



**Facultad de Ciencias e Ingeniería**  
**Departamento de Construcción.**  
**Programa de Maestría en Ingeniería Estructural.**

Título de la Tesis:

---

PROPUESTA DE COEFICIENTES DE  
AMPLIFICACION DE SITIO PARA LOS SUELOS  
DE LA CIUDAD DE MANAGUA

---

Tesis de Maestría para optar al título de:  
Master en Ingeniería Estructural.

**AUTOR: ING. MAYCOL CHRISTOPHER RUGAMA IDIAQUEZ**

**TUTOR: FREDDY ARIEL SANCHEZ RUIZ**

**ASESOR: EDWIN ANTONIO OBANDO HERNANDEZ**

**12 DE NOVIEMBRE DE 2022**



## Carta de aprobación del tutor



**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA.  
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN.  
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL.**

### **CARTA AVAL DEL TUTOR.**

Estimados Miembros de la Comisión del Programa,  
Sirva la presente para avalar que: Maycol Christopher Rugama Idiaaquez, con numero de carnet 12-04001-5 estudiante del **Programa de Maestría en Ingeniería Estructural**. Cumpliendo con los parámetros, científico-técnicos, académicos y metodológicos, ha culminado satisfactoriamente su tesis, la cual lleva por título:

PROPUESTA DE COEFICIENTES DE AMPLIFICACION DE SITIO PARA LOS SUELOS DE LA CIUDAD DE MANAGUA

Por tanto, considero que la presente tesis está lista para que sea asignado el Comité Académico Evaluador, para su posterior pre-defensa y defensa.

Sin más que mencionar, extendiendo la presente en tres tantos de un mismo tenor, a los 9 días, del mes de noviembre del año 2022.

Firma.

Freddy Ariel Sánchez Ruiz

Nombre del Tutor:

*¡A la libertad por la Universidad!*

# Índice

## Contenido

1	CAPÍTULO I. Aspectos Generales.....	1
1.1	Introducción .....	1
1.2	Problemas.....	2
1.3	Antecedentes.....	3
1.3.1	Faccioli, Santoyo & León, 1973 .....	7
1.3.2	Parrales RM, 2006 .....	9
1.3.3	Hernández O, 2009.....	10
1.3.4	CIGEO 2015.....	11
1.3.5	Obando EA. 2017.....	12
1.4	Justificación .....	14
1.5	Objetivos.....	15
1.5.1	Objetivo General .....	15
1.5.2	Objetivo específico.....	15
1.6	Alcances y limitaciones del estudio.....	15
2	CAPITULO II. Datos para el estudio (Estudios de sitio, datos de entradas)..	16
3	CAPITULO III. Fundamentación Teórica del método. ....	18
3.1	SIMULACIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS. ....	18
3.2	Método del Espectro Objetivo Condicional (CTS).....	18
3.2.1	Ajuste Espectral no Estacionario usando Wavelets .....	20
3.2.2	Método Estocástico.....	21
3.2.3	Curvas dinámicas.....	22
3.2.4	Métodos de análisis .....	26
3.2.5	Cálculo de deformación .....	30

3.2.6	Aproximación Lineal Equivalente.....	32
3.2.7	Método no lineal en dominio de tiempo (NL).....	35
3.2.8	Amortiguamiento Histérico.....	36
3.2.9	Modelo hibrido hiperbólico.....	38
3.2.10	Ratio Response Spectrum – Relación de Espectros de Respuesta (RRS)	39
3.2.11	Tipos de espectros .....	40
4	CAPITULO IV. Procesamiento y Análisis de Datos.....	43
4.1.1	Curvas dinámicas que se ajustaron a las condiciones de los suelos de la ciudad de Managua.....	45
4.1.2	Razón de espectros de respuesta RRS.....	48
5	CAPITULO V. Resultados.....	53
6	CAPITULO VI. Aspectos finales.....	54
6.1	Conclusiones .....	54
7	Recomendaciones.....	55
8	Referencias Bibliográficas.....	56
9	Anexos.....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - DISTRIBUCIÓN DE SITIOS SELECCIONADOS SEGÚN PERFILES VS UTILIZANDO VARIOS MÉTODOS GEOFÍSICOS .....	6
<b>Figura 2</b> - DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD DE CORTE PROMEDIO HASTA 30 METROS DE PROFUNDIDAD EN MANAGUA.....	7
<b>Figura 3</b> - PERFIL ESTRATIGRÁFICO N-S PARA LA CIUDAD DE MANAGUA Y b). MODELOS VS DERIVADOS POR SONDEOS DE DOWN-HOLE (Faccioli, Santoyo, & Leon, 1973) .....	8
<b>Figura 4</b> - UBICACIÓN DE SITIOS DE EXPLORACIÓN (PARRALES, 2006) .....	9
<b>Figura 5</b> - PERFILES VS PROMEDIO POR FAMILIA DE CURVA, MAPA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS Y TABLA DE CLASIFICACIÓN POR TIPO DE SUELO SEGÚN VS30 (Hernández Rubio, 2009).....	11
<b>Figura 6</b> - MAPA DE UBICACIÓN DE SITIOS ESTUDIADOS DENTRO DEL ÁREA DE MANAGUA (IGG/CIGEO, UNAN-Managua;Cooperación Internacional de Japón (JICA), 2015).....	12
<b>Figura 7</b> - MAPA DE PROPUESTA UNA CLASIFICACIÓN DE SUELOS A PARTIR DEL VS30 (OBANDO, 2017).....	13
<b>Figura 8</b> - FUNCIONES DE AMPLIFICACIÓN PROMEDIO PARA LAS TRES ZONAS IDENTIFICADAS CON RESPECTO A LOS FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL CÓDIGO SÍSMICO DE NICARAGUA (OBANDO, 2017).....	13
<b>Figura 9</b> - COMPARACIÓN DE LOS TRES MÉTODOS UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DE RRS MANAGUA LORIO & REYES 2019 .....	17
<b>Figura 10</b> - ESPECTRO DE AMENAZA UNIFORME.....	19
<b>Figura 11</b> - VARIACIÓN DEL MÓDULO DE CORTE (a) Y LA RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (b), CON ESFUERZO DE CIZALLA PARA ARENA (SEED E IDRIS, 1970 Y EPRI 1993).....	23
<b>Figura 12</b> - VALORES MEDIOS Y DESVIACIONES ESTÁNDAR ASOCIADAS CON LAS ESTIMACIONES PUNTUALES DE (a) REDUCCIÓN DEL MÓDULO NORMALIZADO Y (b) CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO DEL MATERIAL (Darendeli, 2001) .....	24
<b>Figura 13</b> - CURVAS DINÁMICAS (Obando E. , 2017).....	25
<b>Figura 14</b> - SISTEMA MULTI-ESTRATO SOBRE ROCA ELÁSTICA (KRAMER, 1996).....	26
<b>Figura 15</b> - CURVAS DE MÓDULO DE RIGIDEZ Y FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO PARA MATERIALES VISCO-ELÁSTICOS.....	33
<b>Figura 16</b> - COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO CORTANTE EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN .....	37
<b>Figura 17</b> - GRÁFICO INDICATIVO DEL MÉTODO DE DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA .....	40

<b>Figura 18</b> – ESPECTRO DE AMENAZA UNIFORME, ESTIMACIÓN PUNTUAL (IZQ) Y ESTIMACIÓN POR ZONIFICACIÓN (DER).....	43
<b>Figura 19</b> - REGISTRO SISMICO SELECCIONADOS.....	44
<i>Figura 20</i> - .....	44
<b>Figura 21</b> - CURVA DE SEED & IDRISS, 1970 CURVA DE SEED & IDRISS, 1970 .....	45
<b>Figura 22</b> - CURVA DE EPRI, 1993 .....	46
<b>Figura 23</b> - CURVA DE ISHIBASHI & ZHANG, 1993 .....	46
<b>Figura 24</b> - CURVA DE DARENDELI, 2001 .....	47
<b>Figura 25</b> - RRS PARA P10 .....	48
<b>Figura 26</b> – METODO EQL - RRS.....	52
<b>Figura 27</b> - RRS P2 .....	59
<b>Figura 28</b> - RRS P1 .....	59
<b>Figura 29</b> - RRS P4 .....	59
<b>Figura 30</b> - RRS P3 .....	59
<b>Figura 31</b> - RRS P6 .....	59
<b>Figura 32</b> - RRS P5 .....	59
<b>Figura 33</b> - RRS P8 .....	59
<b>Figura 34</b> - RRS P7 .....	59
<b>Figura 35</b> - RRS P10 .....	59
<b>Figura 36</b> - RRS P9 .....	59
<b>Figura 38</b> - RRS P11 .....	59
<b>Figura 37</b> - RRS P12 .....	59
<b>Figura 40</b> - RRS P14 .....	59
<b>Figura 39</b> - RRS P13 .....	59

## **ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1</b> - CLASIFICACIÓN DE SUELO SEGÚN EL RNC-07 .....	2
<b>Tabla 2</b> - ESTUDIOS PREVIOS CONSULTADOS .....	5
<b>Tabla 3</b> - COORDENADAS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE PERFILES MASW (PARRALES, 2006).....	10
<b>Tabla 4</b> - FORMULAS UNIFICADAS (Ishibashi & Zhang, 1993).....	24
<b>Tabla 5</b> - Parámetros para el cálculo de modelo hibrido hiperbólico .....	39



## Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi hermana Sheyla Idiáquez que gracias a ella pude llegar hacer lo que hoy soy. Sin su voluntad, amor y apoyo incondicional no hubiese sido posible continuar mis estudios. Gracias a Dios por darme a un ángel que me acompaña y ayudo en mi camino.

## Agradecimiento

Agradezco al Ministerio de Transporte e Infraestructura MTI por facilitar los equipos para la realización de los estudios, a la UNAN-Managua por darme la oportunidad de presentar este estudio y brindarme el acompañamiento técnico, al PhD. Edwin Obando por ser mi mentor en esta área de estudio y al PhD. Fredy Sánchez por ser mi tutor y quien me ha impulsado a llevar este trabajo hasta su finalización. Agradezco al equipo de trabajo de la dirección de normas de la construcción del MTI, así como al equipo docente del departamento de construcción de la facultad de ingeniería y arquitectura de la UNAN-Managua.

## Resumen

En este trabajo de tesis de maestría se desarrolló un nuevo modelo de coeficientes de amplificación de sitio en 37 puntos ubicados en la ciudad de Managua, a partir de las razones espectrales mediante los métodos lineal equivalente y no lineal de respuesta sísmica de sitio unidimensional.

Los coeficientes determinados se han ploteado en un gráfico con sus respectivos valores de velocidades de ondas de corte a los primeros 30 metros ( $V_{s30}$ ), y se han creado modelos de regresión para ver los que mejor se ajusten al comportamiento de los valores calculados. Para el cálculo de los factores de amplificación se considera la influencia de respuesta tanto para los periodos cortos, así como para los periodos largos, se enfatiza en la forma espectral y nivel de amenaza sísmica del área de estudio y su influencia en la misma.

Se proponen unos valores de factores de amplificación para suelos que cumplan las condiciones y variables de análisis contempladas en este estudio, estos pueden ser usado para el desarrollo de espectros de diseño sísmico.

Se preparó un mapa de velocidades de ondas de corte  $V_{s30}$  y una tabla con los valores obtenidos en este estudio, dado que fueron insumos de aporte para la norma sismorresistente para la ciudad de Managua.



# 1 CAPÍTULO I. Aspectos Generales

## 1.1 Introducción

La ciudad de Managua es principalmente afectada por dos fuentes sísmicas que son la zona de subducción y el sistema de fallas locales, debido a estas fallas Managua tiene una alta probabilidad de experimentar terremotos frecuentemente como fue la experiencia en el caso de los tres terremotos más fuertes ocurridos en 1931, 1972 y el del 2014.

La necesidad de reducir los niveles de vulnerabilidad particularmente de las zonas con densidad poblacional más altas de la ciudad de Managua, se logra mejorando las técnicas y procedimientos de construcción que a su vez deben ir de la mano de una correcta caracterización del peligro sísmico inherente teniéndose en cuenta las características geológicas del graben de Managua.

Uno de los parámetros más importantes en la construcción es la respuesta sísmica del suelo, sobre el cual se cimentan las estructuras que es ampliamente estudiado desde varios enfoques, como es la caracterización de rigidez del suelo a partir de la obtención de modelos de perfiles de ondas de corte, ciertamente este aspecto condiciona el comportamiento de las ondas sísmicas que se transmiten en las estructuras.

Las respuestas sísmicas de sitio realizadas en el área de estudio generan unas amplificaciones dinámicas debido al suelo, estos se cuantificaron y presentaron valores recomendados para el uso en el diseño sísmico de estructuras.

## 1.2 Problemas

Nicaragua no contaba con un estudio de amplificación dinámica de suelos realizada con mediciones directas en Nicaragua, el Reglamento nacional de la construcción RNC-07 en su artículo 25 tabla 2 sugería unos factores de amplificación por tipos de suelo (S) el cual no se tenía evidencia cuantificable de dichos valores, por ello se decidió realizar esta investigación y así determinar los valores que mejor se ajusten a un modelo que describa el comportamiento de los resultados a partir de las mediciones y cálculos de razones espectrales mediante la respuesta sísmica de sitio.

*Tabla 1 - CLASIFICACIÓN DE SUELO SEGÚN EL RNC-07*

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Descripción del suelo</b>	<b>Vs (m/s) (no menor de 10m)</b>
Tipo I	Afloramiento rocoso	>750
Tipo II	Suelo firme	$360 \leq V_s \leq 750$
Tipo III	Suelo moderadamente blando	$180 \leq V_s \leq 360$
Tipo IV	Suelo muy blando	<180

### 1.3 Antecedentes

La ciudad de Managua por su ubicación geológica y tectónica ha sido a lo largo de la historia víctima constante de eventos sísmicos, por lo que las investigaciones referentes al comportamiento de los suelos ante eventos sísmicos iniciaron luego del terremoto con mayor magnitud registrado en la escala de Richter en 1972.

A continuación, se citan las más relevantes.

En 1973, Faccioli, Santoyo & León realizó el primer estudio de microzonificación en el área de Managua siendo este la base de este tipo de estudios, fue realizado con el objetivo de proponer la estratigrafía en base al valor del número de golpes N de los ensayos de SPT en cuatro puntos de la ciudad como es la ESSO refinería (SWM1), Hotel Balmoral (SWM2), Teatro Rubén Darío (SWM3) y Colonia Centroamérica (SWM4), los ensayos realizados tuvieron en promedio una penetración de 15 metros como resultado Faccioli sugiere una clasificación del suelo de Managua abordado en el marco referencial.

Parrales en 2006 realizó la primera propuesta de modelos de velocidad de onda corte con levantamientos MASW y sondeos SH por refracción sísmica para 9 sitios dentro del área de Managua. Se realizó pruebas de laboratorio a muestras de roca elástica recuperado para estimar valores de densidad

En 2009 Hernández elaboró un estudio de caracterización sísmica para el área urbana de la ciudad de Managua por medio de la frecuencia fundamental del suelo a partir de mediciones de ruido ambiental con el método de Nakamura como resultado Hernández propone tres tipos de suelos en función de la velocidad de onda de corte promedio.

La colaboración del JICA con IGG-CIGEO en el 2015 realizaron un estudio que completaba la microzonificación sísmica del municipio de Managua utilizando

técnicas geofísicas con los métodos de SPAC, MASW y H/V para análisis de susceptibilidad a deslizamiento en áreas específicas del municipio.

Posteriormente en 2017 el PhD Edwin Obando, realizó un estudio que tiene por título Estimación superficial de estructura Vs para sitio sísmico, Respuesta activa usando el método MASW - Un caso, Estudiar en el área urbana. Obando realizó 24 sitios con levantamientos en toda la zona urbana de la ciudad de Managua resultando una propuesta de clasificación de suelos a partir de Vs 30.

