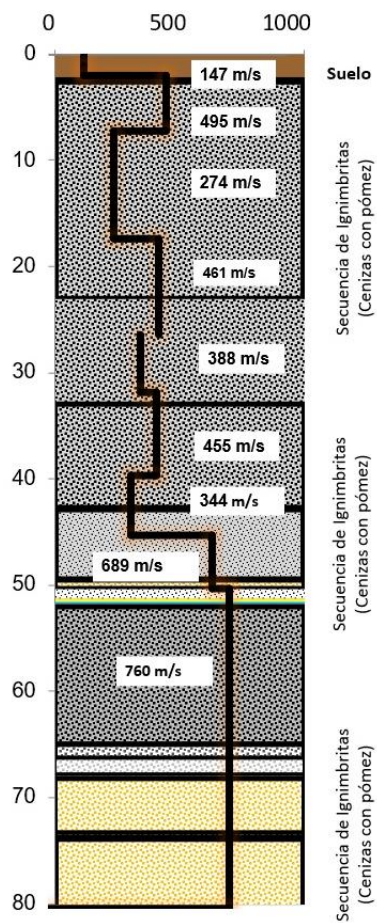


Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: **Paso #12**

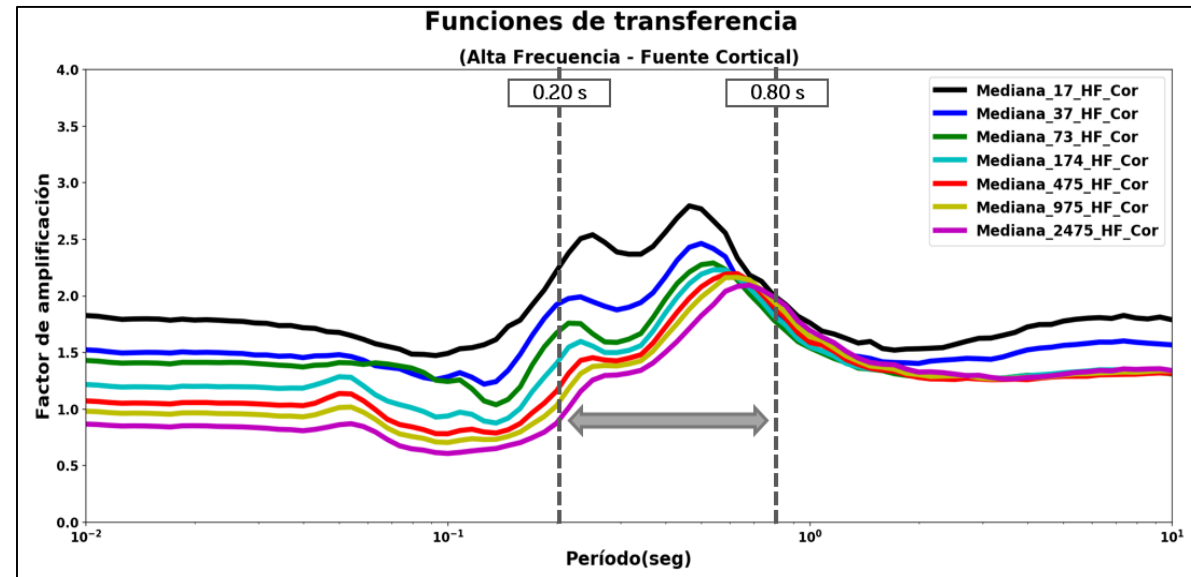
Etapa 1

XII. Cálculo de **funciones de transferencia** y **períodos predominantes** para **16 sitios de pozos** (Etapa 1) y cinco tipos de suelo (Etapa2)



Se utilizaron un total de **1344 registros de fuente superficial** y **10,472 registros de subducción intraplaca**, distribuidos en los 7 períodos de retorno y los dos grupos de períodos condicionantes (Alta y Baja Frecuencia)

100 realizaciones para las modelaciones vía MonteCarlo

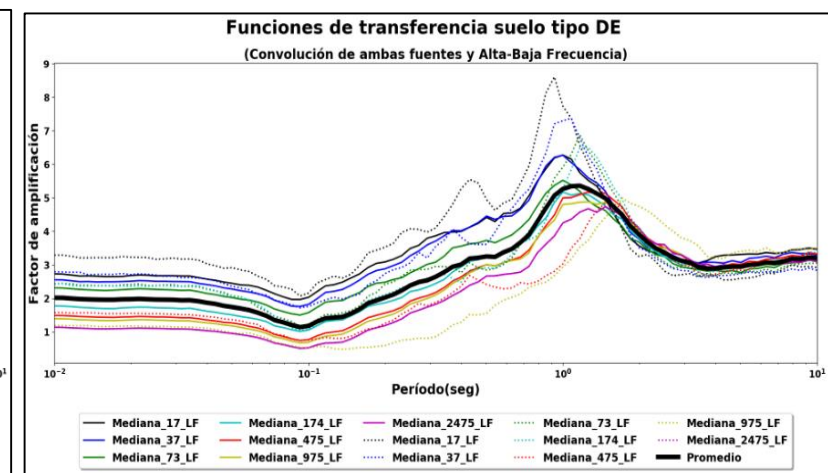
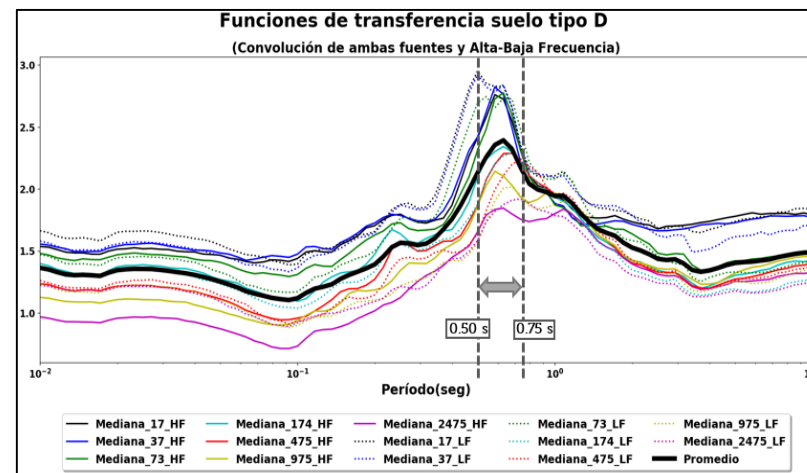
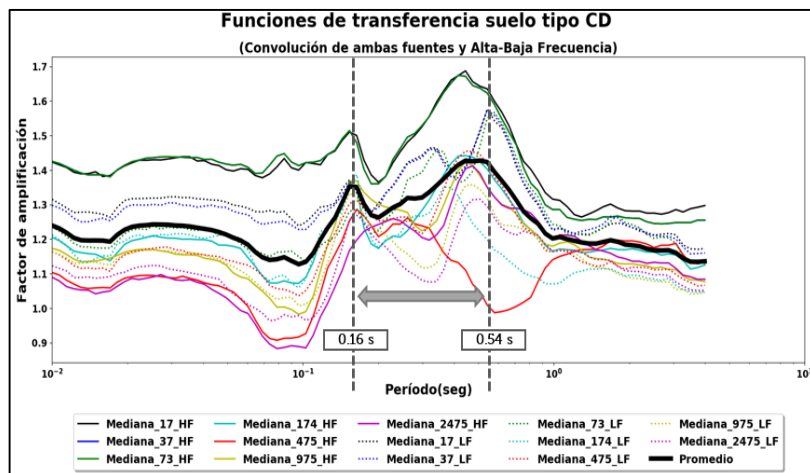
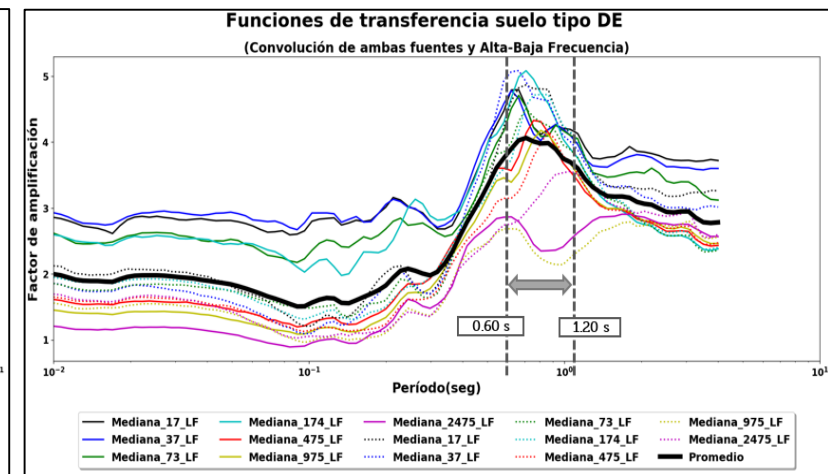
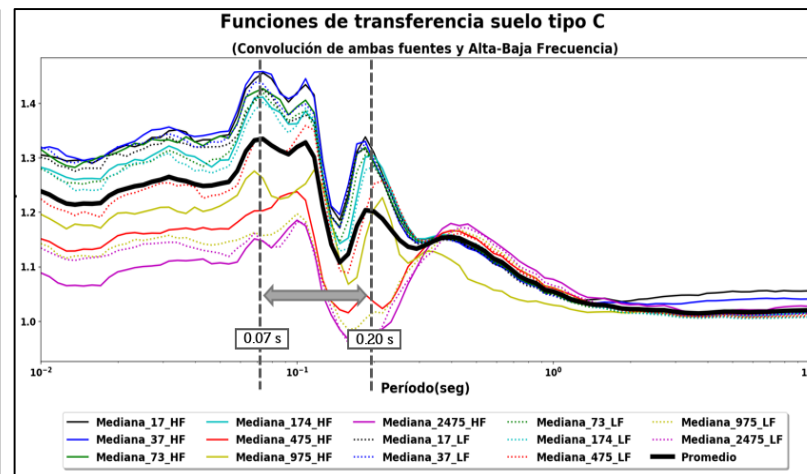
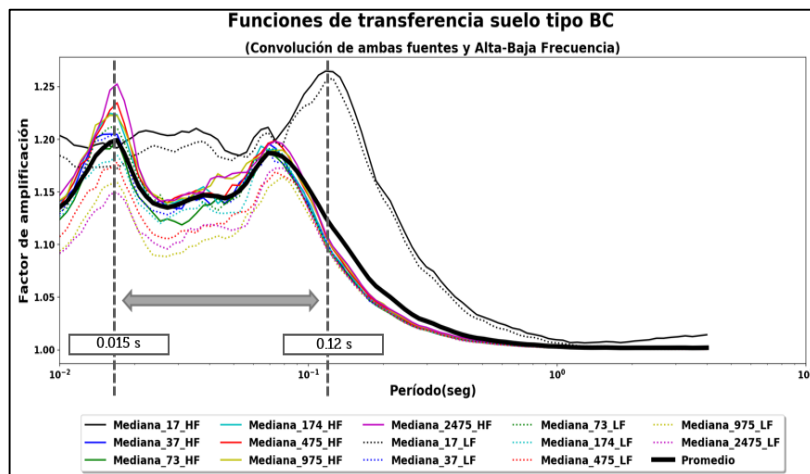


Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #12

Etapa 2

XII. Cálculo de funciones de transferencia y períodos predominantes para 16 sitios de pozos (Etapa 1) y cinco tipos de suelo (Etapa2) + suelo E (Colinas)



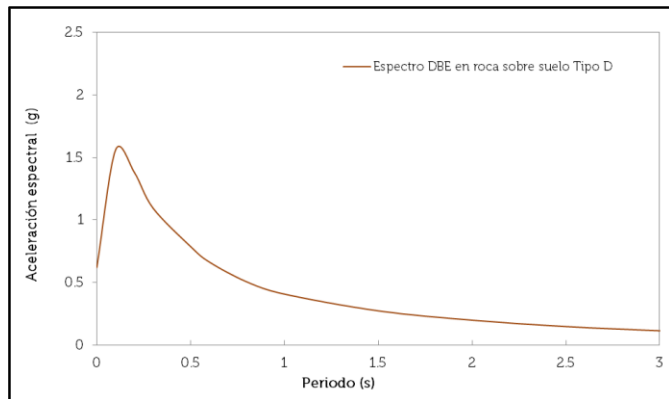
Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #12