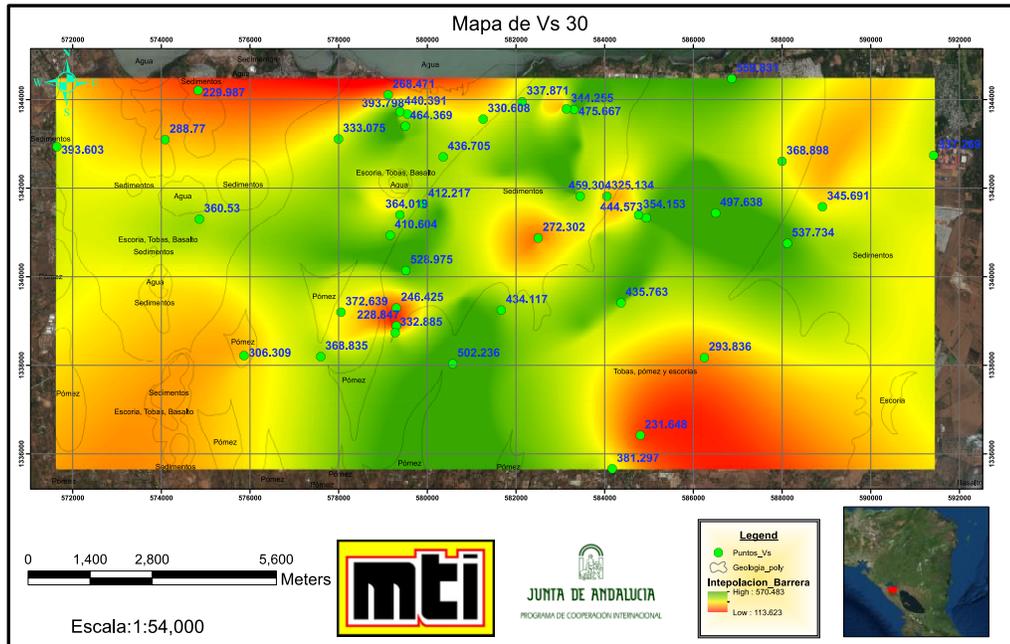
El estudio más reciente fue realizado el trabajo Lorio y Reyes en 2019 una investigación que tiene por título análisis de respuesta sísmica de la zona urbana de la ciudad de Managua por los métodos Lineal Equivalente Aproximado (EQL), Lineal Equivalente Dependiente de la Frecuencia (EQLFD) y No Lineal en dominio del tiempo (NL) utilizando el software SeismoSoil. Esta investigación es fundamental para el desarrollo de este trabajo ya que los datos generados de espectros de superficie en ese trabajo fueron insumos para el cálculo de los factores de amplificación propuestos en este trabajo.

En esta sección se describen los estudios geofísicos y geotécnicos realizados en el área de Managua orientados a la determinación de modelos de velocidad de onda de corte. En la tabla 1 se detallan todos los estudios recopilados disponibles y que se enfocaron en la determinación de clasificación de suelos en el área urbana de la ciudad de Managua. Así mismo se detallan los métodos que en cada estudio se realizaron incluyendo el tipo y afiliación de los mismos.

*Tabla 2 - ESTUDIOS PREVIOS CONSULTADOS*

<b>Nº</b>	<b>AUTOR(ES)</b>	<b>AÑO</b>	<b>TIPO DE ESTUDIO</b>	<b>FUENTE</b>	<b>METODOS USADOS</b>
<b>1</b>	Faccioli E, et.al	1973	Artículo de Conferencia	EERI, USA	Sísmica de Pozo
	Valera, E.	1973	Artículo de Conferencia	EERI, USA	SPT
<b>2</b>	Ekholm & Norberg,	1989	Reporte	KTH, Estocolmo, Suecia	SASW
<b>3</b>	Escobar & Corea	1998	Monografía	UNI, Nicaragua	Correlaciones SPT
<b>4</b>	Parrales, R	2006	Tesis Maestría	Universidad de Lund, Suecia	MASW, Refracción sísmica, Nakamura
<b>5</b>	Hernández, O	2009	Tesis Maestría	UNAN-Managua	Nakamura (H/V), MASW
<b>6</b>	Obando, Ryden, Park, Ulriksen	2011	Artículo científico	Engineering Geology, ELSEVIER	MASW, Nakamura (H/V), Sísmica de pozo
<b>7</b>	Castillo & Zepeda	2013	Monografía	UCA, Nicaragua	Nakamura (H/V)
<b>8</b>	Castrillo et.al	2014	Artículo Conferencia	The 5th Asia Conference on Earthquake Engineering 2014	Nakamura (H/V)
<b>9</b>	CIGEO	2015	Reporte técnico	IGG-CIGEO&JICA	SPAC, MASW, Nakamura (H/V)
<b>10</b>	Obando E.	2017	Artículo de Conferencia	EAGE, Holanda	MASW





**Figura 2 - DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD DE CORTE PROMEDIO HASTA 30 METROS DE PROFUNDIDAD EN MANAGUA.**

A continuación, se describen los resultados de estudios donde se obtuvieron modelos Vs en el área urbana de la ciudad de Managua.

### 1.3.1 Faccioli, Santoyo & León, 1973

A raíz del terremoto de 1972, elaboró un estudio de microzonificación en el área de Managua y realizó una propuesta de estratigrafía en base al valor de N de los ensayos SPT abordados en su estudio (Faccioli, Santoyo, & Leon, 1973). Los ensayos SPT tuvieron en promedio una penetración de 15 metros, siendo la máxima profundidad ensayada 34 metros. Sugiere la siguiente clasificación de suelos:

- a. Suelos blandos ( $N < 10$ )
- b. Suelos medianamente densos ( $10 < N < 50$ )
- c. Suelos firmes o compactos ( $N > 50$ )

Los suelos superficiales, o suelos blandos, están compuestos por arenas limosas y pertenecen a los suelos de origen aluviales. La segunda capa está compuesta de suelo medianamente densos corresponde a arenas de densidad media, pómez, gravas y canteras. La tercera capa corresponde a arenas limosas muy compactadas

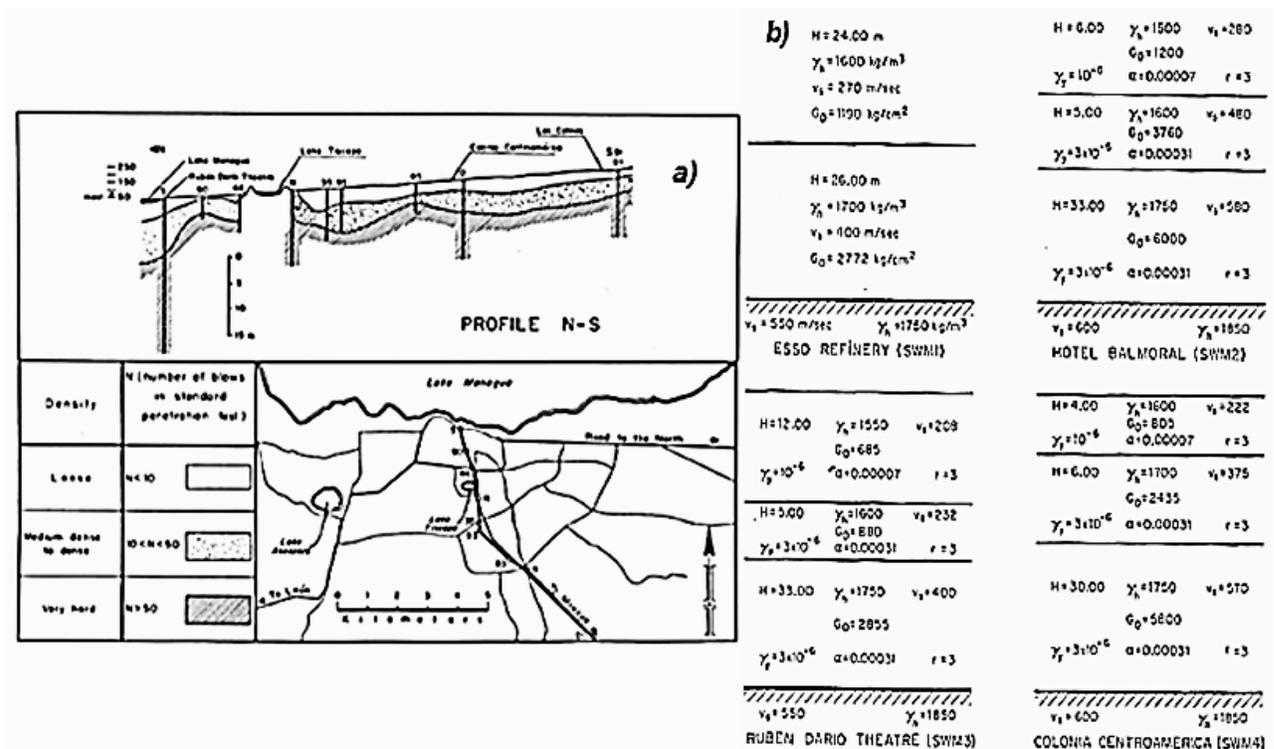


Figura 3 - PERFIL ESTRATIGRÁFICO N-S PARA LA CIUDAD DE MANAGUA Y b). MODELOS VS DERIVADOS POR SONDEOS DE DOWN-HOLE (Faccioli, Santoyo, & Leon, 1973)

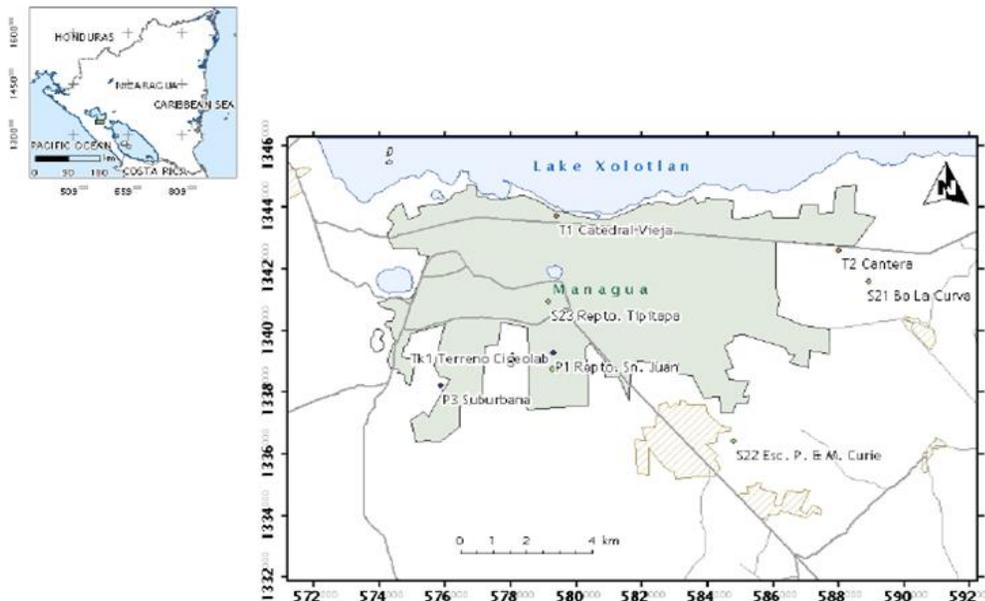
o talpetate.

Los estudios abordados permitieron obtener perfiles de la estratigrafía de la ciudad en la dirección N-S y E-W donde se aprecia las variaciones en los espesores de las capas del suelo propuesta y donde lo más destacable es la variación del basamento que puede experimentarse de un sitio a otro dentro de la ciudad.

Para el estudio de la respuesta sísmica de sitio en la ciudad de Managua, muchas de las investigaciones se han basado en modelos Vs obtenidos con métodos de SPT (Standard Penetración Test) y algunos casos métodos geofísicos de mayor cobertura.

### 1.3.2 Prrales RM, 2006

Prrales hace una primera propuesta de modelos de velocidad de onda de corte en varios puntos dentro del área de Managua por medio de levantamiento de perfiles MASW y sondeos SH por refracción sísmica (Prrales, 2006).



**Figura 4 - UBICACIÓN DE SITIOS DE EXPLORACIÓN (PARRALES, 2006)**

Los sitios muestreados que se muestran en el mapa de la *ilustración 7*, se concentran en la parte sur de la ciudad y con un único punto en la parte norte de la ciudad. Es interesante que hizo estimación de velocidad de ondas de corte a la zona de las canteras la cuales afloran en la zona este de la ciudad, lo cual servirá para correlacionar con mediciones más profundas en la zona urbana de Managua.

**Tabla 3 - COORDENADAS Y PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE PERFILES MASW (PARRALES, 2006)**

Using the MASW method to create shear-wave velocity profiles in Managua, Nicaragua

**Table 1. Site localization and acquisition parameters.**

Site ID	Site	Coordinates (UTM)		Elevation	Source*	Source offset (x <sub>s</sub> )	Receiver spread† (x <sub>r</sub> )	Maximum offset (x <sub>m</sub> )	Spread orientation
		East	North						
P1	Repto. Sn. Juan	579301	1339296	166	5.44	10	23	33	S70°W
P2	Esc. Rosa de Sarón	278052	1339201	175	5.44	10	23	33	E
P3	Suburbana	575866	1338223	259	5.44	10	47	57	S75°E
S21	Bo La Curva	588913	1341582	81	9.07	10	23	33	N59°W
S22	Esc. P. y M. Curie	584805	1336420	245	9.07	10	23	33	N98°E
S23	Repto. Tipitapa	579162	1340939	127	9.07	10	23	33	S20°E
Tk1	Terreno Cigeolab	579276	1338737	174	9.07	10	47	57	N61°W
T1	Catedral Vieja	579382	1343726	56	63.5	15	47	62	E
T2	Cantera	587998	1342608	69	63.5	39	23	62	N30°E

\* Weight of the sledgehammer/falling weight (kg).

† Spreads of 47 m refer to "walkaway" measurements.

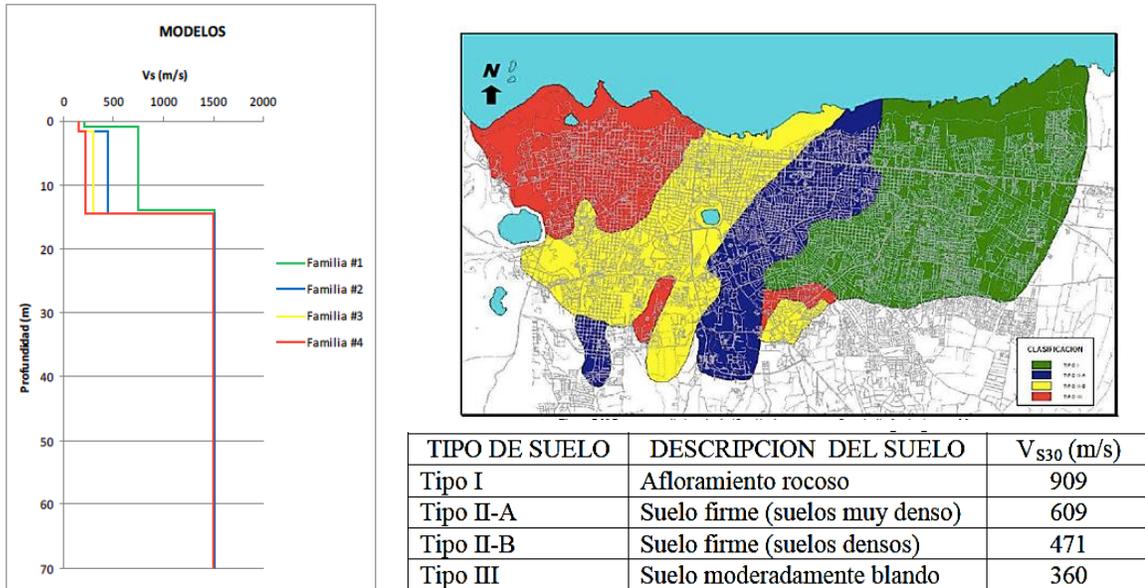
Note: All distances in meters.

En los 9 sitios estudiados Parrales 2006 definió valores de velocidad de corte de 180 - 310 m/s en los primeros 8 metros hasta alcanzar valores de entre 445 m/s a 515 m/s a los que asocio a roca elástica entre los 8 m a 16 metros de profundidad. Además, sugiere que valores superiores a 760 m/s puede ocurrir a partir de los 40 metros de profundidad. Se realizó pruebas de laboratorio a muestras de roca elástica recuperado para estimar valores de densidad.

### 1.3.3 Hernández O, 2009

Este estudio consistió en la caracterización del área urbana de la ciudad de Managua por medio de la frecuencia fundamental del suelo a partir de mediciones de ruido ambiental con el método de Nakamura.

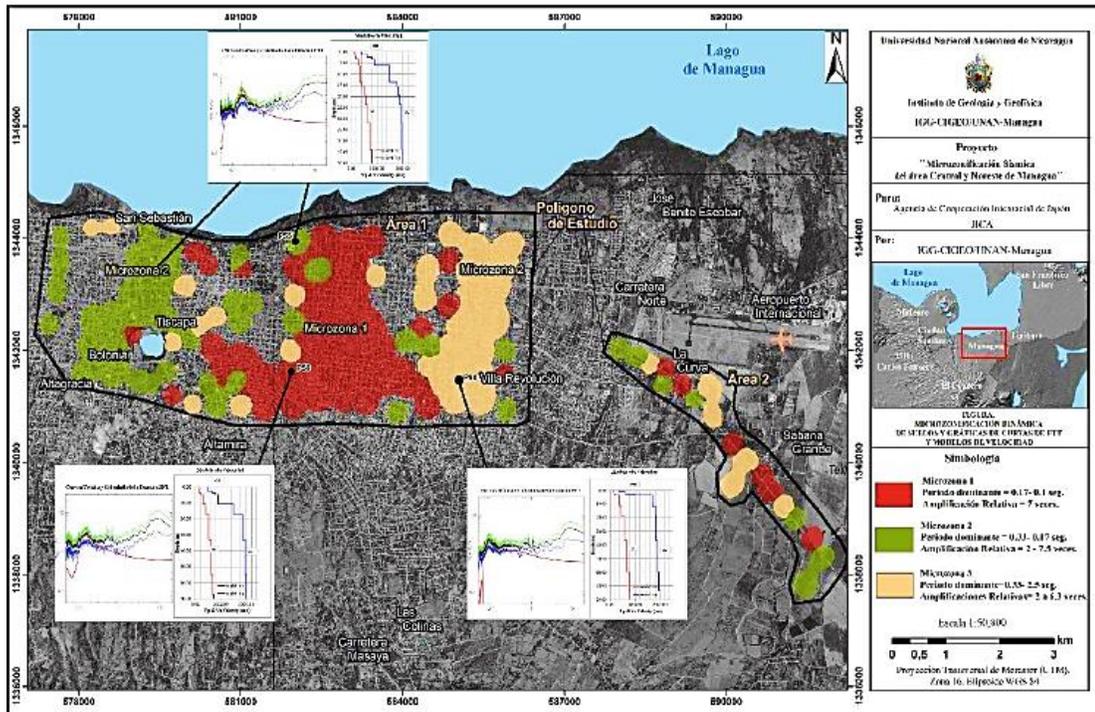
El autor presenta una propuesta de los suelos de Managua por medio de familiar de curvas cuyos promedios fueron utilizados para estimar modelos de velocidad de onda de corta de manera indirecta asociados a los patrones de vibración determinados en la ciudad. En general Orlando Hernández en 2009 propone 3 tipos de suelos en función de la velocidad de onda de corte promedio.



**Figura 5 - PERFILES VS PROMEDIO POR FAMILIA DE CURVA, MAPA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS Y TABLA DE CLASIFICACIÓN POR TIPO DE SUELO SEGÚN VS30 (Hernández Rubio, 2009)**

### 1.3.4 CIGEO 2015

Este estudio fue realizado dentro del marco de colaboración del JICA y el IGG-CIGEO el cual contemplaba la microzonificación sísmica de Managua y el análisis de susceptibilidad a deslizamiento en áreas específicas del municipio de Managua. En la componente de micro-zonación sísmica se realizó una campaña de mediciones utilizando varias técnicas geofísicas en la zona urbana de la ciudad de Managua. Los métodos utilizados con el SPAC, MASW, y H/V.



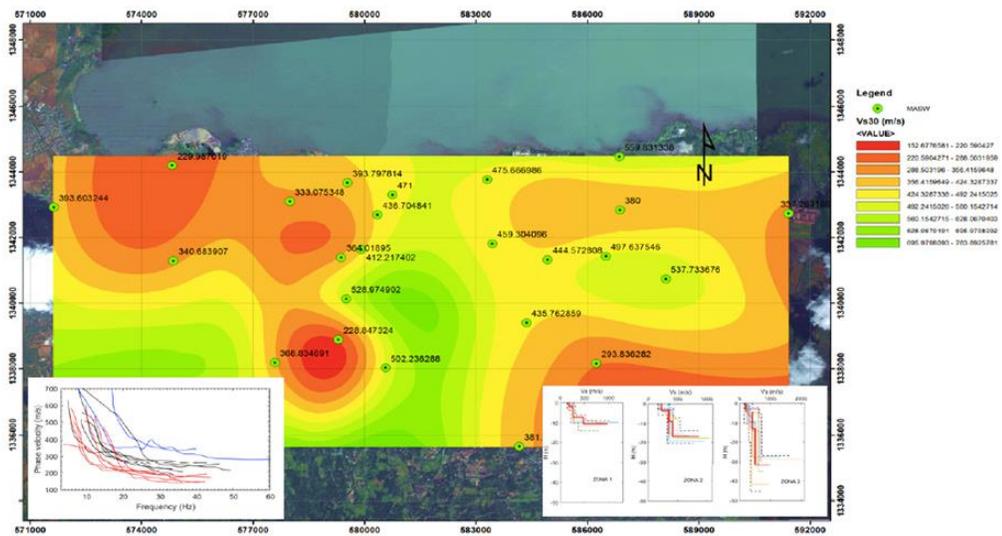
**Figura 6 - MAPA DE UBICACIÓN DE SITIOS ESTUDIADOS DENTRO DEL ÁREA DE MANAGUA (IGG/CIGEO, UNAN-Managua;Cooperación Internacional de Japón (JICA), 2015)**

### 1.3.5 Obando EA. 2017

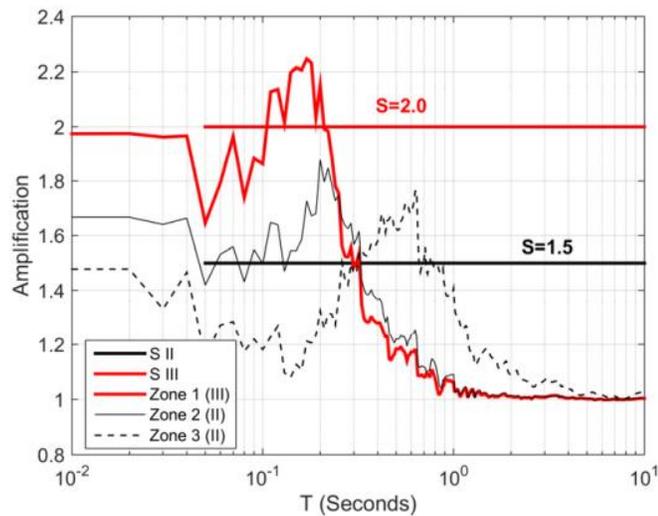
Más recientemente Obando EA. 2017 propuso una clasificación de suelos a partir del Vs30, utilizando 24 sitios con perfiles de MASW en toda zona urbana de la ciudad de Managua. En donde concluyó que los suelos del área de Managua pueden ser agrupados en tres zonas.

Parece que los depósitos de suelo más blando aparecen hacia la parte este y oeste de la ciudad, mientras que los depósitos de suelos más rígidos predominan en el área central donde se encuentran los depósitos de suelo muy superficial.

Las tres zonas muestran valores de amplificación más altos en comparación con los valores promedio propuesto en el código de construcción nicaragüense, lo que significa que los factores actuales parecen no capturar la amplificación del suelo del área urbana de la ciudad (Obando E. , 2017).



**Figura 7 - MAPA DE PROPUESTA UNA CLASIFICACIÓN DE SUELOS A PARTIR DEL VS30 (OBANDO, 2017)**



**Figura 8 - FUNCIONES DE AMPLIFICACIÓN PROMEDIO PARA LAS TRES ZONAS IDENTIFICADAS CON RESPECTO A LOS FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL CÓDIGO SÍSMICO DE NICARAGUA (OBANDO, 2017)**

## 1.4 Justificación

Nicaragua es un país altamente sísmico, por lo tanto, un requisito importante en las construcciones es el análisis sísmico de las estructuras en general, para ello es necesario conocer datos específicos sobre el comportamiento de sus suelos ante los sismos en dependencia de su zona al momento de construir. Este aspecto tiene un gran impacto en el costo el cual perjudica el presupuesto del nicaragüense o inversionistas extranjeros.

En el último siglo el país ha sufrido de constantes sismos de los cuales destacan el terremoto de Managua de marzo de 1931 que fue un sismo de 6.0 grados en la escala de Richter (INETER, 2002). Su epicentro fue localizado en la falla del estadio. Causo aproximadamente 1,200 a 1,500 muertes y más de 200 heridos, al igual que dejó muchas pérdidas económicas.

La ciudad en 1972 experimentó nuevamente un terremoto de mayor magnitud como fue en diciembre de 1972, con magnitud de 6.2 grados en la escala de Richter, dejando aproximadamente 5,000 muertos de los 400,000 habitantes de la ciudad, como 20,000 heridos, y 250,000 quedaron sin hogar. El área afectada fue de 27 kilómetros cuadrados, destruyéndose totalmente 13 kilómetros cuadrados del corazón de la ciudad.

Managua alberga la mayor cantidad total de personas como de estructuras verticales a nivel nacional por lo que es importante manejar información precisa del comportamiento de sus suelos ante la propagación de onda en la superficie al ocurrir un sismo y comportamiento de las estructuras ante estos fenómenos naturales, por lo tanto, es esencial conocer la relación de respuesta sísmica (RRS) para la obtención cuantificable de los factores de amplificación de los suelos de la ciudad de Managua.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo General

Proponer los coeficientes de sitio para los suelos de la ciudad de Managua, como base de referencia para la norma sismorresistente para la ciudad de Managua.

### 1.5.2 Objetivo específico

Crear un modelo matemático que mejor describa el comportamiento de amplificación dinámica de los suelos para la ciudad de Managua.

## 1.6 Alcances y limitaciones del estudio

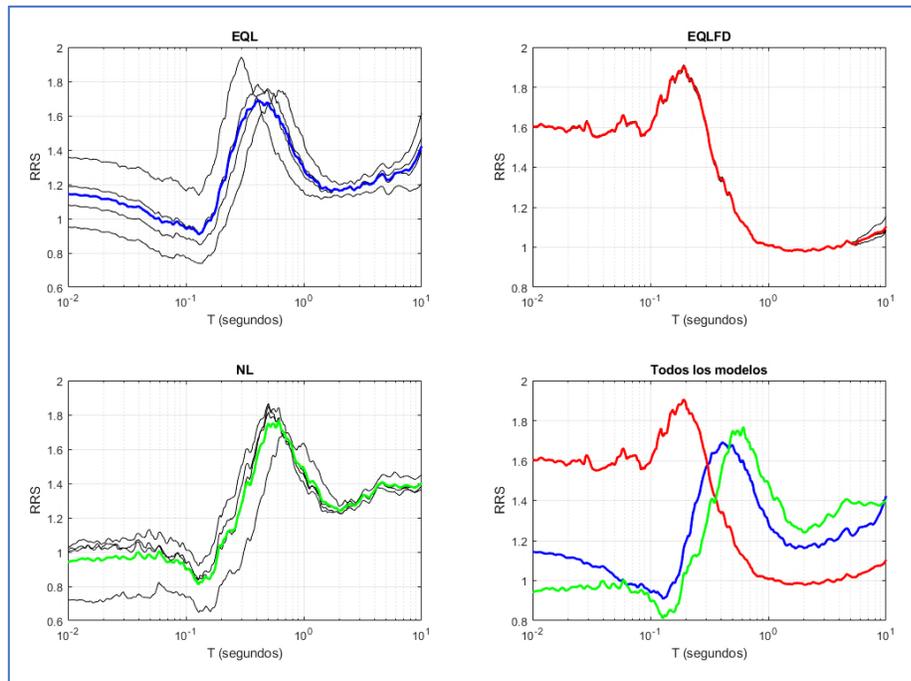
El alcance fundamental es la de determinar mediante análisis de respuesta sísmica de sitio 1D los efectos de amplificación de sitio a través de la relación de espectros de respuesta de superficie entre roca y proponer un modelo numérico que represente el comportamiento de la amplificación dinámica para todos los valores de velocidades de ondas de corte en los puntos estudiados.

Las limitaciones están basadas únicamente en la cantidad de ensayos geofísico, la variabilidad de los suelos encontrados en los estudios geofísicos debido a que solo se determinó para dos clasificaciones de suelo C y D y esto limitó la propuesta para otros tipos de suelos A, B y E.

## 2 CAPITULO II. Datos para el estudio (Estudios de sitio, datos de entradas).

El estudio parte de un trabajo previo que fue presentado por Lorio & Reyes 2019, el cual se determinaron las respuestas sísmicas de sitio para 20 puntos ubicados en la ciudad de Managua, en dicho trabajo se realizó utilizando el estudio de amenaza sísmica del RESIS II, el cual el valor de aceleración pico del terreno para un periodo de retorno de 500 años es de 0.5g según dicho estudio. Los registros sísmicos utilizados para el cálculo de la respuesta sísmica de sitio fueron determinados en función de dicho valor de PGA y espectro de amenaza uniforme UHS para ese periodo de retorno, se propusieron 4 modelos de curvas dinámicas y se utilizaron los 20 perfiles de velocidades de onda de corte hasta 30 metros de profundidad, dichos perfiles fueron obtenidos por otros autores. Los espectros así obtenidos fueron calculados utilizando 3 metodologías de cálculo, el método lineal equivalente, el método frecuencia dependientes y el método no lineal, todos unidimensional.

En la figura 9 se observa que el método EQL y NL tiene buena aproximación recíproca, y se concluye en dicho trabajo el uso de ambos métodos. El método no lineal generalmente se desplaza a la derecha, ya que captura mejor las deformaciones generadas por el sismo, sin embargo el método lineal equivalente resulta más práctico por la velocidad de cómputo y este genera muy buena aproximación respecto al método no lineal, este es un punto muy importante para el desarrollo de este trabajo ya que para los 14 sitios estudiados en este trabajo de investigación todos los cálculos de las razones espectrales RRS ratio response spectra por sus siglas en inglés fueron determinados por medio de espectros de respuesta en superficies convolucionados por el método lineal equivalente y el método no lineal.



**Figura 9 - COMPARACIÓN DE LOS TRES MÉTODOS UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DE RRS MANAGUA LORIO & REYES 2019**

En este trabajo se determina la respuesta sísmica de sitio utilizando el método lineal equivalente EQL y el método no lineal NL para 14 sitios ubicados en la ciudad de Managua para un espectro de amenaza uniforme UHS elaborado con el último estudio de amenaza sísmica para Nicaragua Álvarez 2019, utilizando 4 modelos de curvas dinámicas Seed & Idriss, 1970, EPRI 1993, Ishibashi & Zhang 1993, Darandeli 2001. Los perfiles de velocidades de ondas de corte a los 30m  $V_{S30}$  fueron levantados mediante métodos geofísicos MASW y MAM y combinados para generar un perfil con data más confiable. Los espectros en superficie así determinados se dividieron entre los espectros de respuesta de los registros sísmicos en roca y así obtener las gráficas RRS por cada punto estudiado, posteriormente se estableció la formulación de Sun, Kim, & Chung, 2005, y se procedió a realizar un análisis de regresión y ajustes de curvas para determinar el mejor modelo de ajuste y así proponer valores de coeficientes de amplificación por tipo de suelo para la norma sismorresistente para la ciudad de Managua.

### 3 CAPITULO III. Fundamentación Teórica del método.

#### 3.1 SIMULACIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS.

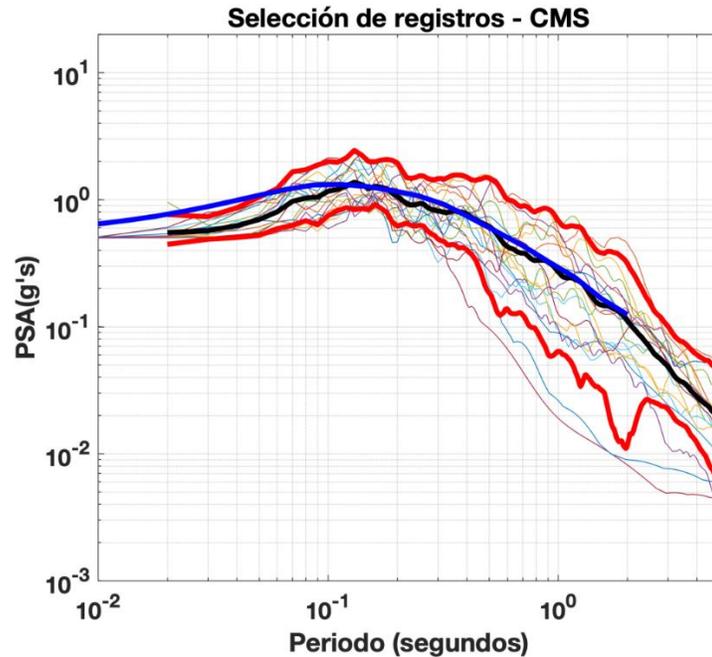
En muchas ocasiones, el parámetro de registros sísmicos no siempre es adecuado para describir la sacudida del suelo. Para el análisis de problemas no lineales como la respuesta inelástica o las deformaciones permanentes en un talud inestable, son requeridos registros sísmicos. Los registros o series de historia-tiempo también pueden ser requeridos en el desarrollo de registros sísmicos de diseño de un sitio específico, que incluyan el efecto de sitio a partir de un registro en roca. (Kramer, 1996).