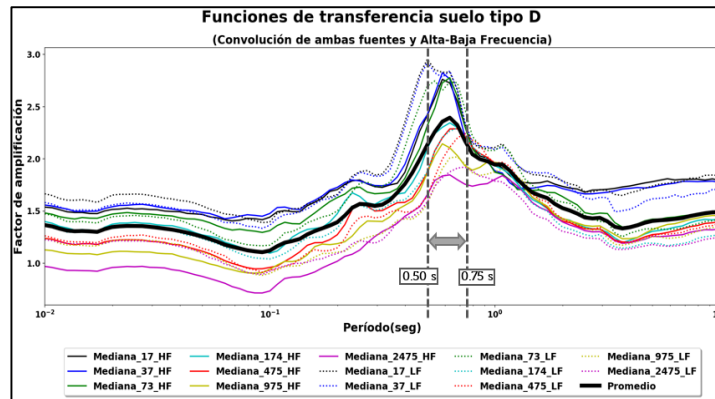
Etapa 2

XII. Cálculo de funciones de transferencia y períodos predominantes para 16 sitios de pozos (Etapa 1) y cinco tipos de suelo (Etapa 2) + suelo E (Colinas)

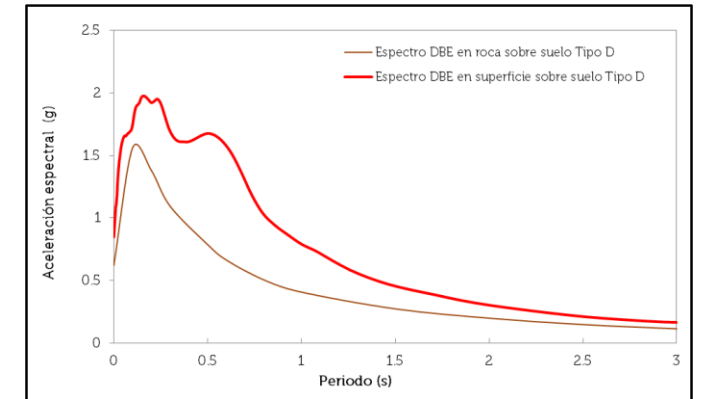
NO PODEMOS únicamente multiplicar la Función de transferencia (FT) obtenida con el Espectro de diseño en roca (DBE).



×



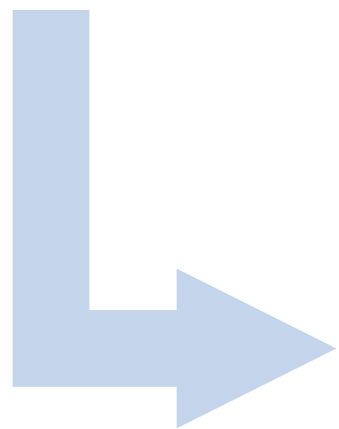
=



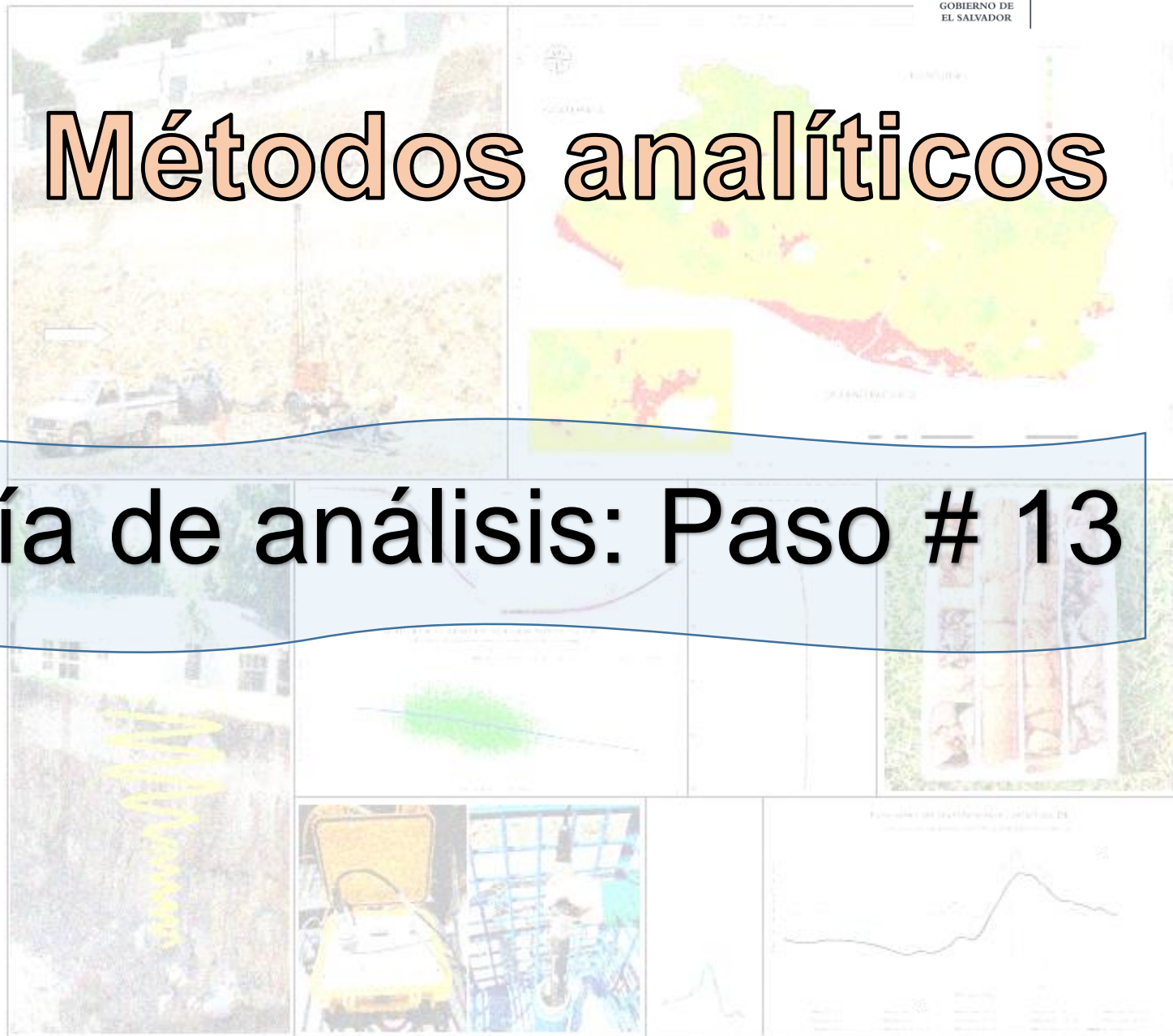
Ya que los valores de la FT corresponden a valores específicos de aceleraciones en roca y el Espectro DBE ($[2/3]$ MCE) presenta sus propias aceleraciones) derivadas de la amenaza sísmica.

No se consideraría el factor de no-linealidad existente respecto al cambio en el nivel de aceleración en roca, ni su incertidumbre asociada.

Efecto de sitio: Métodos analíticos



Metodología de análisis: Paso # 13

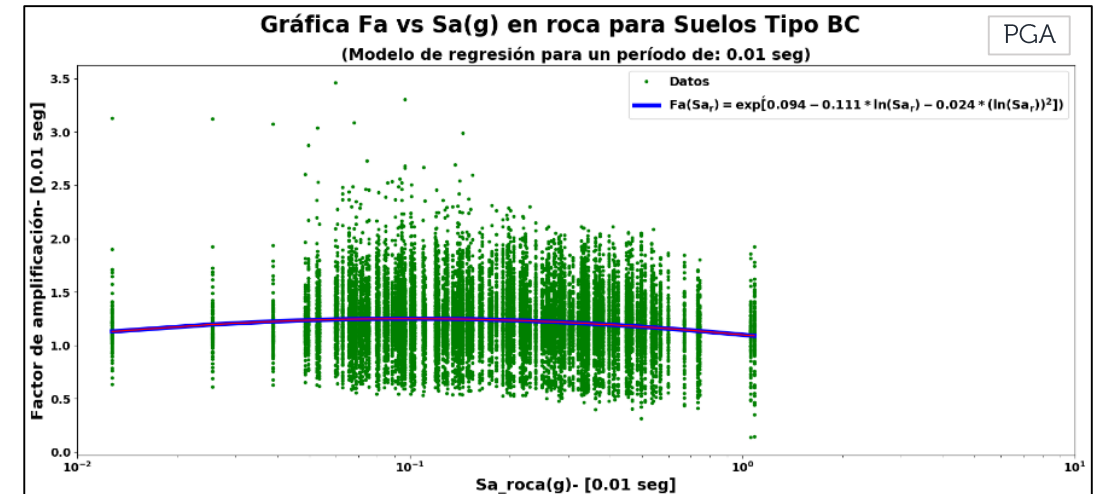
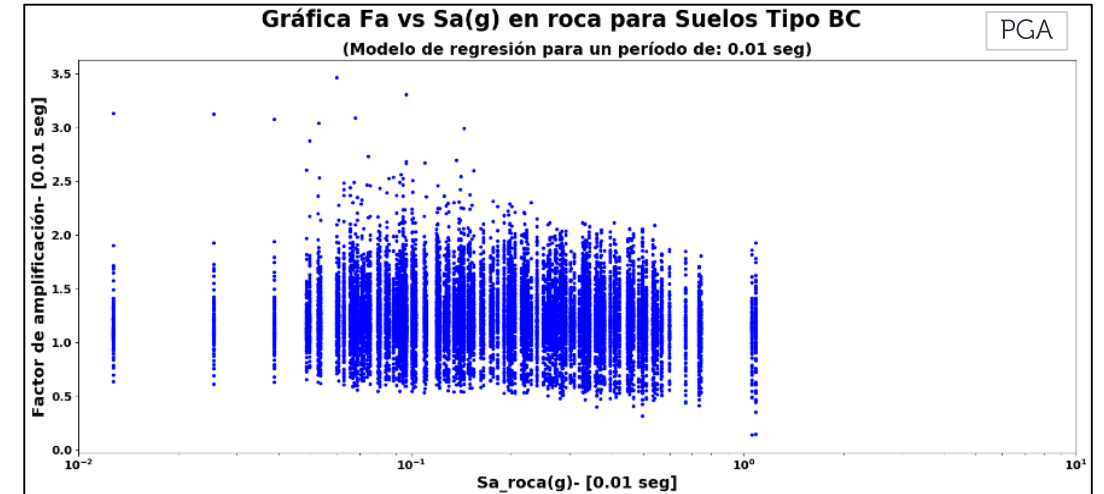
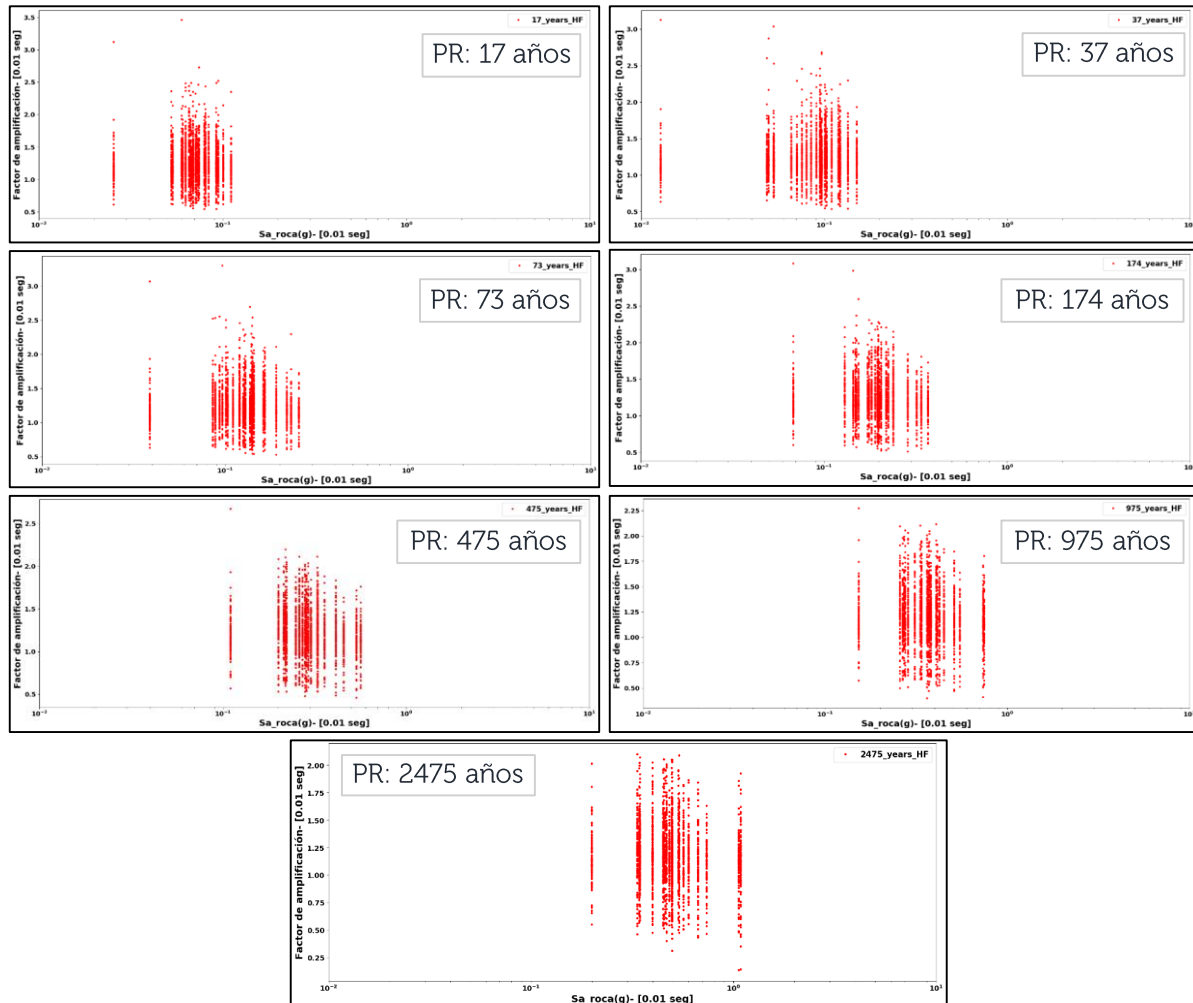


Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #13

Etapa 2

XIII. Determinación de funciones de amplificación para cada tipo de suelo



Efecto de sitio: Métodos analíticos

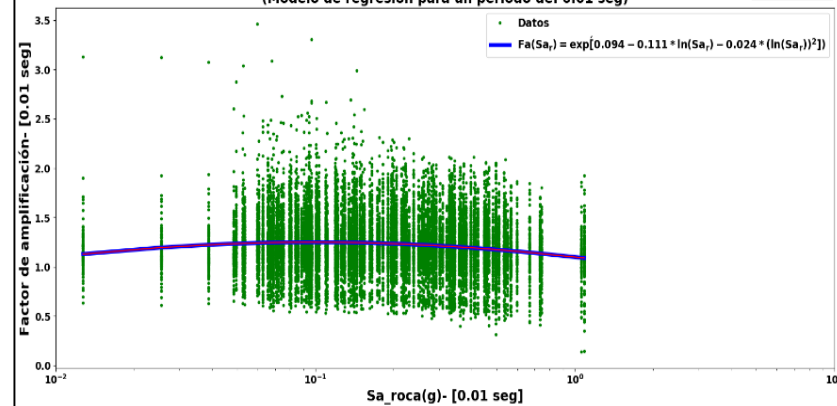
Metodología de análisis: Paso #13

Etapa 2

XIII. Determinación de funciones de amplificación para cada tipo de suelo

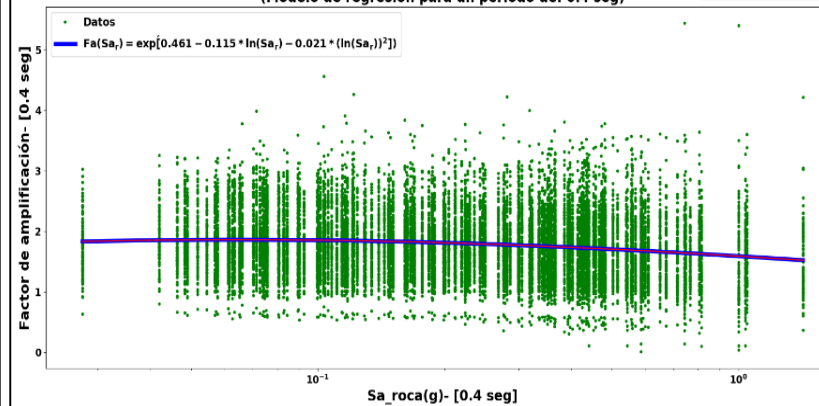
Gráfica Fa vs Sa(g) en roca para Suelos Tipo BC
(Modelo de regresión para un periodo de: 0.01 seg)

PGA



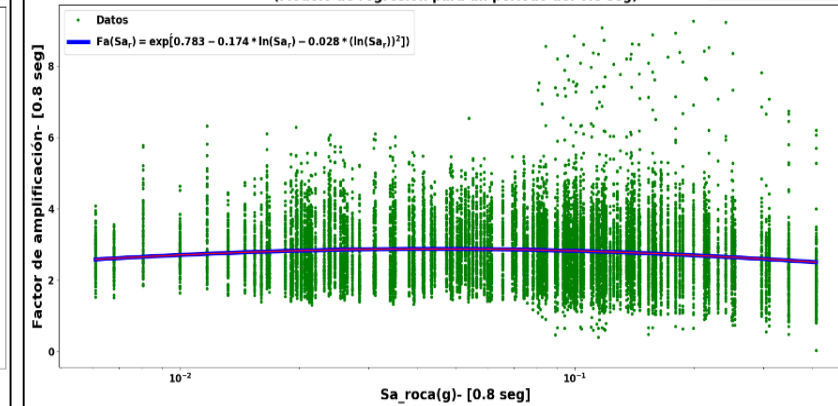
Gráfica Fa vs Sa(g) en roca para Suelos Tipo CD
(Modelo de regresión para un periodo de: 0.4 seg)

SA(0.4 seg)



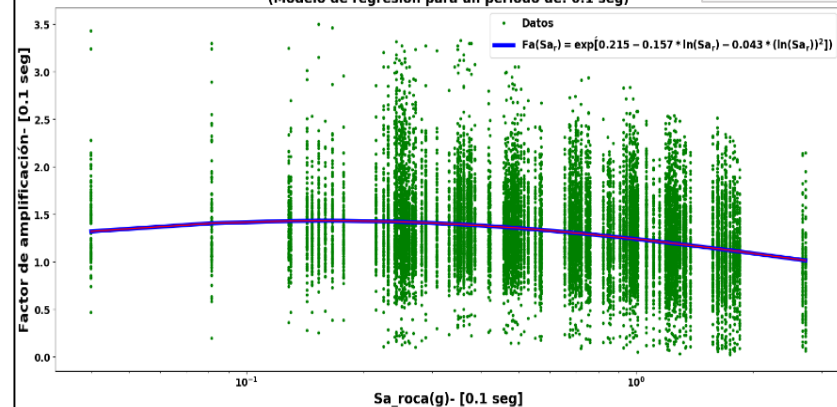
Gráfica Fa vs Sa(g) en roca para Suelos Tipo DE
(Modelo de regresión para un periodo de: 0.8 seg)

SA(0.8 seg)



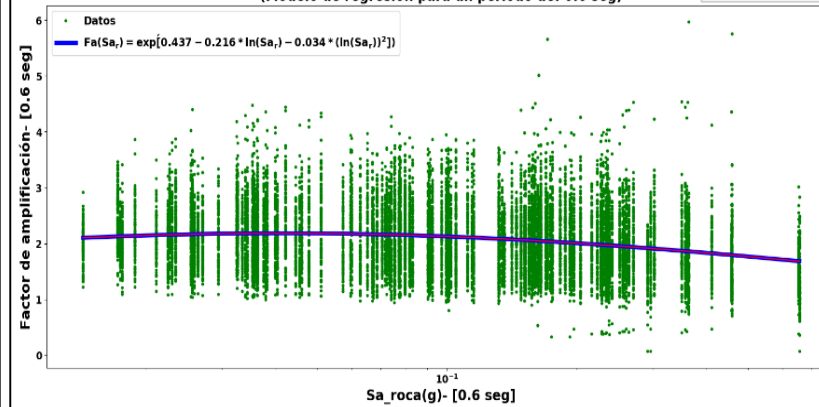
Gráfica Fa vs Sa(g) en roca para Suelos Tipo C
(Modelo de regresión para un periodo de: 0.1 seg)

SA(0.1 seg)



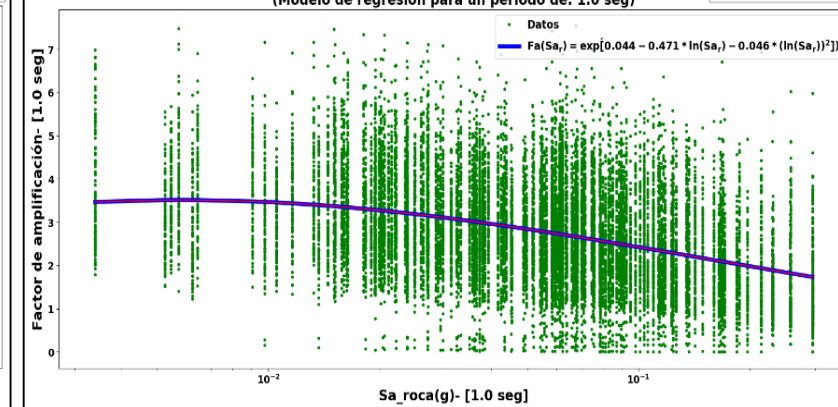
Gráfica Fa vs Sa(g) en roca para Suelos Tipo D
(Modelo de regresión para un periodo de: 0.6 seg)

SA(0.6 seg)