Los métodos utilizados en este estudio se basan en la selección de registros existentes compatibles con un espectro de amenaza uniforme en roca usado como espectro objetivo, la simulación (escalado y ajuste espectral) de los registros seleccionados, así como el modelamiento de registros sintéticos en roca para complementar una base de datos de diferentes conjuntos de registros simulados.

#### 3.2 Método del Espectro Objetivo Condicional (CTS).

Partiendo de los escasos de eventos fuertes registrados en estaciones acelerográficas dentro de Managua, se utiliza el método del espectro objetivo condicional para seleccionar un conjunto de registros cuya forma de onda espectral promedio la forma de onda espectral de referencia seleccionada, que se asume como representación de las condiciones sísmicas del área de estudio (Baker & LEE, 2016). La formulación del método se presenta en la ecuación 1, que describe la suma de los errores al cuadrado SSEs que se obtiene a partir de los algoritmos naturales de las amplitudes espectrales  $\ln Sa(T_j)$  para cada periodo estructural  $T_j$  considerado

$$SSE_s = \sum_{j=1}^P \left[ (m_{\ln Sa}(T_j) - \mu_{\ln Sa}(T_j))^2 + w (s_{\ln Sa}(T_j) - \sigma_{\ln Sa}(T_j))^2 \right] \quad \text{Ec. -1}$$



*Figura 10 - ESPECTRO DE AMENAZA UNIFORME*

Donde  $m_{\ln Sa}(T_j)$  es la muestra promedio del algoritmo de las amplitudes espectrales de los registros seleccionados en el periodo  $T_j$  y  $\mu_{\ln Sa}(T_j)$  es el espectro objetivo promedio de un espectro de amenaza uniforme.  $s_{\ln Sa}(T_j)$  es la desviación estándar de la muestra y  $\sigma_{\ln Sa}(T_j)$  la desviación estándar del espectro objetivo en el periodo  $T_j$ .  $w$  es el peso asignado por el usuario para asignar la importancia respecto al ajuste en promedio versus los valores de desviación estándar. El algoritmo programado en Matlab fue ajustado para cargar como espectro objetivo el espectro de amenaza uniforme para la ciudad de Managua propuesto por RESIS II. Estos registros seleccionados son posteriormente escalados linealmente al PGA correspondiente al periodo de retorno de 500 años del espectro objetivo.

### 3.2.1 Ajuste Espectral no Estacionario usando Wavelets

Teniendo los registros seleccionados y escalados al PGA objetivo, se utiliza otro de los métodos más utilizados para registros simulados como es el ajuste espectral en dominio de tiempo para disponer un conjunto de registros bajo otro criterio. El enfoque de ajuste espectral en dominio de tiempo usando Wavelets utilizado es el propuesto por Atil & Abrahamson en 2010, que propone una función de ajuste en el algoritmo de ajuste espectral, que integra fácilmente cero a la velocidad y desplazamiento sin agregar la corrección de línea base, lo que proporciona una solución estable que asegura convergencia a la solución. (Atil & Abrahamson, 2010). La formulación del método del uso de wavelet se describe en la ecuación 2 y 3, que describe la diferencia de los valores espectrales  $\Delta R_i$  de la serie de tiempo a ajustar respecto a los valores espectrales objetivos, y la serie de tiempo de ajuste  $\delta a(t)$  de tal manera la respuesta del oscilador en el momento ( $t_i$ ) sea igual a  $\Delta R_i$  para todos  $i$ .

$$\Delta R_i = (Q_i - R_i)P_i \quad \text{Ec. -2}$$

Donde  $Q_i$  es el valor espectral objetivo,  $R_i$  es el valor espectral de la serie de tiempo y  $P_i$  es la polaridad de la respuesta de pico del oscilador.

$$\delta a(t) = \sum_{j=1}^N b_j f_j(t) \quad \text{Ec. -3}$$

Donde  $f_j(t)$  es un conjunto de funciones de ajuste,  $b_j$  es el conjunto de amplitudes de las funciones de ajuste (coeficientes a determinar), y  $N$  es el número total de puntos espectrales (pares de frecuencia y amortiguamiento) que deben coincidir. La mejora incorporada en el método garantiza la estabilidad de la velocidad y la eficiencia de la solución y la mejora se puede describir por:

$$f_i = \cos[\omega'_j(t - t_j + \Delta t_j)] \exp\left[-\left(\frac{t - t_j + \Delta t_j}{\gamma_j}\right)^2\right] \quad \text{Ec. - 4}$$

Donde  $\gamma_j$  es un coeficiente dependiente de la frecuencia utilizado para ajustar la duración de la función de ajuste.  $\gamma(f)$  fue desarrollado para garantizar una reducción gradual que incluiría varios ciclos en la función de ajuste y, por lo tanto, conduciría a una velocidad y desplazamiento cero en todas las frecuencias.  $\gamma(f)$  está dada por:

$$\gamma(f) = 1.178f^{-0.93} \quad \text{Ec. - 5}$$

La ventaja de utilizar la reducción gaussiana en la función de ajuste es que es suave y continua. Como resultado, la wavelet termina con velocidad y desplazamiento cero y no aparece ninguna desviación en las series de tiempo de velocidad y desplazamiento del registro sísmico ajustado. La función de respuesta de impulso de pseudo-aceleración utilizado para determinar la respuesta de aceleración de la serie temporal de ajuste  $\delta a(t)$  viene dada por:

$$h_i(t) = \frac{-\omega_i}{\sqrt{1 - \beta_j^2}} \exp(-\omega_i \beta_j t) \sin(\omega'_i t) \quad \text{Ec. - 6}$$

### 3.2.2 Método Estocástico

Teniendo en cuenta la proximidad de las fuentes de los terremotos más destructivos en Managua, se utiliza Método Estocástico, que es particularmente útil para simular registros sísmicos de alta frecuencia, donde la distribución espacial y temporal del deslizamiento de falla es lo suficientemente complicada como para justificar una descripción estocástica de la fuente, los que son de mayor interés para los ingenieros, y se usa ampliamente para predecir registros en regiones del mundo en las que no hay registros de fuertes terremotos. (Boore, 2005). La formulación del método descrita en la ecuación 7, se basa principalmente en la combinación de tres

factores, la función de la fuente  $E(M_0, f)$ , el medio de propagación ó ruta  $P(R, f)$  y el efecto sitio  $G(f)I(f)$ , por lo que conociendo estos tres factores se puede construir un acelerograma sintético usando un ruido blanco, basado en la teoría de vibración aleatoria. En este estudio se decidió no incluir el efecto de sitio por lo que el conjunto de registros sísmicos generados sea representativo al basamento rocoso de la ciudad de Managua y que al ser utilizados sean convolucionados por la correspondiente función de transferencia correspondiente al sitio de interés.

$$Y(M_0, R, f) = E(M_0, f)P(R, f)G(f)I(f) \quad \text{Ec. - 7}$$

Donde  $M_0$  es el momento sísmico,  $f$  es la frecuencia de esquina,  $R$  se toma generalmente como la distancia más cercana a la superficie de ruptura, en lugar de la distancia hipocentral,  $G(f)$  describe la amplificación y atenuación y por último el filtro  $I(f)$  describe el tipo particular de sismograma, aceleración, velocidad y desplazamientos.

### 3.2.3 Curvas dinámicas

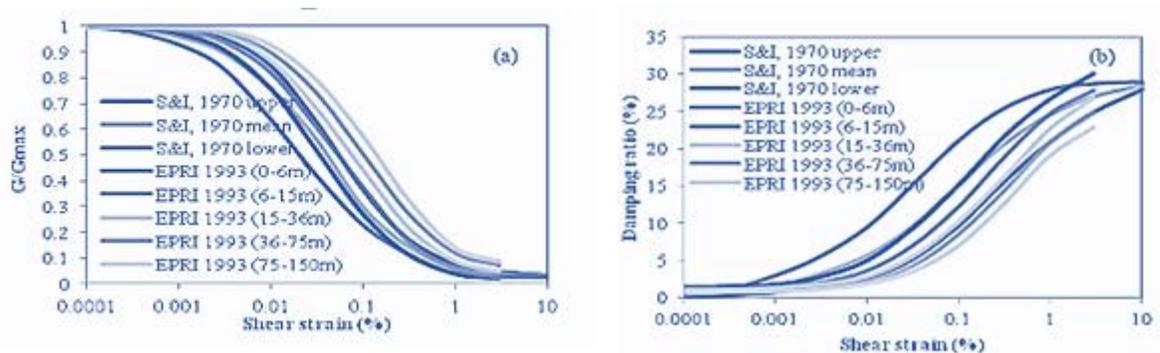
#### 3.2.3.1 Curvas de módulo de reducción y amortiguamiento

El estudio de respuesta se lleva a cabo utilizando el módulo de corte y las curvas dinámicas, identificar una curva según las características del sitio es complejo, por lo que a menudo son tomadas de literatura por lo que para capturar la deformación que pueda experimentar el suelo durante las aceleraciones inducidas a los suelos, es vital hacer una correcta caracterización de los tipos de suelos existentes en el sitio.

En general, los valores de módulo de corte de las arenas son fuertemente influenciado por la presión de confinamiento efectiva, la tensión amplitud y relación de vacíos, pero no significativamente por variación en las características del tamaño de grano.

Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) 1993 Presentó un conjunto de módulos genéricos dependientes de la profundidad. Curvas de reducción y amortiguamiento que reflejan los efectos de presión de confinamiento.

Seed e Idriss en 1970 realizaron un estudio donde plantearon curvas a partir de estudios realizados en años anteriores de gran importancia para suelos arenosos y gravosos de los cuales propusieron una serie de curvas. Estas propuestas proporcionan una base para arenas particulares para las que se disponen datos de prueba.



**Figura 11 - VARIACIÓN DEL MÓDULO DE CORTE (a) Y LA RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (b), CON ESFUERZO DE CIZALLA PARA ARENA (SEED E IDRIS, 1970 Y EPRI 1993)**

Mehmet Barís Darendeli en 2001 realizó una nueva familia de curvas de diseño de reducción de módulo normalizado y amortiguamiento de material utilizando un modelo de cuatro parámetros calibrado a una base de datos bastante grande de columna resonante y resultados de pruebas de corte torsional.

Una de las características únicas de este estudio es la consideración de la incertidumbre asociada con las curvas recomendadas. Este estudio también proporciona los medios para incorporar la incertidumbre en el comportamiento del suelo no lineal en el análisis de riesgo sísmico probabilístico.

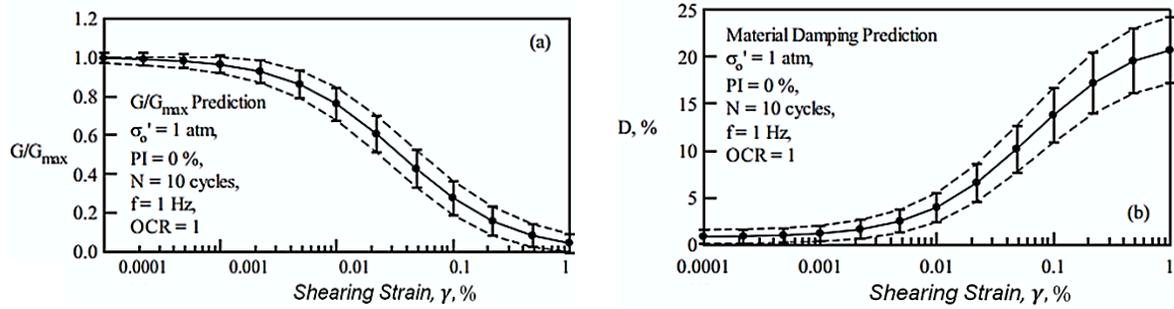


Figura 12 - VALORES MEDIOS Y DESVIACIONES ESTÁNDAR ASOCIADAS CON LAS ESTIMACIONES PUNTUALES DE (a) REDUCCIÓN DEL MÓDULO NORMALIZADO Y (b) CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO DEL MATERIAL (Darendeli, 2001)

Ishibashi y Zhang en 1993 recopilaron datos experimentales disponibles sobre módulos de cizallamiento dinámicos y relaciones de amortiguamiento de varios suelos. Los autores vuelven a analizar los datos experimentales disponibles y se intentan establecer fórmulas unificadas.

La propuesta de fórmulas unificadas expresa los módulos de cizallamiento dinámicos y las relaciones de amortiguamiento para cubrir una amplia variedad de suelos que van desde arenas hasta arcillas altamente plásticas.

Tabla 4 - FORMULAS UNIFICADAS (Ishibashi & Zhang, 1993)

$m(\gamma_s I_p) - m_o =$ $= 0.272 \left[ 1 - \tanh \left\{ \ln \left( \frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right\} \right] e^{-0.0145f}$	$n(I_p) =$ $\begin{cases} 0.0 & \text{for (sandy soils)} \\ 3.37 \times 10^{-6} I_p^{1.404} & \text{for (low plastic soil)} \\ 7.0 \times 10^{-7} I_p^{1.976} & \text{for (medium plastic soils)} \\ 2.7 \times 10^{-5} I_p^{1.115} & \text{for (high plastic soils)} \end{cases}$
$K(\gamma, I_p)$ $= 0.5 \left[ 1 + \tanh \left\{ \ln \left( \frac{0.000102 + n(I_p)}{\gamma} \right)^{0.492} \right\} \right]$	$D = D_{sand} \cdot A(I_p)$

$$\begin{aligned}
&= D_{sand} \cdot \frac{1 + e^{-0.0145f}}{2} \\
&= D_{sand} \\
&\cdot \frac{0.333(1 + e^{-0.0145f})}{2} \left\{ 0.586 \left( \frac{G}{G_{max}} \right)^2 \right. \\
&\left. - 1.547 \left( \frac{G}{G_{max}} \right) + 1 \right\}
\end{aligned}$$

Las curvas dinámicas disponibles para suelos de características arenosas que corresponden al área urbana de Managua. Para este análisis de selección las curvas de módulo de reducción y amortiguamiento para suelos granulares o no cohesivos de Seed & Idriss, (1970), y EPRI (1993), los que se contraponen con las curvas dinámicas propuestas por Faccioli et al (1973) y Ulloa en 2011. Se observa que la propuesta de Faccioli se asemeja al promedio de Seed & Idriss y al EPRI que corresponde a estratos someros (Obando E. , 2017).

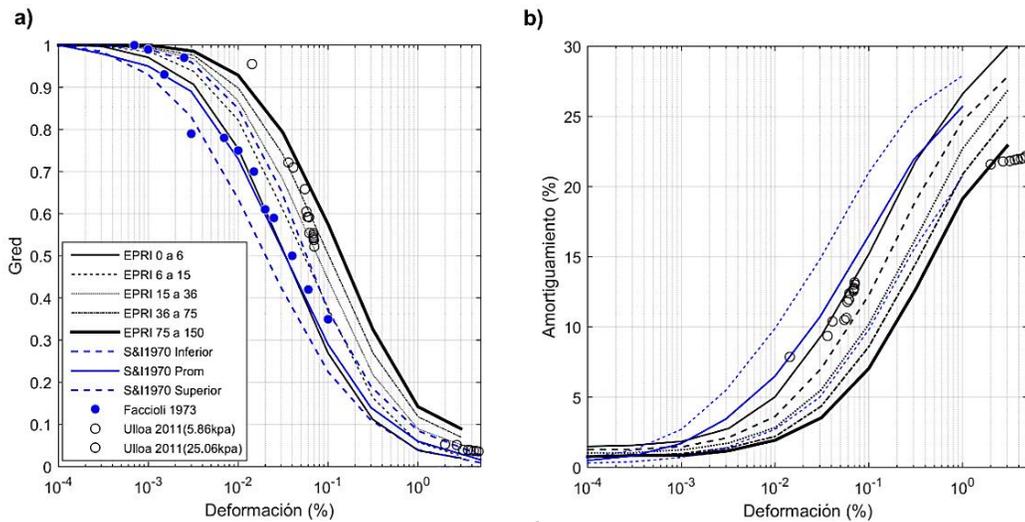


Figura 13 - CURVAS DINÁMICAS (Obando E. , 2017)

### 3.2.4 Métodos de análisis

#### 3.2.4.1 Método Lineal Equivalente Aproximado

Considerando que el suelo multi-estratos (*ilustración 18*) se comporta como un sólido Kelvin-Voigt (Kramer, 1996), la ecuación de onda se expresa como:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma} \quad \text{Ec. -8}$$

En este término  $\tau$  representa el esfuerzo por corte y depende de la deformación por cortante ( $\gamma$ ) y su tasa  $\dot{\gamma}$ . Por tanto, la ecuación 4 puede reescribirse como:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad \text{Ec. -9}$$

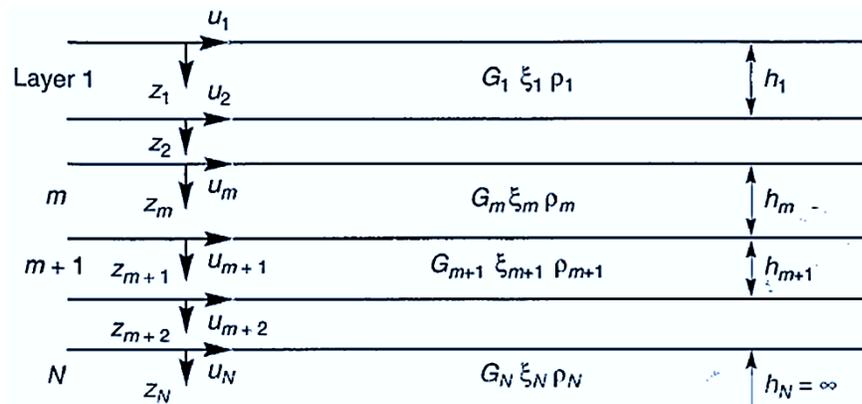


Figura 14 - SISTEMA MULTI-ESTRATO SOBRE ROCA ELÁSTICA (KRAMER, 1996)

Donde,  $G$  representa el módulo de corte del suelo y  $\eta$  la viscosidad.

La solución a la ecuación 5 se expresa como:

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + k^* z)} + Be^{i(\omega t - k^* z)} \quad \text{Ec. -9.1}$$

Donde,  $k^*$  representa el número complejo de onda y, A y B corresponden a las amplitudes de las ondas que viajan en la dirección  $-z$  y  $+z$ , respectivamente.

El esfuerzo cortante es entonces dado por el producto del módulo de corte complejo ( $G^*$ ) y la deformación por esfuerzo cortante.

El módulo de corte complejo está dado por:

$$G^* = G(1 + 2\xi) \quad \text{Ec. -10}$$

La velocidad de corte compleja para pequeñas deformaciones por esfuerzo cortante puede expresarse como:

$$V_s^* = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}(1 + 2\xi) \quad \text{Ec. -11}$$

Entonces, el número de onda complejo, para pequeñas deformaciones por esfuerzo cortante, es:

$$k^* = \frac{\omega}{v_s^*} = \frac{\omega}{v_s(1 + i\xi)} = \frac{\omega}{v_s}(1 - i\xi) = k(1 - i\xi) \quad \text{Ec. -12}$$

El esfuerzo cortante es entonces dado por el producto del módulo cortante complejo y la deformación por esfuerzo cortante, entonces:

$$\tau(z, t) = G^* \frac{\partial u}{\partial z} = (G + i\omega\eta) \frac{\partial u}{\partial z} = G(1 + 2i\xi) \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{Ec. -13}$$

Introduciendo el sistema de coordenadas ( $z$ ) para cada capa, el desplazamiento en la parte superior e inferior del estrato  $m$  será:

$$u_m(Z_m = 0, t) = (A_m + B_m)e^{i\omega t} \quad \text{Ec. -14}$$

$$u_m(Z_m = h_m, t) = (A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m})e^{i\omega t} \quad \text{Ec. -15}$$

Los desplazamientos en los límites de las capas deben ser iguales (es decir, el desplazamiento a la capa superior de una capa particular debe ser igual al desplazamiento en la parte inferior de la capa de superposición). Aplicando este requisito de compatibilidad con el límite entre la capa “ $m$ ” y la capa “ $m + 1$ ”, se tiene que:

$$u_m(Z_m = h_m, t) = u_{m+1}(Z_{m+1} = 0, t) \quad \text{Ec. -16}$$

Resulta que:

$$(A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m}) = (A_{m+1} + B_{m+1}) \quad \text{Ec. -17}$$

El esfuerzo cortante en la parte superior e inferior del estrato m son:

$$\tau_m(Z_m = 0, t) = ik_m^* G_m^* (A_m - B_m) e^{i\omega t} \quad \text{Ec. -18}$$

$$\tau_m(Z_m = h_m, t) = ik_m^* G_m^* (A_m e^{ik_m^* h_m} - B_m e^{-ik_m^* h_m}) e^{i\omega t} \quad \text{Ec. -19}$$

Considerando que los esfuerzos deben ser continuos en los límites de los estratos se tiene que:

$$\tau_m(Z_m = h_m, t) = \tau_{m+1}(Z_{m+1} = 0, t) \quad \text{Ec. -20}$$

Por tanto,

$$A_{m+1} - B_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (A_m e^{ik_m^* h_m} - B_m e^{-ik_m^* h_m}) \quad \text{Ec. -21}$$

Sumando las ecuaciones 17 y 21, y restando la ecuación 21 de 17 se tiene las siguientes ecuaciones recursivas:

$$A_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad \text{Ec. -22}$$

$$B_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad \text{Ec. -23}$$

Donde  $\alpha_m^*$  es la relación compleja de impedancia en la frontera entre los estratos  $m$  y  $m + 1$ :

$$\alpha_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} = \frac{\rho_m (v^*)_m}{\rho_{m+1} (v^*)_{m+1}} \quad \text{Ec. -24}$$

En la superficie del suelo el esfuerzo por corte debe ser igual a cero, lo que requiere que de la ecuación 15 que  $A_1 = B_1$ . Si las fórmulas recursivas de las ecuaciones 19 y 20 son aplicadas repetidamente en todos los estratos, las funciones relacionadas con la amplitud en el estrato  $m$  con respecto al primer estrato pueden expresarse como:

$$A_m = \alpha_m(\omega) A_1 \quad \text{Ec. -25}$$

$$B_m = b_m(\omega) B_1 \quad \text{Ec. -26}$$

La función teórica de transferencia en relación a la amplitud de desplazamiento desde el estrato  $i$  hasta  $j$  viene dada por:

$$F_{ij}(\omega) = \frac{|u_i|}{|u_j|} = \frac{a_i(\omega) + b_i(\omega)}{a_j(\omega) + b_j(\omega)} \quad \text{Ec. -27}$$

La función teórica de transferencia (ecuación 24) puede expresarse en correlación a basamento o un afloramiento rocoso. La ecuación 25 considera la componente de las ondas reflejadas y la ecuación 26 considera la componente incidente del afloramiento debido a la condición de superficie libre.

$$\text{Superficie} - \text{Basamento} = \frac{2A_1}{A_N + B_N} \quad \text{Ec. -28}$$

$$\text{Superficie} - \text{Afloramiento} = \frac{2A_1}{2A_N} \quad \text{Ec. -29}$$

Puesto que para un movimiento armónico  $|\ddot{u}| = \omega|\dot{u}| = \omega^2|u|$ , la ecuación 24 también describe la amplificación de las aceleraciones y velocidades desde el estrato  $i$  hasta el  $j$ . Las ecuaciones 24, 25 y 26 indican que el movimiento en cualquier estrato puede ser determinado a partir del movimiento en cualquier otra capa. Por tanto, si el movimiento en la superficie del perfil de suelo del sitio es conocido, se puede estimar el movimiento en cualquier otro punto.

Sabiendo que la función de transferencia real  $F_{ij}$  del perfil de suelo y la aceleración del movimiento del suelo  $a_r(t)$  sobre el basamento o sobre el afloramiento a cierta distancia, la aceleración de la superficie se puede calcular por:

- a. Calculando  $A_r(\omega_n)$  de la transformada rápida de Fourier FFT de  $a_r(t)$
- b. El cálculo de la función de transferencia  $F_{ij}$  con la ecuación 23 para todo  $\omega$  representado por  $A_r(\omega_n)$ .
- c. El cálculo de la transformada de Fourier del movimiento del suelo en la superficie  $a_s(t)$  a como se muestra:

$$A_s(\omega_n) = F_{ij}(\omega)A_r(\omega_n) \quad \text{Ec. -30}$$

- d. La utilización de la FFT inversa para obtener  $a_s(t)$ .

### 3.2.5 Cálculo de deformación

La deformación en el suelo es dependiente de la función de transferencia a como explica.

La función que permite describir la variación de la deformación con respecto al tiempo para cada estrato está dada por:

$$\gamma(z, t) = \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} \quad \text{Ec. -31}$$

Sustituyendo la ecuación 5 en ecuación 27 y derivando, resulta:

$$\gamma_j(z_j, t) = A_j i k_j^* e^{i(\omega t + k^* z)} + B_j i k_j^* e^{i(\omega t - k^* z)} \quad \text{Ec. -32}$$

Utilizando las ecuaciones 25, 26, 32 y 9.1, considerando el efecto de superficie libre, la deformación en el estrato  $j$  puede reescribirse como:

$$\gamma_j(z_j, t) = A_j i k_j^* e^{i(\omega t + k^* z)} + B_j i k_j^* e^{i(\omega t - k^* z)} \quad \text{Ec. -33}$$

La ecuación 30 puede ser modificada para calcular la deformación inducida por una onda que consiste de múltiples armónicos de la siguiente manera.

$$\gamma_j(z_j, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \gamma_j^{(n)}(z_j, t) \quad \text{Ec. -34}$$

Donde,

$$\gamma_j^{(n)}(z_j, t) = S_j(\omega_n) u_1^{(n)}(z_1 = 0, t) \quad \text{Ec. -35}$$

La función de transferencia de la deformación  $S_j(\omega_n)$  relaciona la deformación en el estrato  $j$  con la aceleración en la superficie y está dada por:

$$S_j(\omega_n) = \frac{1}{2} \left( a_j(\omega) e^{i k_j^* z_j} - b_j(\omega) e^{-i k_j^* z_j} \right) i k_j^* \quad \text{Ec. -36}$$

La función de variación de la deformación en el tiempo para cada estrato puede ser estimando:

- a. Calculando  $S_j(\omega_n)$  a una profundidad predefinida en cada capa para todo  $\omega_n$  representado como  $A_r(\omega_n)$ . En muchos estudios la mejor opción para seleccionar una profundidad es considerarlo igual Al centro de cada estrato.
- b. Calculado la FFT de la deformación  $\gamma'$  a como se muestra:

$$\gamma'(\omega_n) = -\frac{1}{\omega^2} S(\omega_n) A_s(\omega_n)$$

**Ec. -37**

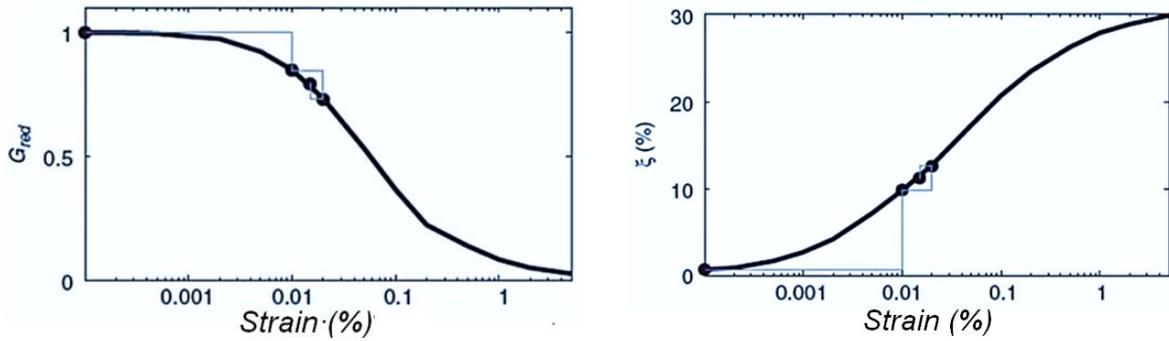
- c. Utilizando la FFT inversa para obtener el registro de deformación en el tiempo  $\gamma(t)$

### 3.2.6 Aproximación Lineal Equivalente

La evaluación numérica de respuesta sísmica de sitio está sustentada en la teoría de propagación de ondas en una dimensión originalmente formulada por Haskell & Thompson 1959. Esta teoría sin embargo se limita a la idea de que los estratos son de espesor uniforme en la dirección horizontal, por tanto, no considera el efecto de variación lateral del suelo (heterogeneidad). Para considerar este efecto se requiere del uso de algoritmos más avanzados tales como los métodos de elemento finito o diferencia finita.

De la teoría de propagación de ondas y basados en la práctica, se conoce que el módulo de rigidez ( $G$ ) y amortiguamiento ( $\xi$ ) tienen una dependencia funcional con la deformación ( $\gamma$ ). El material de suelo es aproximado asumiendo un material tipo Kelvin-Voigt ampliamente usado por muchos autores. Sin embargo, esto requiere la obtención de información geotécnica que en estudios a escala no son una solución viable. Por consiguiente, se debe adoptar un enfoque iterativo que permita la obtención de un valor probable para  $G$  y  $\xi$  a través del manejo de ecuaciones diferenciales lineales. Esta es la base del método lineal equivalente que se explicará a continuación.

El análisis lineal equivalente para respuesta de sitio se base en las relaciones existentes entre  $G$ ,  $\xi$  y  $\gamma$  (ilustración 19). Esta relación es cuantificada en términos del módulo de rigidez  $G_{red}$  y el factor de amortiguamiento  $\xi$  (%) a través de curvas que permiten relacionar ambos con el porcentaje de deformación en el suelo.



**Figura 15 - CURVAS DE MÓDULO DE RIGIDEZ Y FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO PARA MATERIALES VISCO-ELÁSTICOS**

El módulo de rigidez ( $G_{red}$ ) está dado por:

$$G_{red} = \frac{G_{sec}}{G_{max}} \quad \text{Ec. -38}$$

Dónde:

$$G_{max} = \rho(V_s^2) \quad \text{Ec. -39}$$

Y

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad \text{Ec. -40}$$

Donde  $\tau_c$  y  $\gamma_c$  representan la amplitud por el esfuerzo cortante y la deformación por corte, respectivamente. Las curvas del módulo de rigidez y amortiguamiento deben ser seleccionadas para cada una de las capas de los estratos que conforman el modelo del suelo. Estas curvas permiten cuantificar como cada estrato está actuando cuando están expuestos a la energía de propagación de terremoto. Un análisis lineal equivalente de sitio se desarrolla bajo los siguientes pasos:

- a. Asignar valores iniciales para el  $G_{red}$  y  $\xi$  para cada estrato por una lectura del primer valor en sus respectivas curvas. Este primer valor corresponde al esfuerzo más pequeño probable con el que la curva es definida.