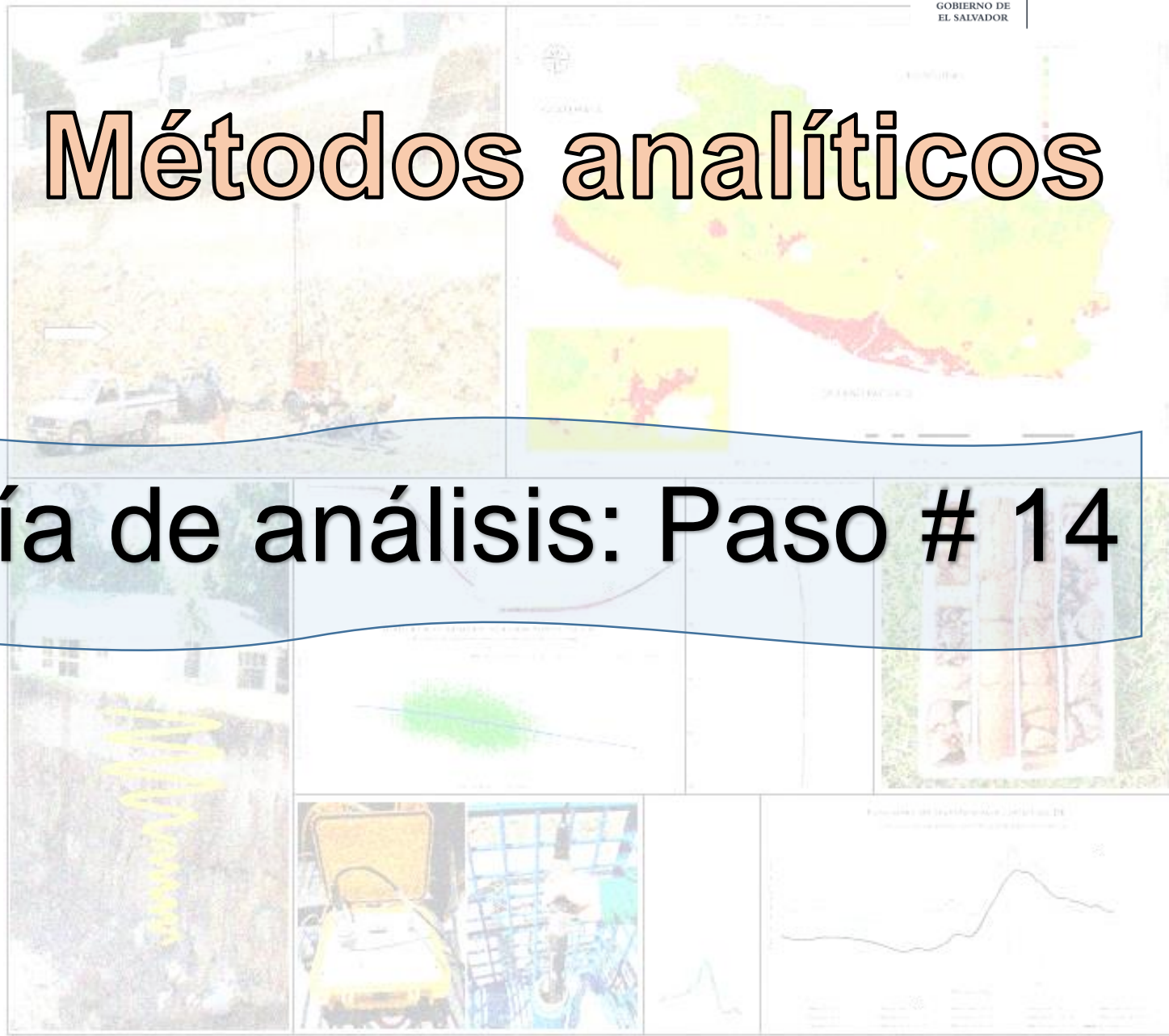
Gráfica Fa vs Sa(g) en roca para Suelos Tipo E
(Modelo de regresión para un periodo de: 1.0 seg)

SA(1.0 seg)



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso # 14



Efecto de sitio: Métodos analíticos

Metodología de análisis: Paso #14

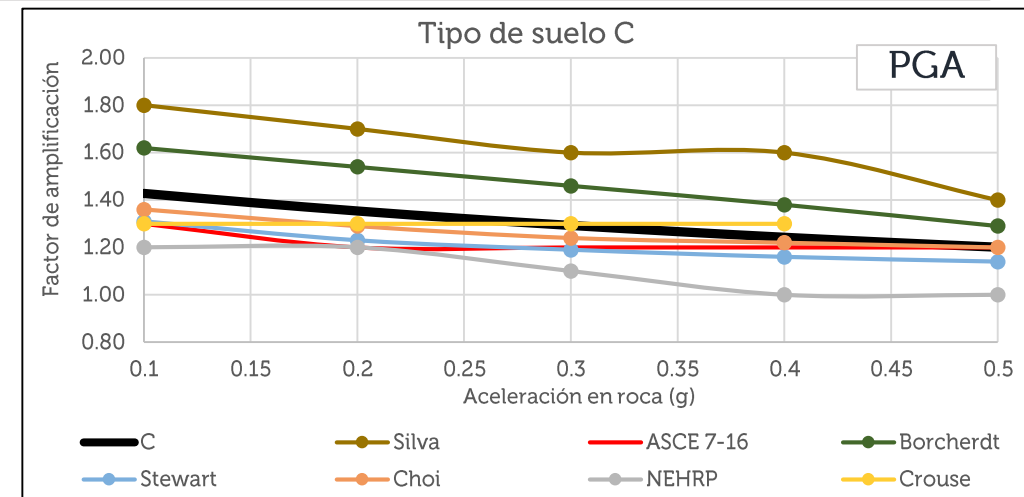
Etapa 2

XIV. Tabulación de factores de amplificación para los 5 tipos de suelo + suelo E

8.2.1 Factores de amplificación para PGA [0.01 seg]

Aceleración máxima de terreno [PGA(0.01 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 periodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)

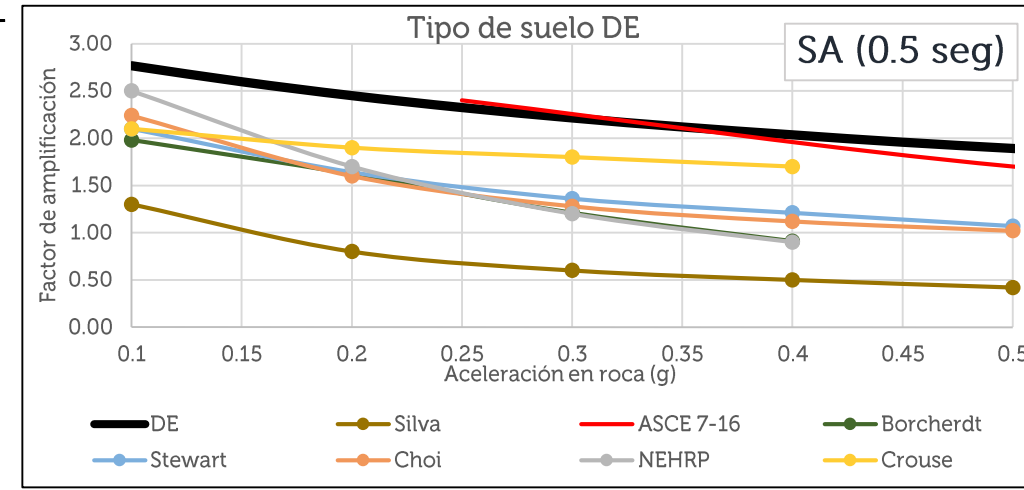
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.13	1.24	1.25	1.24	1.23	1.22	1.21	1.20	1.19	1.18	1.17	1.16	1.16	1.15	1.14	1.13	1.11	1.10	1.09	1.09
C	1.38	1.46	1.43	1.39	1.35	1.32	1.29	1.27	1.24	1.22	1.20	1.18	1.16	1.15	1.13	1.11	1.08	1.06	1.04	1.04
CD	1.71	1.69	1.59	1.51	1.44	1.39	1.34	1.30	1.26	1.23	1.20	1.17	1.15	1.12	1.10	1.07	1.03	1.00	0.98	0.98
D	2.33	1.85	1.63	1.51	1.42	1.36	1.31	1.26	1.23	1.20	1.17	1.15	1.12	1.10	1.09	1.06	1.03	1.00	0.98	0.98
DE	2.72	1.99	1.70	1.55	1.45	1.37	1.32	1.27	1.23	1.20	1.17	1.15	1.12	1.10	1.09	1.06	1.03	1.00	0.98	0.98
E	2.13	1.55	1.25	1.08	0.96	0.86	0.79	0.72	0.66	0.61	0.57	0.53	0.49	0.46	0.42	0.37	0.32	0.28	0.24	0.24



8.2.2 Factores de amplificación para SA [0.1 seg]

Aceleración espectral de terreno [SA(0.1 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 periodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)

Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.19	1.21	1.25	1.27	1.28	1.28	1.28	1.27	1.27	1.27	1.26	1.26	1.26	1.25	1.25	1.24	1.24	1.23	1.20	1.17
C	1.32	1.34	1.42	1.43	1.43	1.42	1.41	1.40	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.32	1.30	1.28	1.26	1.24	1.16	1.09
CD	1.40	1.42	1.51	1.52	1.50	1.47	1.44	1.41	1.38	1.36	1.33	1.30	1.28	1.26	1.23	1.19	1.16	1.12	0.99	0.89
D	1.65	1.67	1.73	1.69	1.62	1.56	1.50	1.45	1.40	1.35	1.31	1.26	1.23	1.19	1.16	1.10	1.05	1.00	0.82	0.71
DE	1.75	1.75	1.74	1.67	1.60	1.54	1.48	1.42	1.37	1.33	1.28	1.25	1.21	1.18	1.15	1.09	1.04	1.00	0.84	0.73
E	1.48	1.43	1.23	1.11	1.02	0.95	0.89	0.84	0.80	0.76	0.73	0.69	0.66	0.64	0.61	0.56	0.52	0.48	0.34	0.23



8.2.3 Factores de amplificación para SA [0.2 seg]

Aceleración espectral de terreno [SA(0.2 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador considerando la conjunción de 7 periodos de retorno (17, 37, 73, 174, 475, 975 y 2475 años)

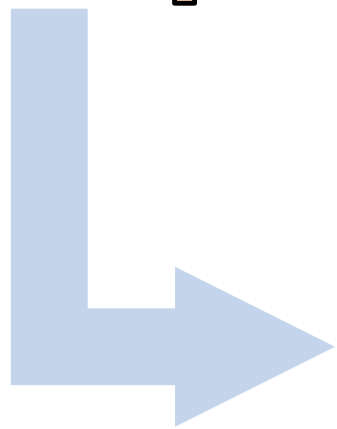
Tipo de Suelo	0.01 g	0.05 g	0.1 g	0.15 g	0.2 g	0.25 g	0.3 g	0.35 g	0.4 g	0.45 g	0.5 g	0.55 g	0.6 g	0.65 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1 g	1.5 g	2 g
BC	1.14	1.14	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.13	1.13	1.13	1.12	1.12	1.11	1.09
C	1.52	1.51	1.45	1.41	1.39	1.37	1.35	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	1.28	1.27	1.26	1.25	1.23	1.22	1.18	1.15
CD	1.74	1.75	1.79	1.77	1.74	1.70	1.67	1.64	1.61	1.58	1.55	1.53	1.51	1.48	1.46	1.43	1.39	1.36	1.23	1.14
D	1.88	1.89	1.93	1.88	1.82	1.76	1.70	1.64	1.60	1.55	1.51	1.47	1.43	1.40	1.36	1.31	1.25	1.21	1.03	0.92
DE	2.45	2.42	2.27	2.12	2.00	1.90	1.81	1.73	1.67	1.61	1.55	1.50	1.46	1.42	1.38	1.31	1.25	1.19	1.00	0.88
E	2.26	2.19	1.84	1.64	1.49	1.39	1.30	1.22	1.16	1.10	1.05	1.00	0.96	0.92	0.88	0.82	0.76	0.71	0.51	0.38

Contenido general

1. Justificación de trabajo
2. Amplificación del sitio
3. Antecedentes y estudios realizados a nivel nacional
4. Metodología empleada para caracterización
5. Mapa de zonificación sísmica "homogénea", en términos de V_s30
6. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Empíricos.
7. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Analíticos.
8. Factores de amplificación
9. Conclusiones