- b. Utilizar el valor de  $G_{red}$  y  $\xi$  asignado previamente para calcular el esfuerzo en función del tiempo a como se describió previamente.
- c. Calcular el esfuerzo máximo en cada estrato  $\gamma_j^{(max)}$  y el esfuerzo efectivo por corte en cada estrato utilizando:

$$\gamma_j^{(eff)} = R_\gamma \gamma_j^{(max)} \quad \text{Ec. -41}$$

Donde,  $R_\gamma$  representa la tasa de variación del esfuerzo de tensión. El esfuerzo de tensión efectivo representa una medida más realista de la tensión inducida por un periodo de tiempo como esfuerzo máximo, ya que el máximo se alcanza solamente para intervalos cortos de tiempo. Por lo general, se elige un valor de 0.65 para la tasa de variación del esfuerzo de tensión. Sin embargo, para mayor precisión,  $R_\gamma$  puede calcularse a partir de la magnitud del sismo utilizando la ecuación 39:

$$R_\gamma = \frac{M - 1}{10} \quad \text{Ec. -41}$$

- d. Calcular  $\log_{10}(\gamma_j^{(eff)})$  y utilizarlo para determinar nuevos valores de  $G_{red}$  y  $\xi$  por interpolación lineal en las curvas de módulo de rigidez y amortiguamiento.
- e. Comparar las diferencias porcentuales usando las ecuaciones 40 y 41 para una tolerancia predefinida.

$$\frac{100 |G_{red}^{(i)} - G_{red}^{(i+1)}|}{G_{red}^{(i+1)}}; \frac{100 |G_{red}^{(i)} - G_{red}^{(i+1)}|}{G_{red}^{(i)}} \quad \text{Ec. -42}$$

$$\frac{100 |\xi_{red}^{(i)} - \xi_{red}^{(i+1)}|}{\xi_{red}^{(i+1)}}; \frac{100 |\xi_{red}^{(i)} - \xi_{red}^{(i+1)}|}{\xi_{red}^{(i)}} \quad \text{Ec. -43}$$

Donde  $i$  y  $i + 1$  se refieren a la iteración previa y la actual, respectivamente. Si ninguna de las diferencias porcentuales es mayor que la tolerancia,  $G_{red}$  y  $\xi$  son reasignados al valor  $i + 1$  y se repite el proceso de la etapa b usando los nuevos valores de  $G_{red}$  y  $\xi$ . Por el contrario, si todos los porcentajes son más pequeños que la tolerancia, los parámetros actuales son aceptados. Una tolerancia del 5% es generalmente aceptada y por lo general conducen a la convergencia en 3 a 4 iteraciones.

### 3.2.7 Método no lineal en dominio de tiempo (NL)

El análisis no-lineal parte de la solución de la siguiente ecuación diferencial de segundo orden no-homogénea:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g \quad \text{Ec. -44}$$

Donde  $[M]$  es la matriz de masa;  $[C]$  es la matriz de amortiguamiento viscoso y  $[K]$  la matriz de rigidez;  $\{\ddot{u}\}$  es el vector nodal de aceleración relativa y  $\{\dot{u}\}$  el vector nodal de velocidad relativa y  $\{u\}$  es el vector nodal de desplazamiento relativo.  $\ddot{u}_g$  es la aceleración en la base de la columna de suelo e  $\{I\}$  es un vector unitario. Las matrices  $[M]$ ,  $[C]$ , y  $[K]$  son ensambladas usando las propiedades incrementales del suelo. Las propiedades son obtenidas de modelos constitutivos que describen el comportamiento cíclico del suelo. La ecuación diferencial se resuelve de forma numérica para cada salto de tiempo usando el método beta de Newmark. La columna de suelo se discretiza en estratos individuales a partir de un sistema de múltiples grados de libertad.

EL método no lineal en dominio de tiempo se sustenta en un modelo hiperbólico es usado para representar la respuesta esqueleto y reglas de Masing de carga y recarga para así modelar el comportamiento histórico. Las cuatro reglas Masing extendidas son comúnmente las siguientes:

- a) Para la carga inicial, la curva de esfuerzo y deformación sigue la curva esquelética

$$\tau = F_{bb}(\gamma) \quad \text{Ec. -45}$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo cortante, y  $F_{bb}(\gamma)$  es la función de la curva esquelética.

Si ocurre inversión de esfuerzo en el punto  $(\gamma_{rev}, \tau_{rev})$ , la curva esfuerzo deformación sigue la siguiente ruta por medio de:

$$\frac{\tau - \tau_{rev}}{2} = F_{bb}\left(\frac{\gamma - \gamma_{rev}}{2}\right) \quad \text{Ec. -46}$$

- b) Si la curva de carga-recarga intercepta la curva esquelética, esta sigue la curva esquelética hasta la próxima reversión de esfuerzo.
- c) Si una curva carga-recarga cruza una curva carga-descarga de un ciclo anterior, la curva esfuerzo deformación sigue la ruta del ciclo anterior.

### 3.2.8 Amortiguamiento Histérico

El modelo hiperbólico se define usando la ecuación (12) que define la relación esfuerzo deformación para la carga, y la ecuación (13) define la relación esfuerzo-deformación para las condiciones de carga-recarga.

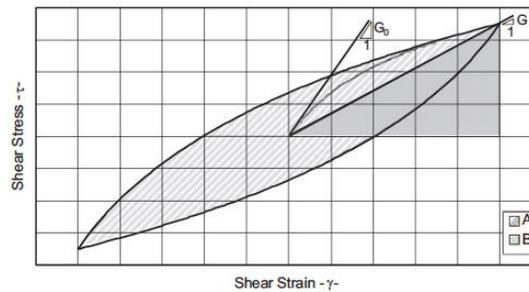
$$\tau = \frac{\gamma G_0}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^s} \quad \text{Ec. -47}$$

$$\tau = \frac{2G_0((\gamma - \gamma_{rev})/2)}{1 + \beta((\gamma - \gamma_{rev})/2 \gamma_r)^s} + \tau_{rev} \quad \text{Ec. -48}$$

Donde  $\gamma$  es la deformación cortante dada,  $\gamma_{ref}$  es la deformación cortante de referencia,  $\beta$  es un factor adimensional,  $G_0$  es el esfuerzo cortante máximo y  $s$  es el termino exponencial adimensional. Para representar la dependencia del módulo de la presión de confinamiento se propone la siguiente expresión para  $\gamma_r$ :

$$\gamma_r = a(\sigma'/\sigma_{ref})^c \quad \text{Ec. -49}$$

Donde  $a$  y  $c$  sonde escalares que dependen del tipo de suelo deben ser determinados basados en resultado de laboratorios,  $\sigma'$  es el esfuerzo vertical efectivo y  $\sigma_{ref}$  es el esfuerzo vertical de referencia. El amortiguamiento histerético es proporcional a la perdida de energía en cada ciclo de vibración y por lo tanto es proporcional al área bajo el ciclo histerético generado desde la ecuación 49.



**Figura 16 - COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO CORTANTE EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN**

### 3.2.9 Modelo híbrido hiperbólico

La formulación del método Híbrido Hiperbólico (HH) propuesto por Li & Assimaki es motivado por la evaluación de la respuesta no-lineal en un amplio rango de frecuencias. La formulación propuesta se constituye por la combinación de la formulación existente para pequeñas deformaciones de Masatovic & Vucetic, 1993.

$$\tau_{MKZ}(\gamma) = \frac{G_{max}\gamma}{1 + \beta(\gamma/\gamma_{ref})^S} \quad \text{Ec. -50}$$

Donde  $\tau_{MKZ}(\gamma)$  el esfuerzo para pequeñas deformaciones,  $G_{max}$  es el modulo de rigidez máximo,  $\beta$  y  $S$  son el primer y segundo parámetro de forma, y  $\gamma_{ref}$  es la deformación de referencia relativa al tipo de suelo. Las máximas deformaciones fueron validadas en pruebas de columnas resonantes hasta un valor máximo de 0.5 %. Esta formulación está orientada para el rango de pequeñas a medianas deformaciones.

$$\tau_{HH}(\gamma) = w(\gamma)\tau_{MKZ}(\gamma) + [1 - w(\gamma)]\tau_{FKZ}(\gamma) \quad \text{Ec. -51}$$

$$\tau_{FKZ}(\gamma) = \frac{\gamma^d \mu}{\frac{1}{G_{max}} + \frac{\gamma^d \mu}{\tau_f}} \quad \text{Ec. -52}$$

$$w(\gamma) = 1 - 1/[1 + 10^{-a(\log_{10}(\gamma/\gamma_r) - 4.039a^{-1.036})}] \quad \text{Ec. -53}$$

*Tabla 5 - Parámetros para el cálculo de modelo híbrido hiperbólico*

<b>SÍMBOLO</b>	<b>SIGNIFICADO</b>
$G_{max}$	Rigidez Inicial
$\gamma_{ref}$	Deformación de referencia, relacionada a las propiedades del suelo
$\beta$	Primer parámetro de forma de MKZ
$S$	Segundo parámetro de forma de MKZ
$\gamma_t$	Deformación de transición de MKZ a FKZ
$a$	Razón de transición desde 1 a 0
$\tau_f$	Esfuerzo cortante
$\mu$	De FKZ, representando la acumulación de esfuerzo
$d$	Parámetro de forma de FKZ

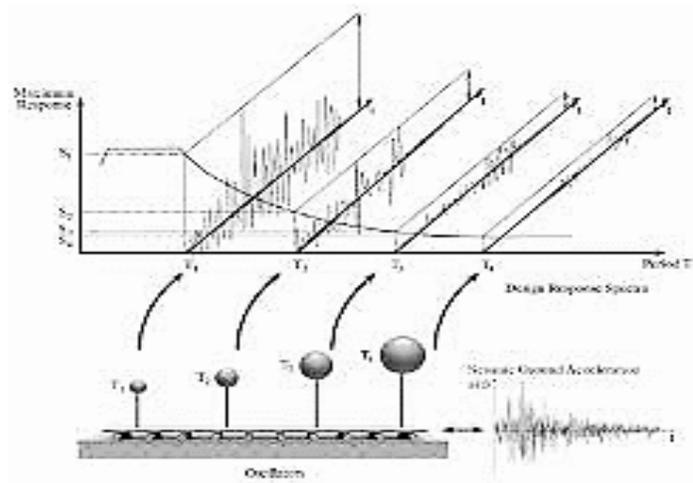
### 3.2.10 Ratio Response Spectrum – Relación de Espectros de Respuesta (RRS)

Los espectros de respuesta fueron inicialmente propuestos por Biot en el año 1932 y luego desarrollados por Housner, Newmark y muchos otros investigadores. Actualmente, el concepto de espectro de respuesta es una importante herramienta de la dinámica estructural, de gran utilidad en el área del diseño sismo resistente.

En forma general, podemos definir espectro como un gráfico de la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés) que produce una acción dinámica determinada en una estructura u oscilador de un grado de libertad. En estos gráficos, se representa en abscisas el periodo propio de la estructura (o la frecuencia) y en ordenadas la respuesta máxima calculada para distintos factores de amortiguamiento. (Crisafulli & Villafañe, 2002)

La importancia de los espectros en el diseño de estructuras radica en el hecho de que estos gráficos condensan la compleja respuesta dinámica en un parámetro clave los valores de respuesta máxima, que son usualmente los requeridos por el diseñador para el cálculo de estructuras.

Debemos aclarar, sin embargo, que los espectros de respuesta omiten información importante dado que los efectos del terremoto sobre la estructura dependen no solo de la respuesta máxima sino también de la duración del movimiento y del número de ciclos con demanda significativa de desplazamientos.



*Figura 17 - GRÁFICO INDICATIVO DEL MÉTODO DE DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA*

### 3.2.11 Tipos de espectros

El concepto de espectro ha ganado una amplia aceptación como herramienta de la dinámica estructural. Es por ello que se han desarrollado varios tipos de espectros, los cuales presentan características diferentes y se utilizan con distintos objetivos

**Espectros de respuesta elástica:** representan parámetros de respuesta máxima para un terremoto determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento. Se utilizan fundamentalmente para estudiar

las características del terremoto y su efecto sobre las estructuras. Las curvas de los espectros de respuesta presentan variaciones bruscas, con numerosos picos y valles, que resultan de la complejidad del registro de aceleraciones del terremoto

**Espectros de respuesta inelástica:** son similares a los anteriores, pero en este caso se supone que el oscilador de un grado de libertad exhibe comportamiento no-lineal, es decir que la estructura puede experimentar deformaciones en rango plástico por acción del terremoto. Este tipo de espectros son muy importantes en el diseño sísmo resistente, dado que por razones prácticas y económicas la mayoría de las construcciones se diseñan bajo la hipótesis que incursionarán en campo plástico.

**Espectros de diseño:** las construcciones no pueden diseñarse para resistir un terremoto en particular en una zona dada, puesto que el próximo terremoto probablemente presentará características diferentes. Por lo tanto, los espectros de respuesta elástica o inelástica, descriptos previamente, no pueden utilizarse para el diseño sísmo resistente.

Por esta razón, el diseño o verificación de las construcciones sísmo resistentes se realiza a partir de espectros que son suavizados (no tienen variaciones bruscas) y que consideran el efecto de varios terremotos, es decir que representan una envolvente de los espectros de respuesta de los terremotos típicos de una zona.

Los factores de amplificación se determinan a partir de la razón de espectros de respuestas de superficie respecto a roca (RRS) para un rango de periodos de interés (Sun, Kim, & Chung, 2005). La formulación de RRS se plantea utilizando la propuesta presentada en las ecuaciones (20) y (21).

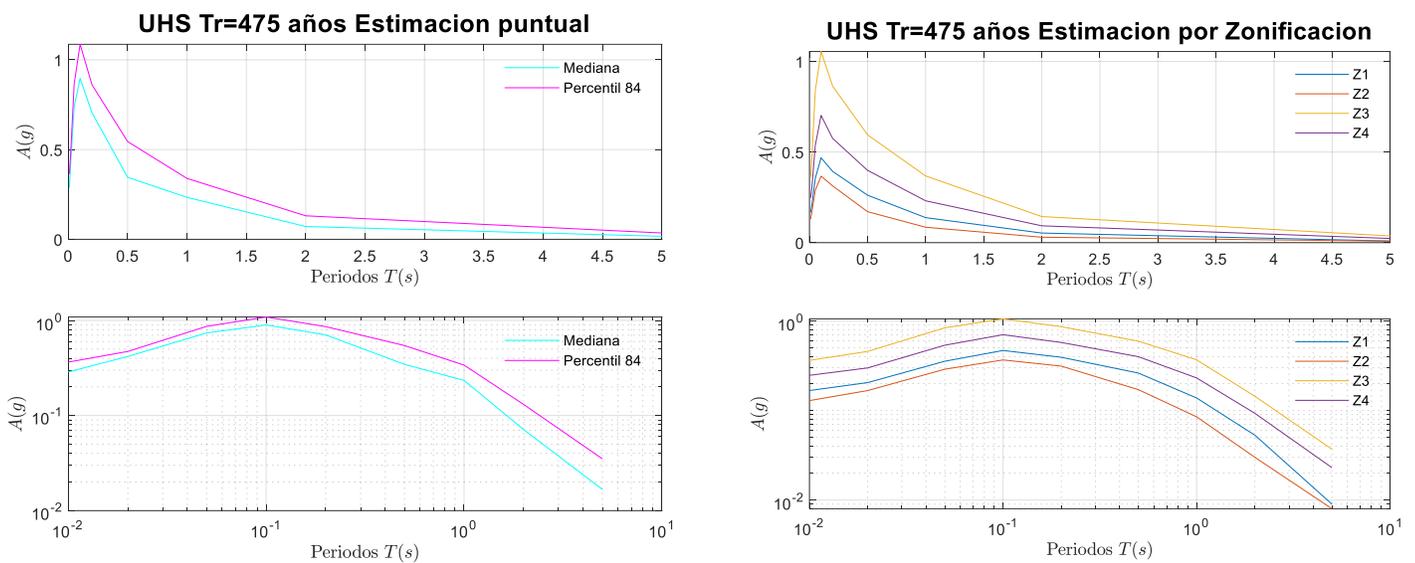
$$F_a(RRS) = \frac{R_{suelo}}{R_{roca}} \frac{1}{0.4} \int_{0.1}^{0.5} \frac{RS_{suelo}(T)}{RS_{roca}(T)} dT \quad \text{Ec. -54}$$

$$F_v(RRS) = \frac{R_{suelo}}{R_{roca}} \frac{1}{1.6} \int_{0.4}^{2.0} \frac{RS_{suelo}(T)}{RS_{roca}(T)} dT \quad \text{Ec. -55}$$

Los coeficientes de amplificación  $F_a$  y  $F_v$  corresponden para periodos cortos (0.1 a 0.5 segundos) y para periodos largos (0.4 a 2.0 segundos) respectivamente.  $RS_{suelo}$  y  $RS_{roca}$  presentan los espectros elásticos promedios en los rangos de periodos T indicados. La razón  $RS_{suelo}/RS_{roca}$  representa la relación de distancias entre suelo y roca la cual se asume igual a 1.0.

## 4 CAPITULO IV. Procesamiento y Análisis de Datos.

Los espectros de amenaza uniforme resultantes del estudio de amenaza sísmica realizado por Álvarez 2019, indica que para el área de Managua la forma espectral es de la zona 3 según su informe este fue calculado para la mediana y para percentil 84 como se muestra en la figura 18 y los espectros para las 4 zonas del país en la



**Figura 18** – ESPECTRO DE AMENAZA UNIFORME, ESTIMACIÓN PUNTUAL (IZQ) Y ESTIMACIÓN POR ZONIFICACIÓN (DER)

En este caso los registros sísmicos utilizados para este estudio son conforme al UHS de la zona 3.

se determinaron 10 registros que cumplieran con las condiciones de suelo rígido y dentro del rango de magnitud de 6.0 a 7.5 establecido como magnitudes que puedan ocurrir con mayor probabilidad para el pacífico de Nicaragua.

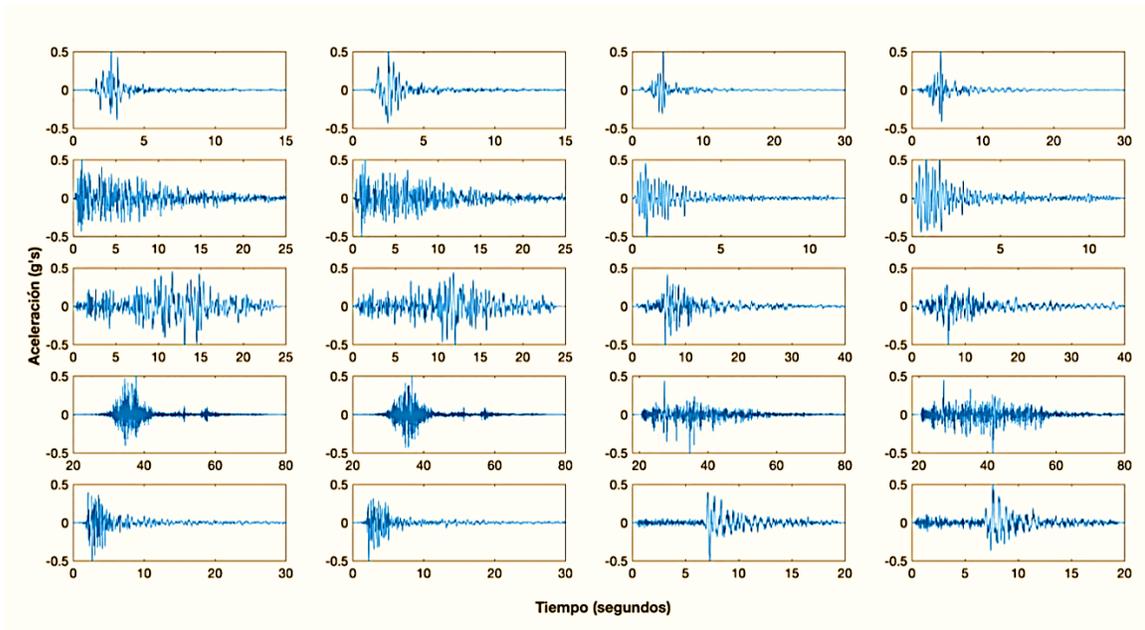


Figura 19 - REGISTRO SISMICO SELECCIONADOS

Se logró observar que, en gran medida, los registros escalados reproducen tanto la amplitud como la forma del espectro objetivo.

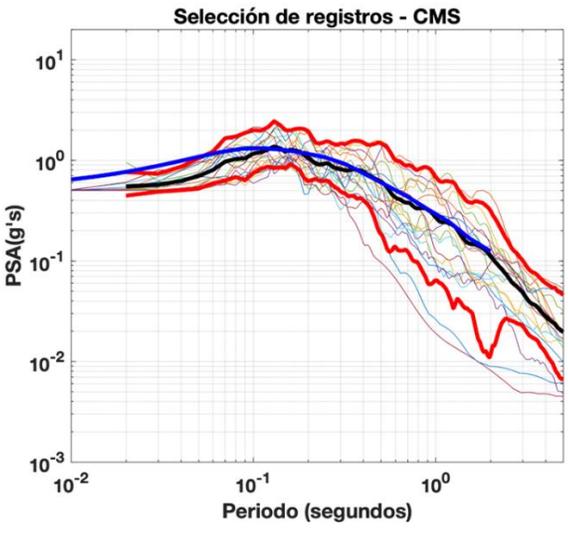


Figura 20 -

#### 4.1.1 Curvas dinámicas que se ajustaron a las condiciones de los suelos de la ciudad de Managua.

Para esta sección se presentará un ejemplo de las curvas dinámicas seleccionadas para utilizar en esta investigación.

a. Seed & Idriss, 1970.

Para el sitio CM10\_5 se presenta el perfil y la curva dinámica esta curva depende de la profundidad de los espesores donde se ocuparon las curvas upper y mean

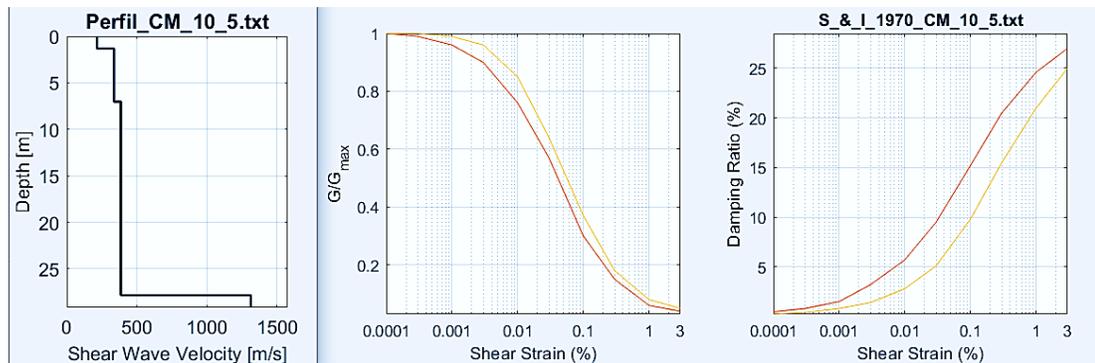


Figura 21 - CURVA DE SEED & IDRIS, 1970 CURVA DE SEED & IDRIS, 1970

b. EPRI 1993.

Para el sitio CM10\_5 se presenta el perfil y la curva dinámica de EPRI 1993 esta curva depende de la profundidad de los espesores de cada extractó

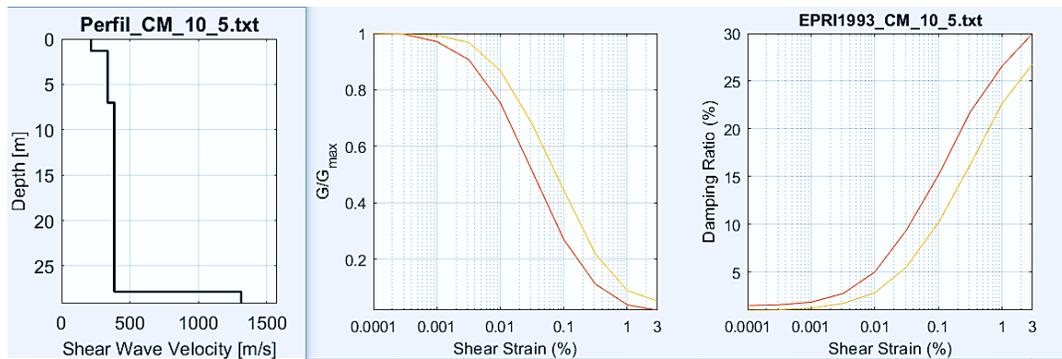


Figura 22 - CURVA DE EPRI, 1993

c. Ishibashi & Zhang 1993 (IP=0)

Para el sitio CM10\_5 se presenta el perfil y la curva dinámica esta curva depende de la profundidad de los espesores en donde se realizaron a través de un Script de Matlab (propiedad del proyecto de la normativa sismo resistente de la ciudad de Managua llevado a cabo por MTI)

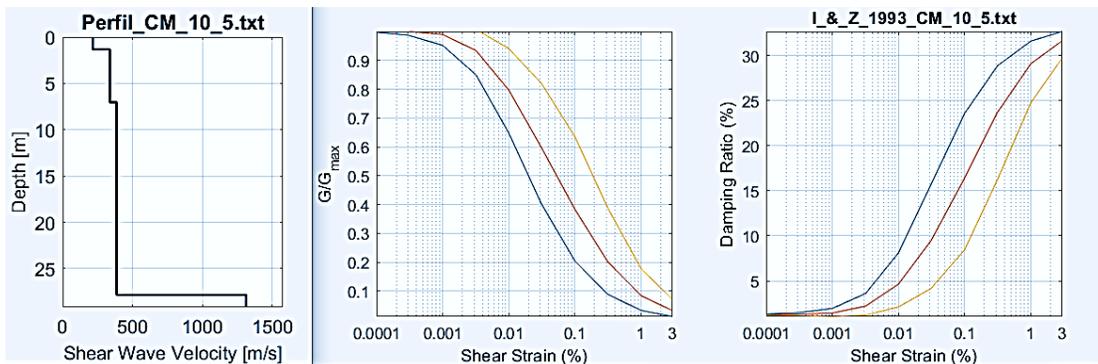


Figura 23 - CURVA DE ISHIBASHI & ZHANG, 1993

d. Darendeli 2001 (IP=0).

Para el sitio CM10\_5 se presenta el perfil y la curva dinámica de Darendeli 2001 esta curva se realizó con ayuda del software SeismoSoil ya que en los parámetros del método no lineal híbrido hiperbólico utiliza el cálculo de Darendeli.

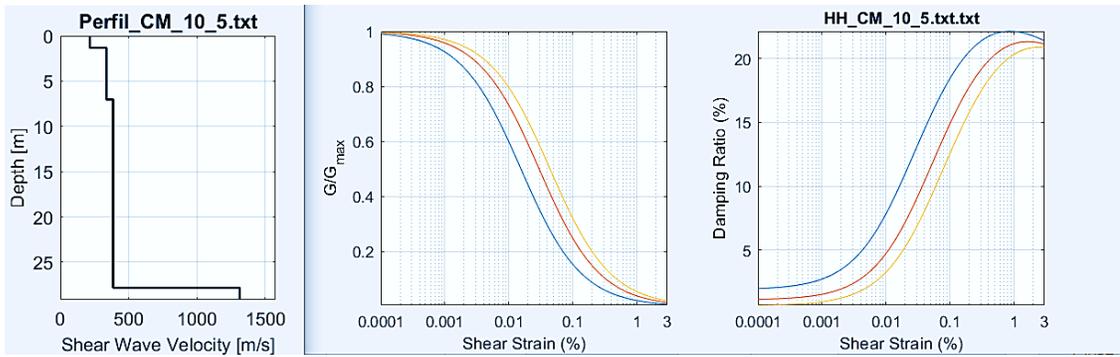
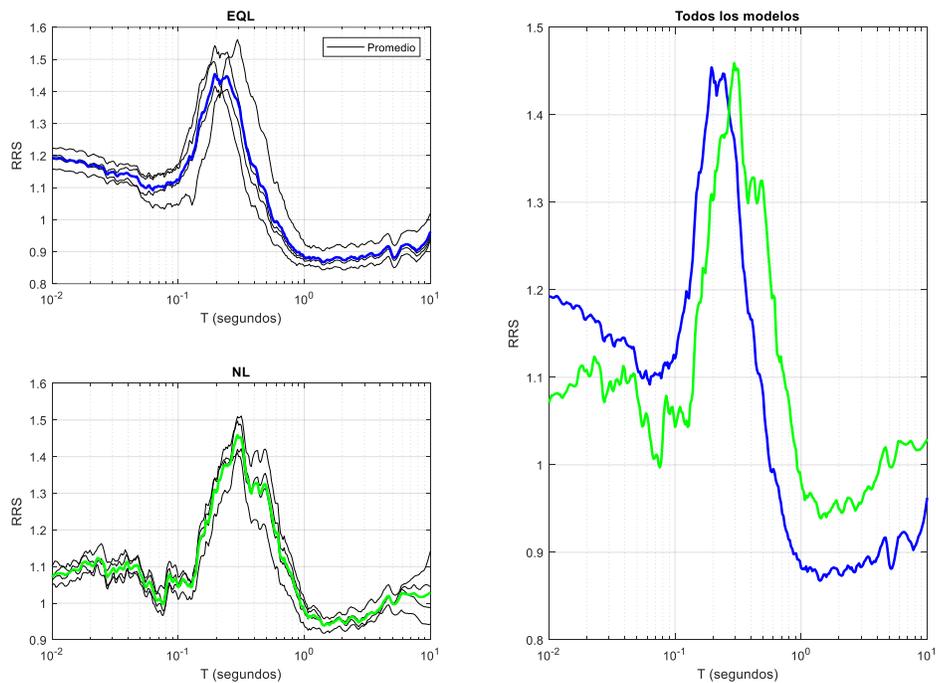


Figura 24 - CURVA DE DARENDELI, 2001

#### 4.1.2 Razón de espectros de respuesta RRS.

En este caso se realiza para todos los puntos investigados el método lineal equivalente y para ciertos puntos se calculó el No lineal solo por verificación, y como se había mencionado anteriormente ocurre el mismo efecto.



*Figura 25 - RRS PARA P10*

A continuación, se presenta el código en MATLAB generado para el cálculo de los factores de amplificación de suelo y su correspondiente análisis de regresión numérica para el ajuste de la curva de los datos RRS generados.

```

clear all;
close all;
clc;

cd 'C:\ALLMODELS'

filename={'CMVIL';'CR';'DIINSA';'PCMO';'PLP';'UNAN_MANAGUA';'UNI_IES';'CM
_10_5';'AVIL';'HZG';'PARMALAT';'CCN';'UNI_RUPAP';'LSUR';'ESSO';'JPG';'ESD
';'LCL';'EF';'UNAN_RUCFA';'UNA';...
'MORIENTAL';'KATIVO';'P1';'P2';'P3';'P4';'P5';'P6';'P7';'P8';'P9';
'P10';'P11';'P12';'p13';p14'};

vs30 = [497 412 393.6 529 340.6 229 364 381.3 444.57 435.76 475.6 560 459.3
537.7 230 502 393.8 293 333 436.7 337.3 471.3 379.68 441.52 416 414.33 325
338 412 386 395 297 336 327 435 318];

for j=1:length(filename)
    site_name=filename{j};

    load (site_name)

    T = DATABASE(1).EQL.T;

        for i=1:4

            rrs_eql(:,i) = DATABASE(i).EQL.RRS_mean;
%            rrs_eqlfd(:,i) = DATABASE(i).EQLFD.RRS_mean;
            rrs_nl(:,i) = DATABASE(i).NL.RRS_mean;

        end

    rrs_eql_mean=mean(rrs_eql,2);
% rrs_eqlfd_mean=mean(rrs_eqlfd,2);
    rrs_nl_mean=mean(rrs_nl,2);

    figure('Name',site_name,'position',[50, 30, 1200, 800])

    subplot(2,2,1),semilogx(T,rrs_eql,'black'); hold on;
    semilogx(T,rrs_eql_mean,'blue','LineWidth',2); grid on;
    xlabel('T (segundos)'); ylabel('RRS');legend('Promedio')
    title('EQL')

    subplot(2,2,3),semilogx(T,rrs_nl,'black'); hold on;
    semilogx(T,rrs_nl_mean,'green','LineWidth',2); grid on;
    xlabel('T (segundos)'); ylabel('RRS')
    title('NL')

    subplot(2,2,[2,4]),semilogx(T,rrs_eql_mean,'blue','LineWidth',2); hold on;
    semilogx(T,rrs_nl_mean,'green','LineWidth',2); grid on;

```

```

xlabel('T (segundos)'); ylabel('RRS')
title('Todos los modelos')

%%
% -----COMPUTING Fa AND Fv-----
---
%rrs = rrs_eql_mean;
% rrs = rrs_eqlfd_mean;
rrs = rrs_nl_mean;
Amplificacion_media=mean(rrs);

index_fa_min = find(T<=0.1, 1, 'last' );
index_fa_max = find(T<=0.5, 1, 'last' );

Fa(j) =
trapz(T(index_fa_min:index_fa_max), rrs(index_fa_min:index_fa_max)).*(1/0.
4);

Fa_1 = mean(rrs(index_fa_min:index_fa_max));

index_fv_min = find(T<=0.4, 1, 'last' );
index_fv_max = find(T<=2.0, 1, 'last' );

Fv(j) =
trapz(T(index_fv_min:index_fv_max), rrs(index_fv_min:index_fv_max)).*(1/1.
6);

Fv_1 = mean(rrs(index_fv_min:index_fv_max));

end

%-----REGRESSION ANALYSIS-----
--

%Fa
-----

[curve_fa, goodness_fa, output_fa] = fit(vs30',Fa', 'poly2'); % regression
analysis (FITTYPE = 'power1')curve_fa(x) = a*x^b

%          FITTYPE          DESCRIPTION
%          'poly1'          Linear polynomial curve y1(x) = p1*x + p2
%          'poly2'          Quadratic polynomial curve y1(x) = p1*x^2 +
p2*x + p3

coeffa=coeffvalues(curve_fa); % Coefficient for Fa
values

% a_fa=coeffa(1); % a coefficient
% b_fa=coeffa(2); % b coefficient
R2_fa = goodness_fa.rsquare; % Goodness of regression