Efecto de sitio: Factores de amplificación

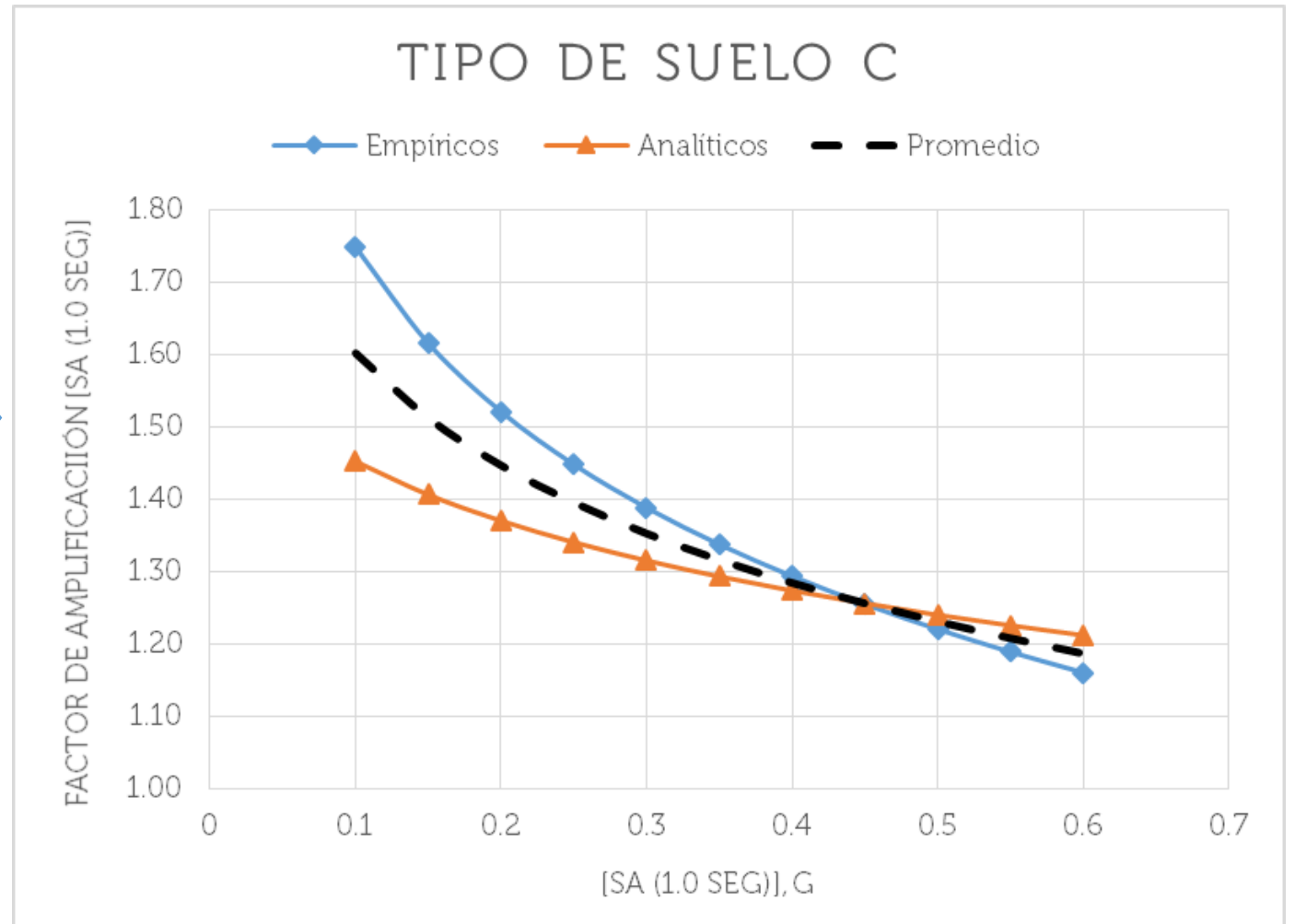
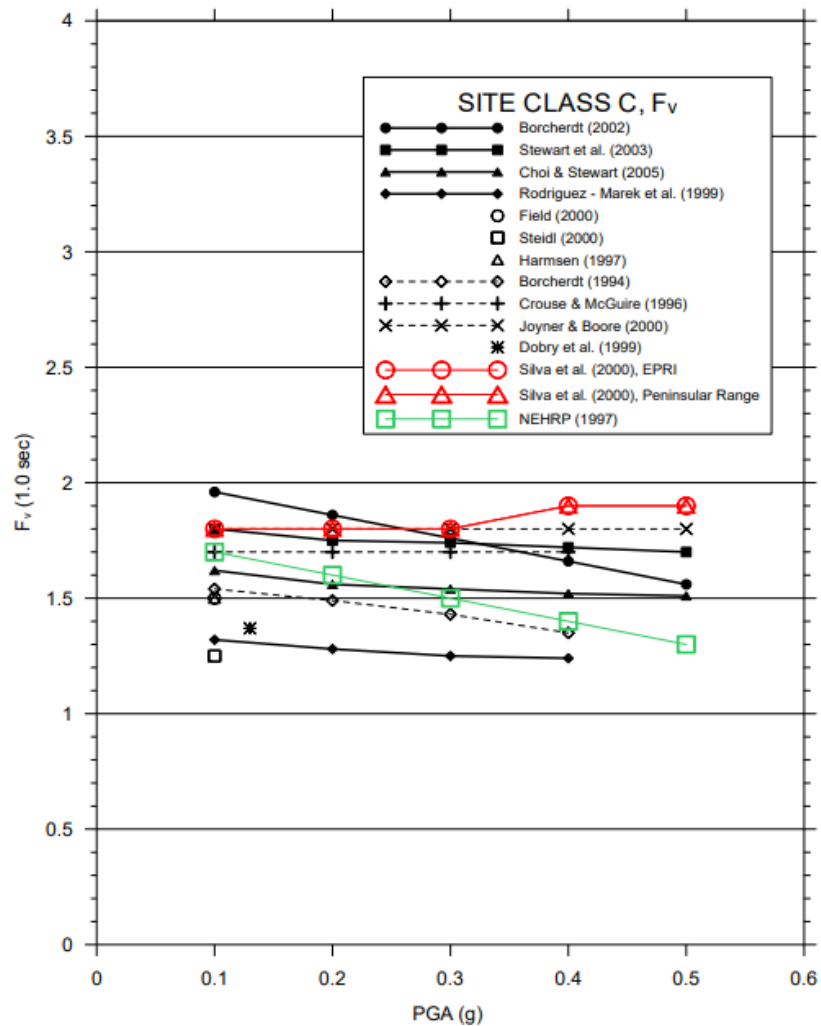


Conjunción de factores con
métodos empíricos y analíticos



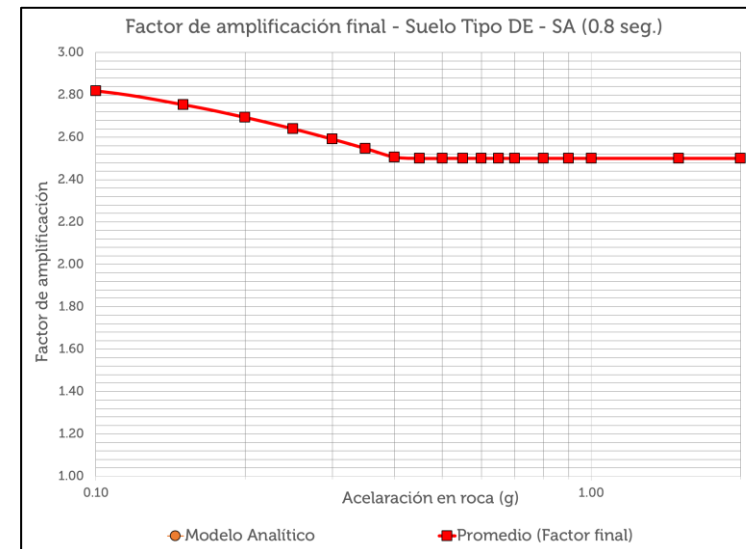
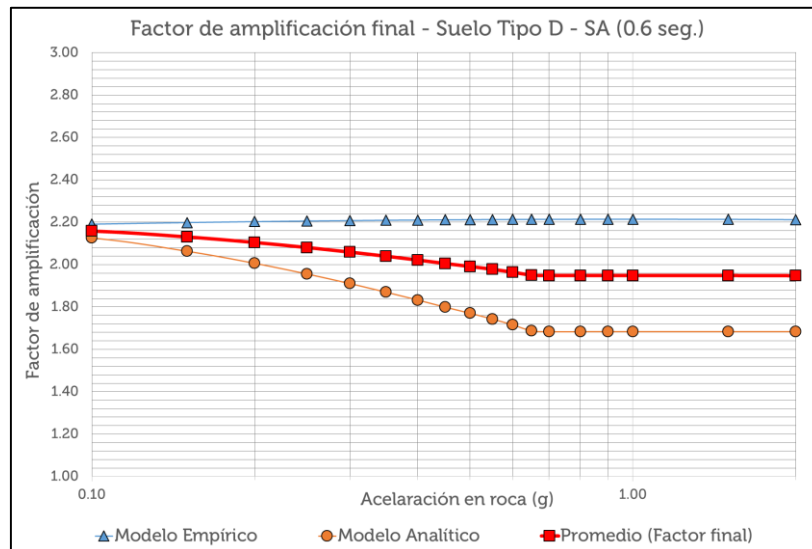
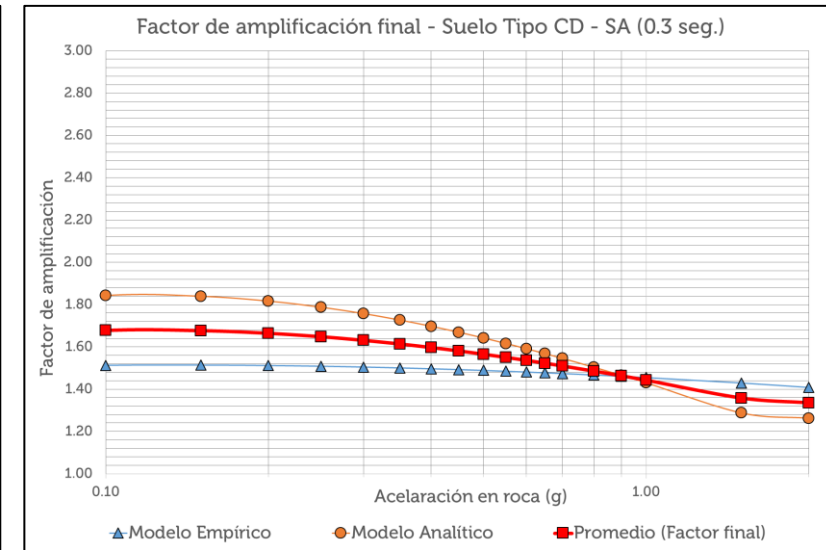
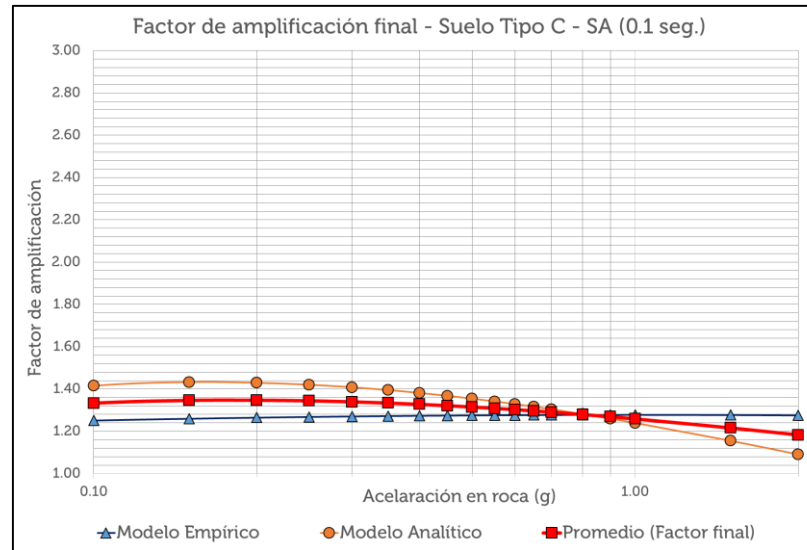
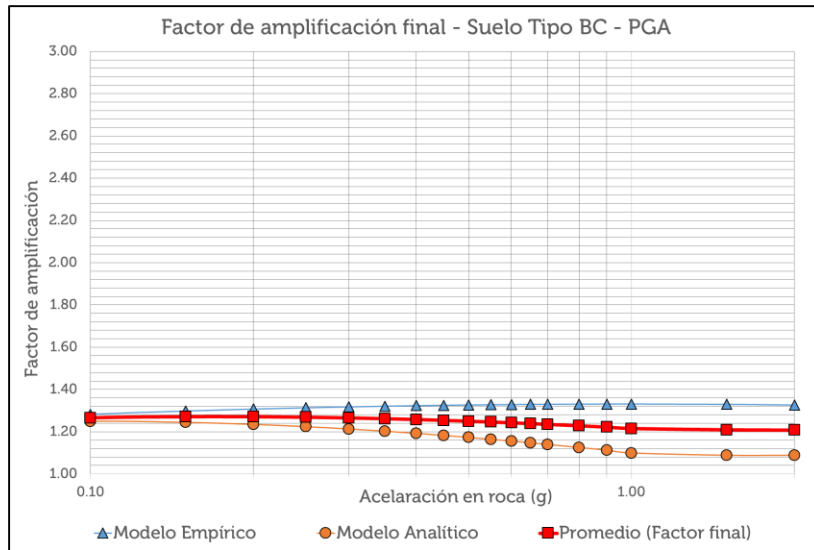
Efecto de sitio: Factores de amplificación

Conjunción de factores con métodos empíricos y analíticos



Efecto de sitio: Factores de amplificación

Conjunción de factores con métodos empíricos y analíticos



Efecto de sitio: Factores de amplificación

Factores de amplificación finales.

Aceleración máxima de terreno [PGA(0.01 seg)] en suelo firme proveniente de los resultados de la evaluación probabilística de amenaza sísmica											
Tipo de Suelo	PGA = 0.01 g	PGA = 0.05 g	PGA = 0.1 g	PGA = 0.15 g	PGA = 0.2 g	PGA = 0.25 g	PGA = 0.3 g	PGA = 0.35 g	PGA = 0.4 g	PGA = 0.45 g	PGA = 0.5 g
BC	1.13	1.24	1.25	1.24	1.23	1.22	1.21	1.20	1.19	1.18	1.17
C	1.38	1.46	1.43	1.39	1.35	1.32	1.29	1.27	1.24	1.22	1.20
CD	1.71	1.69	1.59	1.51	1.44	1.39	1.34	1.30	1.26	1.23	1.20
D	2.33	1.85	1.63	1.51	1.42	1.36	1.31	1.26	1.23	1.20	1.17
DE	2.72	1.99	1.70	1.55	1.45	1.37	1.32	1.27	1.23	1.20	1.17
E	2.13	1.55	1.25	1.08	0.96	0.86	0.79	0.72	0.66	0.61	0.57
Tipo de Suelo	PGA = 0.01 g	PGA = 0.05 g	PGA = 0.1 g	PGA = 0.15 g	PGA = 0.2 g	PGA = 0.25 g	PGA = 0.3 g	PGA = 0.35 g	PGA = 0.4 g	PGA = 0.45 g	PGA = 0.5 g
BC	1.15	1.25	1.28	1.30	1.31	1.31	1.32	1.32	1.32	1.33	1.33
C	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
CD	1.32	1.36	1.38	1.39	1.39	1.39	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
D	1.53	1.56	1.55	1.54	1.52	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46
DE											
E											
Tipo de Suelo	PGA = 0.01 g	PGA = 0.05 g	PGA = 0.1 g	PGA = 0.15 g	PGA = 0.2 g	PGA = 0.25 g	PGA = 0.3 g	PGA = 0.35 g	PGA = 0.4 g	PGA = 0.45 g	PGA = 0.5 g
BC	1.14	1.24	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.26	1.26	1.25	1.24
C	1.30	1.33	1.32	1.30	1.28	1.27	1.25	1.24	1.23	1.22	1.21
CD	1.51	1.53	1.48	1.45	1.42	1.39	1.37	1.35	1.33	1.31	1.29
D	1.93	1.71	1.59	1.52	1.47	1.43	1.40	1.37	1.35	1.33	1.31
DE	2.72	1.99	1.70	1.55	1.45	1.37	1.32	1.27	1.23	1.20	1.17
E	2.13	1.55	1.25	1.08	0.96	0.86	0.79	0.72	0.66	0.61	0.57

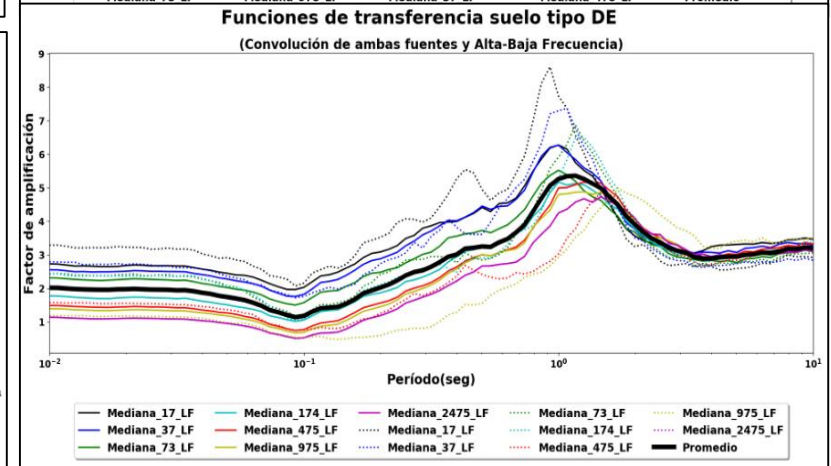
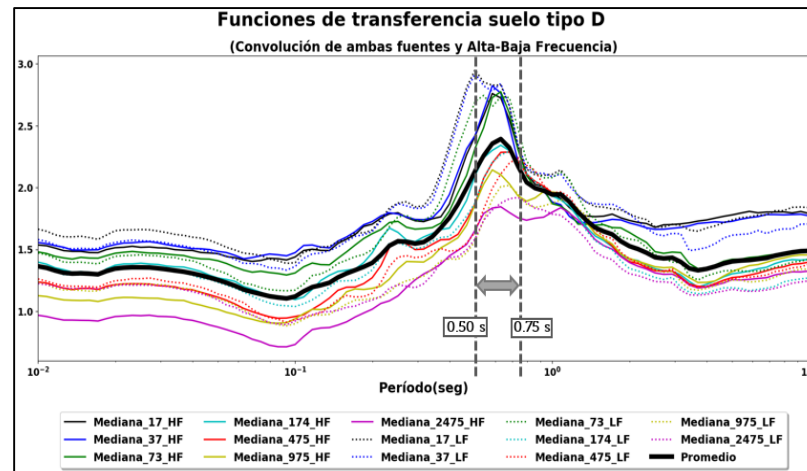
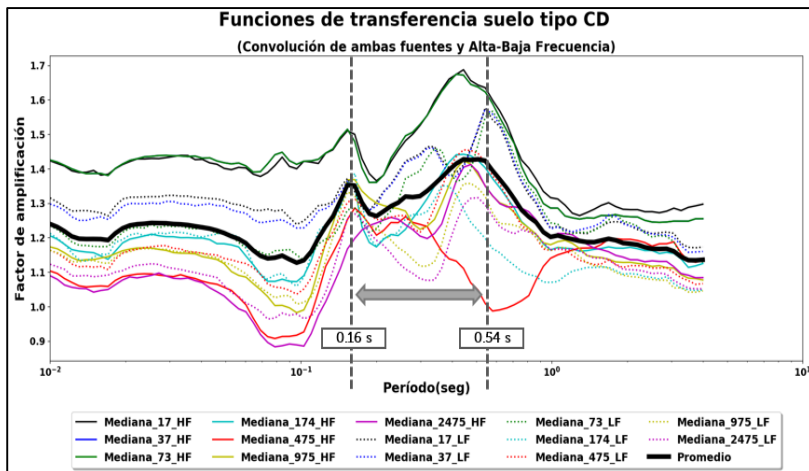
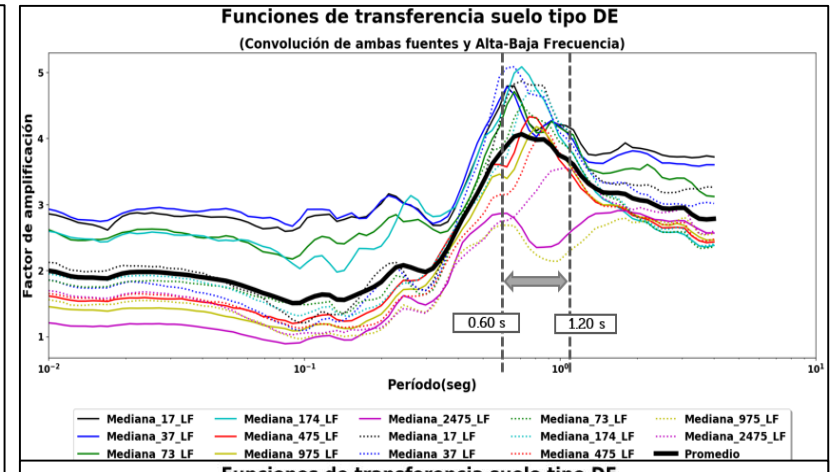
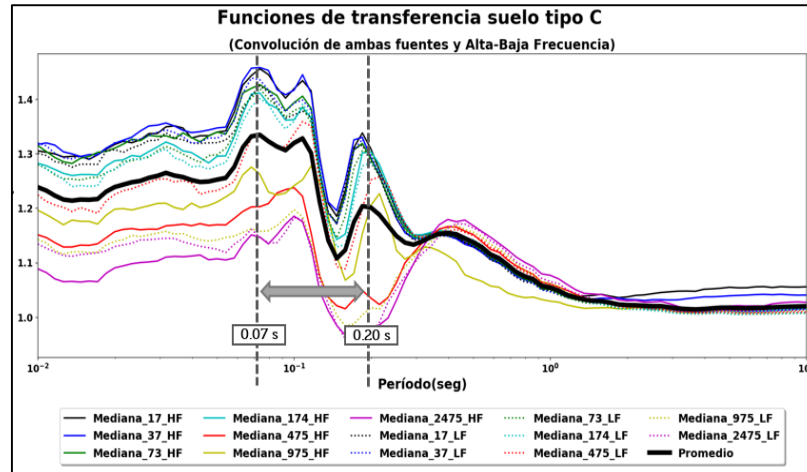
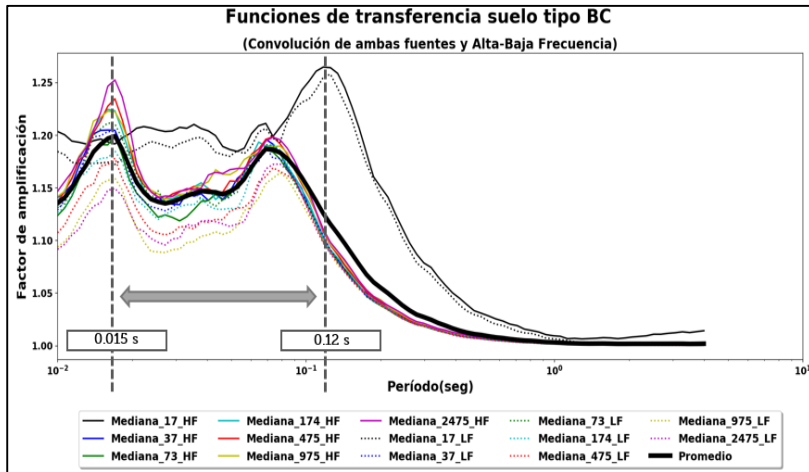
Contenido general

1. Justificación de trabajo
2. Amplificación del sitio
3. Antecedentes y estudios realizados a nivel nacional
4. Metodología empleada para caracterización
5. Mapa de zonificación sísmica "homogénea", en términos de V_s30
6. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Empíricos.
7. Estimación de efectos de sitio a través de Modelos Analíticos.
8. Factores de amplificación
9. Conclusiones



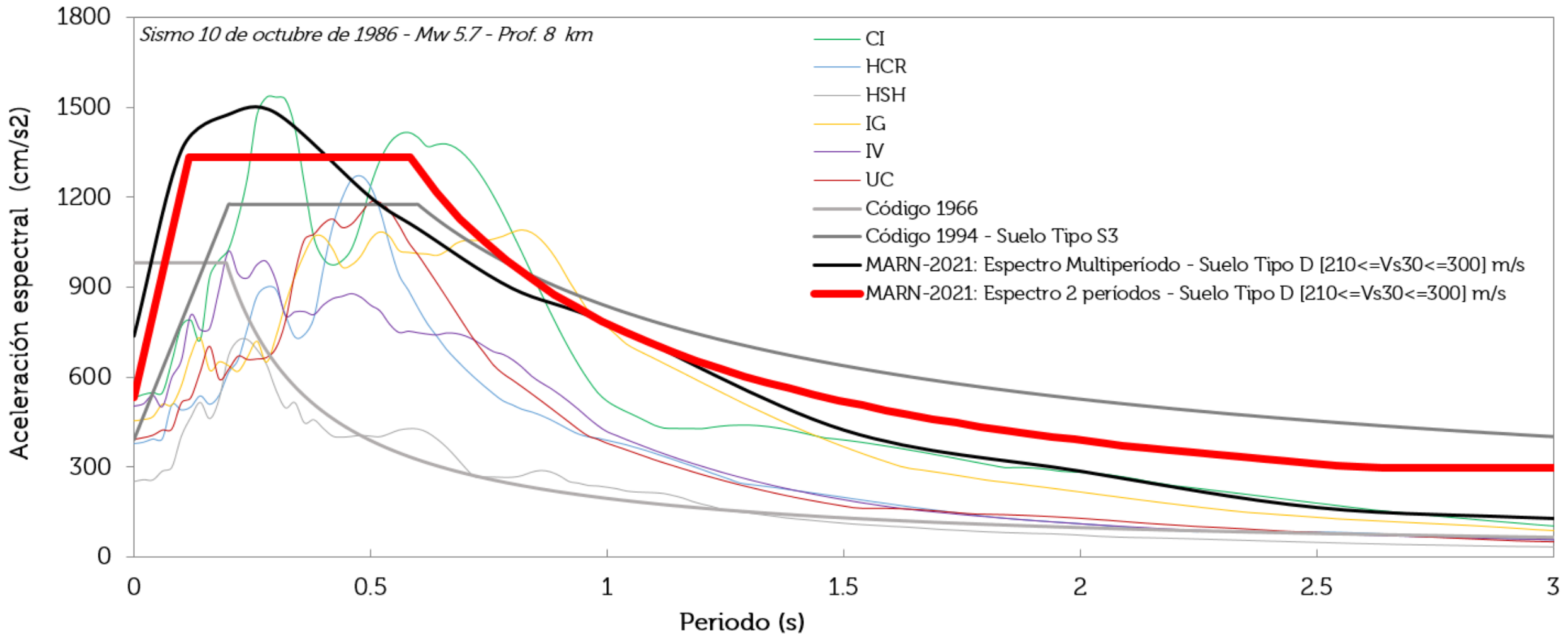
Conclusiones y recomendaciones

1) Se ha intentado en lograr de obtener una forma espectral para el diseño sísmico que más se acerque a nuestra realidad y complejidad de nuestros suelos. **Donde en ocasiones pueden surgir más de un modo predominante de vibración.**



Conclusiones y recomendaciones

- 1) Se ha intentado en lograr de obtener una forma espectral para el diseño sísmico que más se acerque a nuestra realidad y complejidad de nuestros suelos.



Conclusiones y recomendaciones

- 2) Para la conformación del mapa de zonas de respuesta sísmica homogénea de El Salvador (en términos de V_s30), se **recopilaron un total 619 puntos a nivel nacional**, con información de la estructura de velocidad de ondas de corte en profundidad, determinada tanto de forma directa como inferida geológicamente. Aproximadamente un 44% se concentra principalmente en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS).

- 3) El análisis del efecto de sitio, es sin duda, (junto a la selección de modelos de atenuación) uno de los componentes más esenciales en el cálculo de la **amenaza sísmica en superficie**; determinándose **“por el momento”** 5 tipos de suelo (BC, C, CD, D y DE) dentro del territorio; donde el tipo de suelo C (con V_s30 entre 440 y 640 m/s) representa el **mayor porcentaje (51%)** determinado en el país.

Conclusiones y recomendaciones

- 4) La práctica de asignación de Vs a partir de perfiles geológicos, se **considera muy subjetiva y a su vez con cierto grado de sesgo**, por parte de la opinión técnica del profesional de geología; por lo que debe de tomarse **como preliminar para su uso** en la caracterización de la respuesta de un sitio en específico. Sin embargo, dado que la información era abundante y abarcaba una buena distribución espacial a nivel nacional, se trató de aprovechar en lo mayor posible; y considerarla **con un menor peso "calidad"** al momento de efectuar las interpolaciones.
- 5) Para la generación del mapa de Vs30 utilizando la técnica Random Forest con predicción espacial, se elige el modelo que **explica la variabilidad en un 65% del Vs30**; el cual emplea los valores intrínsecos de las covariables y considera la calidad de la información de los datos observados, respecto a la metodología o fuente para la obtención y/o medición de la Vs.

Conclusiones y recomendaciones

- 6) En las tres técnicas empleadas para estimar empíricamente el efecto de sitio (utilizando registros acelerográficos) **se considera únicamente los movimientos horizontales**, asumiendo que con estas componentes se generaría la mayor contribución en la amplificación del terreno.

- 7) En la determinación de factores para generar las funciones de ampliación empíricas (F_a vs SA_{roca}) para cada tipo de suelo, **no se tomaron en cuenta las amplificaciones relativas obtenidas de la técnica de Nakamura (HVSR)**, debido a que no se tiene control sobre una posible variación acentuada en el contraste de velocidades (impedancia) de las onda de cuerpo (P) entre los diferentes estratos someros dentro de una columna de suelo; especialmente en la estratigrafía heterogénea y compleja que existe en ciertos sectores del país.

Conclusiones y recomendaciones

- 8) La técnica de la razón espectral H/V (HVSR) solo se utilizó **para determinar frecuencias predominantes en los registros acelerográficos** de estaciones particulares; con el objetivo de ir caracterizando los sitios; y observar cuales son los períodos que pudiesen verse activados al registrarse un evento sísmico.
- 9) La técnica de ajuste óptimo de modelos de atenuación (GMPEs), es considerada **como una alternativa práctica en virtud de poder utilizar análisis estadísticos y probabilísticos que permitan la búsqueda en la reducción de los residuales** que existen entre una observación real de movimiento fuerte con la de una predicción, considerando tanto la medida de intensidad PGA como para las demás de ordenadas espectrales.

Conclusiones y recomendaciones

- 10) En los análisis de las funciones de amplificación, se considera **tanto toda la data y utilizando la data que se mantienen al remover los "Outliers"**; expresando el ajuste de resultados, tanto con un modelo cuadrático exponencial y uno No exponencial; con el objetivo de tener diversos valores de amplificación y al final seleccionar **el factor más conservador**.

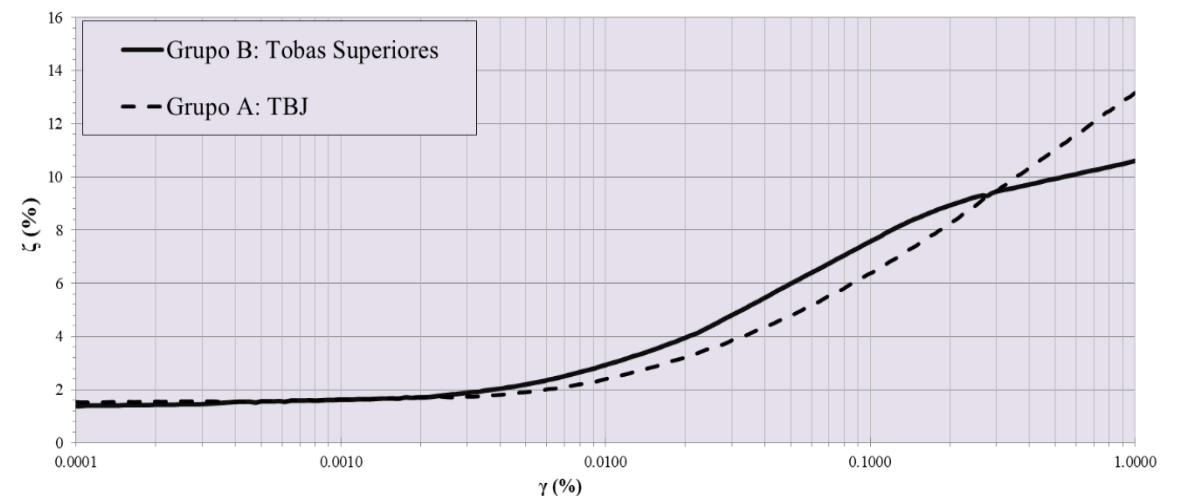
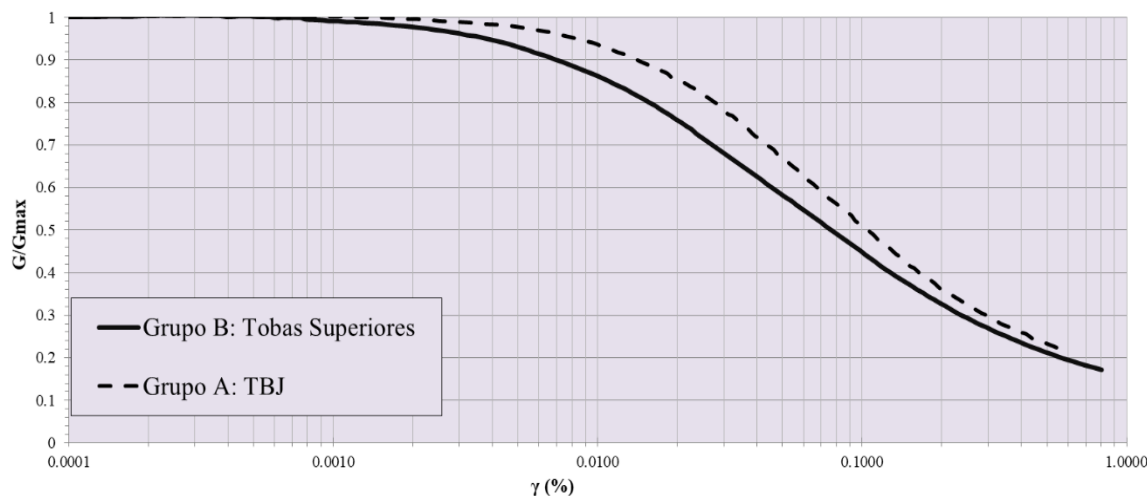
- 11) De acuerdo a los resultados de **funciones de transferencia**, tanto para los 16 pozos individuales en sitios específicos como para los cinco tipos de suelo, **el comportamiento no-lineal de una columna de suelo se evidencia en la atenuación del valor del factor de amplificación a medida se incrementa la intensidad del sismo**, asociándose este fenómeno a la generación de deformaciones más grandes en el suelo y al reacomodo de sus partículas, obligando a que los períodos picos o predominantes de la columna de suelo, muestren un rango de variaciones como diferentes modos de vibración.

Conclusiones y recomendaciones

- 12) El factor que más pesó durante el proceso de selección y aplicación de curvas dinámicas empíricas sobre las capas de la mayoría de los tipos de suelo, fue el de utilizar principalmente aquellas que presentasen en su concepción, la influencia de la presión de confinamiento (σ'_m); propiedad que condiciona mucho la forma espectral, valores y tendencia de las curvas del módulo de reducción de corte normalizado ($G/G_{máx}$) y el amortiguamiento histerético (D).
- 13) Las curvas dinámicas empíricas utilizadas para los estratos identificados como rocas o lavas intercaladas dentro de los perfiles de los pozos perforados, fueron provenientes de los modelos de: a) Schnabel (1973), b) Choi, W. (2008) y c) EPRI (1993), donde únicamente Schnabel (1973) es independiente de la presión de confinamiento (σ'_m).

Conclusiones y recomendaciones

14) Al momento de utilizar las curvas dinámicas propuestas por el Consorzio Salvador E. Italtekna-Italconsult en 1987, para aquellos tipos de suelo identificados como productos derivados de la caldera de Ilopango (Grupo B de Tobas superiores y Grupo A de la TBJ), se recomienda tener cautela en su aplicación, precisamente cuando dichas unidades se encuentren a profundidades no muy someras (donde la presión efectiva es importante). Lo anterior, obedece a que éstas fueron concebidas a partir muestras extraídas a profundidades superficiales (menor de 5 metros para suelos de Grupo A y menores a los 15 metros para suelos de Grupo B).



Conclusiones y recomendaciones

- 15) En el proceso de selección de registros acelerográficos para ser deconvolucionados a suelo firme y posteriormente aplicados a los modelos analíticos, se decidió en no hacer uso de sismos registrados a nivel internacional, debido a que en El Salvador, se cuenta con una extensa base de registros acelerográficos, donde a pesar que no se cuentan con niveles de aceleración considerables que corresponderían a periodos de retorno mayores (y los cuales podrían obtenerse de registros internacionales), se optó por realizar directamente el matcheo con los CMS provenientes de nuestra amenaza sísmica, para conservar tanto la forma y contenido frecuencial de nuestros propios acelerogramas registrados en el territorio salvadoreño.
- 16) Se han consolidado un total de 167,738 registros acelerográficos provenientes de 46 estaciones acelerográficas localizadas a lo largo de El Salvador, precisamente en las cercanías de los 16 sitios perforados.

Conclusiones y recomendaciones

- 17) Para el sitio de DIGESTYC los períodos predominantes podrían variar desde 0.08 s hasta 0.19 s, junto a factores de amplificación del orden 2.0 a 3.3 a lo largo de toda la banda espectral.
- 18) Para el sitio de Aviación Civil Ilopango los períodos predominantes podrían variar desde 0.20s hasta 0.80s, los cuales presentan una buena correspondencia con los valores de medio a largo período esperados en esa zona, donde existen importantes espesores de TBJ no consolidada. Los factores de amplificación oscilan entre 0.95 a 2.75.
- 19) Para el tipo de suelo BC, al someterse a diferentes registros sísmicos dentro del rango de los siete períodos de retorno, los períodos predominantes podrían variar desde 0.015 s hasta 0.12 s, junto a factores de amplificación del orden 0.99 a 1.21.

Conclusiones y recomendaciones

- 20) Los suelos de tipo BC se identifican como **rocas de consistencia blanda**, donde se podrían encontrar perfiles que contengan lavas levemente meteorizadas, junto con depósitos de flujos piroclásticos de gran espesor: como la erupción del Volcán de San Salvador y su unidad derivada (G1).
- 21) Para el tipo de suelo C, los períodos predominantes podrían variar desde **0.06 s hasta 0.20 s, junto a factores de amplificación del orden 0.96 a 1.38.**
- 22) Los suelos de tipo C se identifican como **suelos duros o muy densos**, donde podrían existir estratos potentes de lavas fracturadas muy meteorizadas, ignimbritas máficas meteorizadas y productos antiguos derivados de la caldera de Ilopango, como lo son las Tobas Inferiores.
- 23) Para el tipo de suelo CD, los períodos predominantes podrían variar desde **0.16 s hasta 0.54 s, junto a factores de amplificación del orden 0.90 a 1.79.**

Conclusiones y recomendaciones

- 24) Para el tipo de suelo CD, los períodos predominantes podrían variar desde **0.16 s hasta 0.54 s, junto a factores de amplificación del orden 0.90 a 1.79.**
- 25) Los suelos de tipo CD se reconocen como **suelos medio duros o densos**, los cuales podrían abarcar estratos de sedimentos aluviales rígidos, lahares meteorizados y productos menos antiguos de la caldera de Ilopango, denominados Tobas Superiores; ubicados éstos últimos a profundidades mayores, las cuales están sometidos a mayor presión confinante. También, podrían existir perfiles con espesores grandes de Tierra Blanca Joven (TBJ), extendiéndose principalmente las zonas proximales a la caldera, donde dichas secuencias de la erupción se van encontrando más consolidadas en profundidad.

Conclusiones y recomendaciones

- 26) Para el tipo de suelo D, los períodos predominantes podrían variar desde **0.50 s hasta 0.75 s, junto a factores de amplificación del orden 0.84 a 2.74.**
- 27) Los suelos de tipo D se identifican como **suelos poco duros o medianamente densos**, donde podrían existir columnas de suelo con espesores potentes de lahares bien meteorizados, así como también estratos constituidos por Tobas Superiores a un nivel superficial dentro de la columna de suelo; dejando más profundo a la Tierra Blanca Joven (TBJ), con una mayor presión de confinamiento y por ende, velocidades de corte relativamente grandes, respecto a una TBJ pobremente consolidada (en superficie).
- 28) Para el tipo de suelo DE, los períodos predominantes podrían variar desde **0.60 s hasta 1.20 s, junto a factores de amplificación del orden 2.0 a 4.5.**

Conclusiones y recomendaciones

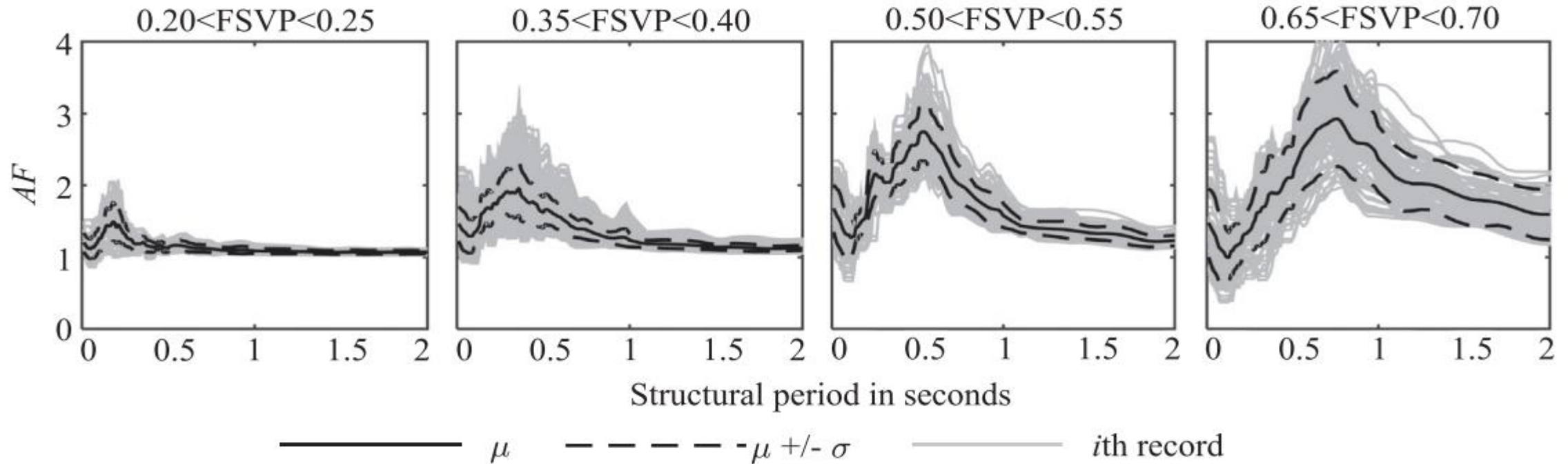
- 29) Los suelos de tipo DE se reconocen como **suelos blandos sueltos, comprendiendo perfiles con capas poco consolidadas**, como lo son rellenos pobremente compactados, suelos plásticos meteorizados, suelos retrabajados someros con algunos bloques de roca y granos gruesos; y de manera especial, sedimentos en zona de valles y en planicies costeras, así como también la unidad de TBJ superficial con espesores relativamente pequeños, localizadas en zonas medias o distales a la caldera de Ilopango.
- 30) Las **funciones de transferencia** para cada tipo de suelo fueron traducidas e integradas en **funciones de amplificación**, que sirvieron para derivar tablas resumen constituidas por una serie de factores de amplificación para cada medida de intensidad asociada a un período estructural específico de interés ingenieril

Conclusiones y recomendaciones

31) Los suelos de tipo DE se reconocen como **suelos blandos sueltos, comprendiendo perfiles con capas poco consolidadas**, como lo son rellenos pobremente compactados, suelos plásticos meteorizados, suelos retrabajados someros con algunos bloques de roca y granos gruesos; y de manera especial, sedimentos en zona de valles y en planicies costeras, así como también la unidad de TBJ superficial con espesores relativamente pequeños, localizadas en zonas medias o distales a la caldera de Ilopango.

Cosas por hacer para conectar estudios de microzonificación

- a) Se puede obtener el **periodo fundamental de vibración del suelo (FPSV)** para cada **perfil estocástico analizado** y se podría clasificar en rangos de FPSV para niveles de intensidad específica.

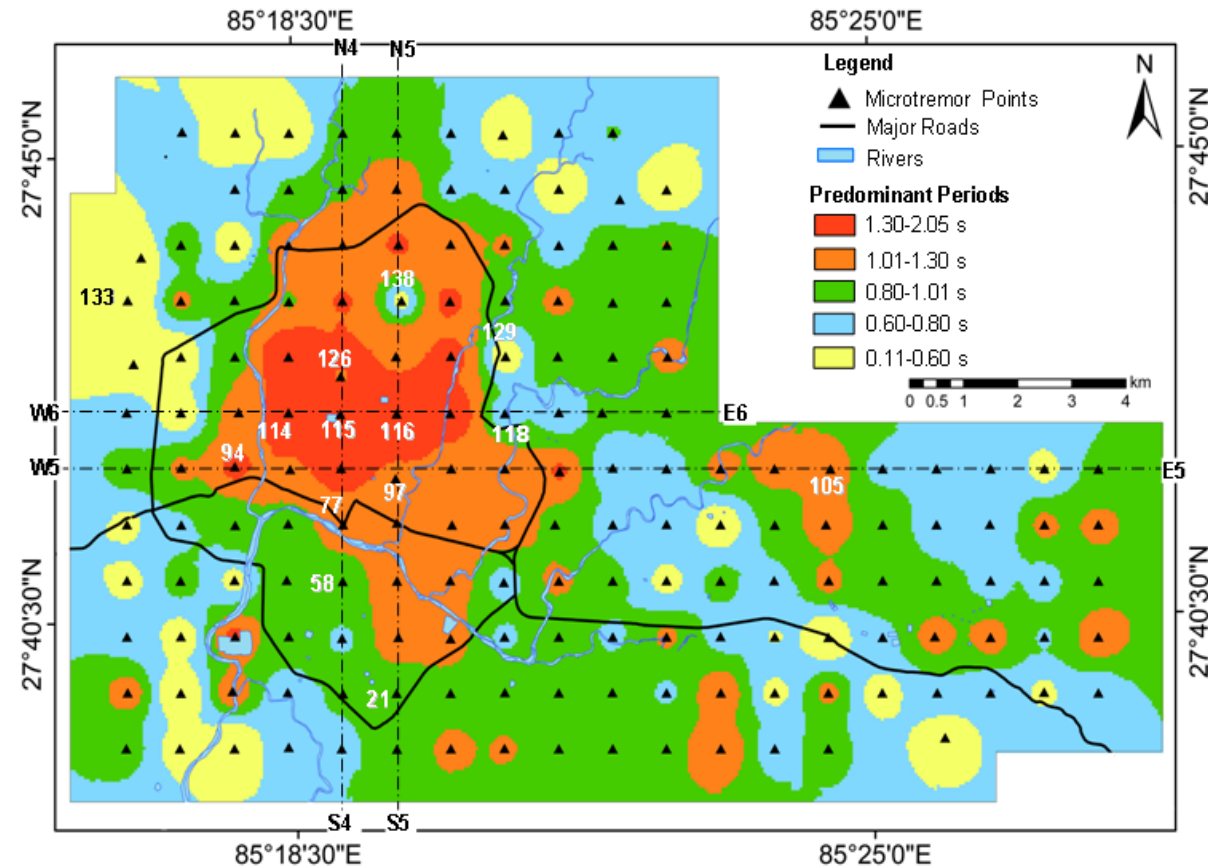


Cosas por hacer para conectar estudios de microzonificación

b) Buscar un mapa de periodo fundamental de vibración del suelo (FPSV) recién elaborado en cierta zona.

- Estos mapas son el parámetro clave para asignar a cada ubicación geográfica (grilla) un factor de amplificación de aceleración espectral específica.

- El rango de períodos de vibración fundamental que resultan de los **modelos analíticos 1D** debe estar de acuerdo con el mapa FSVP resultante en la misma ubicación



Fuente: UNIANDES, 2018

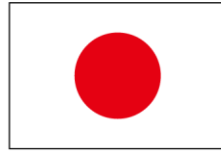


MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS
NATURALES

Gracias
Imixco@marn.gob.sv



Uníversidad Centroamericana
José Simeón Cañas



**Colaboración del
Pueblo Japonés**



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE



MINISTERIO DE
OBRAS PÚBLICAS Y
DE TRANSPORTE