```

```

%usando un fit polinomico
p1_fa=coeffa(1);
p2_fa=coeffa(2);
p3_fa=coeffa(3);

subplot(2,2,1),plot(curve_fa,vs30,Fa); hold on; % Plotting results
% line([360 360],[0 3])xlabel('Vs30(m/s)')
ylabel('Fa')
text(200,2.9,[num2str(p1_fa),'(Vs30) ','^2',' + ',num2str(p2_fa),'(Vs30) ',' + ',num2str(p3_fa)],'FontSize',10); hold on;
text(295,3.1,['(R) ','^2','= ',num2str(R2_fa)],'FontSize',10); hold on;
text(290,max(Fa),'CLASE D','FontSize',14); hold on;
text(425,max(Fa),'CLASE C','FontSize',14); hold on;

%Fv
-----

[curve_fv, goodness_fv, output_fv] = fit(vs30,'Fv','poly2'); % regression
analysis

coeffv=coeffvalues(curve_fv); % Coefficient for Fa
values

% a_fv=coeffv(1); % a coefficient
% b_fv=coeffv(2); % b coefficient
R2_fv = goodness_fv.rsquare; % Goodness of regression

%usando un fit polinomico
p1_fv=coeffv(1);
p2_fv=coeffv(2);
p3_fv=coeffv(3);

subplot(2,2,3),plot(curve_fv,vs30,Fv); hold on; % Plotting results
xlabel('Vs30(m/s)')
ylabel('Fv')
%
text(220,0.5,[num2str(a_fv),'(Vs30) ','^{' ,num2str(b_fv),' }'],'FontSize',1
6); hold on;
%
text(415,1.1055,[num2str(p1_fv),'(Vs30) ',' + ',num2str(p2_fv)],'FontSize',10); hold on;
text(280,2.43,[num2str(p1_fv),'(Vs30) ','^2',' + ',num2str(p2_fv),'(Vs30) ',' + ',num2str(p3_fv)],'FontSize',10); hold on;
text(295,2.42,['(R) ','^2','= ',num2str(R2_fv)],'FontSize',10); hold on;
text(290,max(Fv),'CLASE D','FontSize',14); hold on;
title('METODO NL-HH');

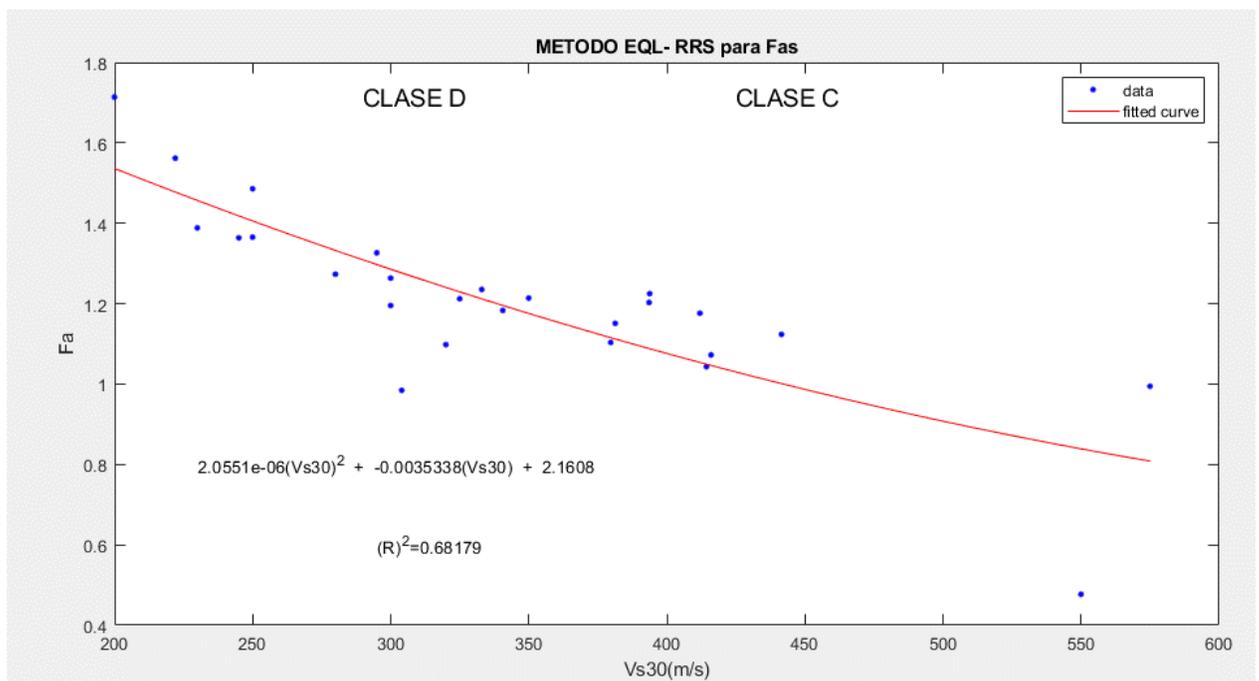
%-----END OF REGRESSION ANALYSIS-----

```

$$F_a(RRS) = \frac{R_{suelo}}{R_{roca}} \frac{1}{0.4} \int_{0.1}^{0.5} \frac{RS_{suelo}(T)}{RS_{roca}(T)} dT \quad \text{Ec. -56}$$

$$F_v(RRS) = \frac{R_{suelo}}{R_{roca}} \frac{1}{1.6} \int_{0.4}^{2.0} \frac{RS_{suelo}(T)}{RS_{roca}(T)} dT \quad \text{Ec. -57}$$

Por cada punto de análisis se genera un par de coeficientes para periodos cortos y otro para periodos largos, como la influencia de la respuesta sísmica de los espectros UHS para Nicaragua no tienen un efecto importante en los periodos largos tal se menciona en el estudio Álvarez 2019. Únicamente se realiza se presenta el análisis de los factores de amplificación para periodos cortos  $F_a$ .



**Figura 26 – METODO EQL - RRS**

La tendencia indica que las amplificaciones ocurren para vs menores, la propuesta que se recomienda para fines prácticos es que para suelos clase D tengan un coeficiente de amplificación por tipo de suelo ( $F_a = 1.4$ ) y para suelos de clase C ( $F_a = 1.3$ ).

## 5 CAPITULO V. Resultados.

Los RRS promedios derivados de 20 registros acelerográficos y 4 combinaciones de curvas dinámicas calculados con el método EQL y NL las máximas amplificaciones para el método EQL ocurren entre 0.2 y 0.4 segundos con amplitudes entre 1.2 y 1.7. Con el método no-lineal las máximas amplitudes tienden a ser un poco más bajas que las anteriores solo que esta vez ocurren entre 0.4 hasta 0.7 segundos lo que está asociado a la no-linealidad causada por las altas aceleraciones espectrales que en este caso fueron cerca de 0.5 g.

A partir de los RRS calculados se determinaron los factores de amplificación para periodos largos y periodos cortos para cada modelo analizado. Los valores para los periodos cortos fueron presentados en la figura 26 a partir de las cuales se estiman modelos de regresión en función de la velocidad de corte  $V_{s30}$ . Siendo el modelo de mejor ajuste para los  $F_a$  el indicado en la ecuación siguiente

$$2.0551e^{-06}(V_{s30})^2 + 0.0035338(V_{s30}) + 2.1608 \quad \text{Ec. -58}$$

El coeficiente de ajuste  $R^2$  se encuentra en 0.68, fue el mejor ajuste para los datos de dispersión generados por las respuestas sísmicas de sitios RRS, se aprecia claramente que el método no lineal híbrido hiperbólico muestra una reducción en los niveles de amplificación lo cual se explica por su capacidad de reproducir mejor la disipación de energía de deformación del suelo especialmente en grandes deformaciones, dado el caso evaluado para valores de PGA en el orden de 0.5 g.

Dado que los suelos clasificados como D tienen mayores amplificaciones y los datos de dispersión en la región de  $V_s$  para dicha clasificación se encuentran entre valores de 1.7 a valores cercanos a 1 inclusive, para el caso de los suelos clasificados como tipo C, se observa claramente que son de menor amplificación en la cual se concentran en valores cercanos de 1 a 1.3. hay un resultado con una baja amplificación, el cual posiblemente obedece a condición particular del sitio de estudio.

## 6 CAPITULO VI. Aspectos finales.

### 6.1 Conclusiones

Las razones espectrales RRS para el método EQL reflejan valores mas grandes en sus amplificaciones por ende se presenta este método como el propuesto para así estar del lado conservador en lo que respecta a las amplificaciones. Por otra parte, el modelo de regresión que mejor se ajusto es el que se especifica en la ecuación 58, se concluye en este estudio que existen mayores amplificaciones de suelo para los clasificados como D y que estas disminuyen a medida que el  $V_s$  va aumentando tan como se refleja en la figura 26. Se concluye que los valores de propuesta para la norma sismorresistente para la ciudad de Managua para los coeficientes de amplificación por tipo de suelo son los siguientes:

Suelo Clase D;  $F_{as} = 1.4$

Suelo Clase C;  $F_{as} = 1.3$

Cabe destacar que este estudio fue realizado para únicamente la zona 3 de las formas espectrales, zona 4 del mapa de zonificación sísmica de la norma sismorresistente para la ciudad de Managua.

Los valores del reglamento nacional de la construcción RNC-07 para las mismas condiciones de sitio dictan valores de 1.5 para suelos tipo II que su equivalente es el de clase D, y 2.0 para suelos tipo III o clase C. el cual es evidente la sobre estimación de dichos factores y por ende en el aumento del; costo de las estructuras diseñadas con dicho reglamento.

Se aclara que estos coeficientes determinados en este trabajo son factores que amplifican verticalmente al espectro de diseño de la norma y no son factores de ajuste espectral de anchos de mesetas por amplificaciones horizontales debido a la presencia de suelos menos rígidos desde el punto de vista de las velocidades de ondas de cortes  $V_s$ .

Por otra parte, en este estudio se observó que el análisis de respuesta sísmica de sitio puede variar considerablemente en dependencia de muchos factores, como el método usado de análisis, debido al enfoque numérico del método en la captura del comportamiento del amortiguamiento, las formulaciones matemáticas de las condiciones de propiedad no lineal del suelo y de los valores de aceleración que en la cual se sometan los suelos. El método no lineal híbrido hiperbólico captura las grandes deformaciones que presentan los suelos debido a valores altos de aceleración sísmica, los coeficientes de amplificación se ven afectados por dicha deformación del suelo y su amplificación disminuye por tal efecto de disipación energética.

## 7 Recomendaciones.

Será necesario considerar diferentes escenarios de valor de PGA y UHS para verificar el comportamiento de los suelos y su respectivo valor de amplificación. Para una propuesta con carácter de normativa será necesario realizar más estudios de caracterización de suelo a través de métodos geofísicos para la determinación de velocidades de ondas de corte a los 30 metros y así obtener una mejor discretización del suelo para aproximar mejor su comportamiento.

Como el impacto que tienen los valores de coeficiente de amplificación por tipo de suelo en el costo de las estructuras es muy importante, es necesario actualizar la norma a nivel nacional para así evitar sobre diseños que conduzca a desinteresar a los inversionistas por los excesivos costos de construcción debido a sobre diseños estructurales, considero que este es un factor muy importante que deben de manejar las autoridades nacionales en el ámbito de la regulación de las normas de construcción del país.

## 8 Referencias Bibliográficas.

Baker, J. W., & Lee, C. (2017). An Improved Algorithm for Selecting Ground Motions to Match a Conditional Spectrum. *Journal of Earthquake Engineering*, 1–16.

Brown, R. D., Ward, P. L., & Plafker, G. (1974). Geologic and seismologic aspects of the Managua, Nicaragua, earthquakes of December 23, 1972: U.S. Geological Survey Professional Paper 838, 1973. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64, 1031-.

Faccioli, E., Santoyo, E., & Leon, J. L. (1973). Microzonation criteria and seismic response studies for the city of Managua. *Conference Proceedings, Earthquake Engineering Research Institute. Managua, Nicaragua, Earthquake of December 23, 1, 271–291.*

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Leonardo Alvarez 2019, Estimacion de la Amenaza Sismica para Nicaragua. Proyecto Normativa sismorresistente para la ciudad de Managua – MTI.

Lorio & Reyes 2019, Análisis de respuesta sísmica de la zona urbana de la ciudad de Managua por los métodos Lineal Equivalente Aproximado (EQL), Lineal Equivalente Dependiente de la Frecuencia (EQLFD) y No Lineal en dominio del

tiempo (NL) utilizando el software SeismoSoil. Proyecto Normativa sismorresistente para la ciudad de Managua – MTI.

Obando, E. A. (2017). Shallow vs structure estimation for seismic site response using the active masw method- A case study at the Urban Area. In 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.

Parrales, R. M. (2006). Dynamic properties of the soils in the area of Managua, Nicaragua. Monography. Engineering Geology. Lund: Lund University.

Sun, C.-G., Kim, D.-S., & Chung, C.-K. (2005). Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea. *Engineering Geology*, 81, 446–469.

Walther, C. H. E., Flueh, E. R., Ranero, C. R., Von Huene, R., & Strauch, W. (2000). Crustal structure across the Pacific margin of Nicaragua: evidence for ophiolitic basement and a shallow mantle sliver. *Geophysical Journal International*, 141, 759–777. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00134.x>

Ward, P. L., Gibbs, J., Harlow, D., & Aburto, A. (1974). Aftershocks of the Managua, Nicaragua, earthquake and the tectonic significance of the Tiscapa fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64, 1017–1029.

Shi, J., and D. Assimaki (2017), From stiffness to strength in site response analyses: Formulation and validation of a hybrid hyperbolic nonlinear soil model, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(3).

## 9 Anexos.

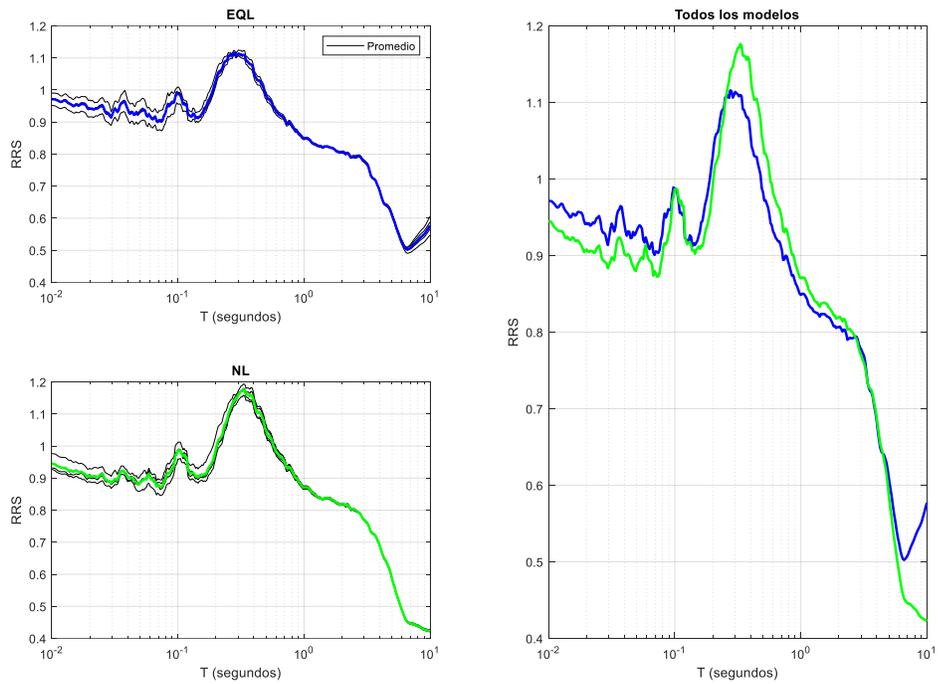


Figura 28 - RRS P1

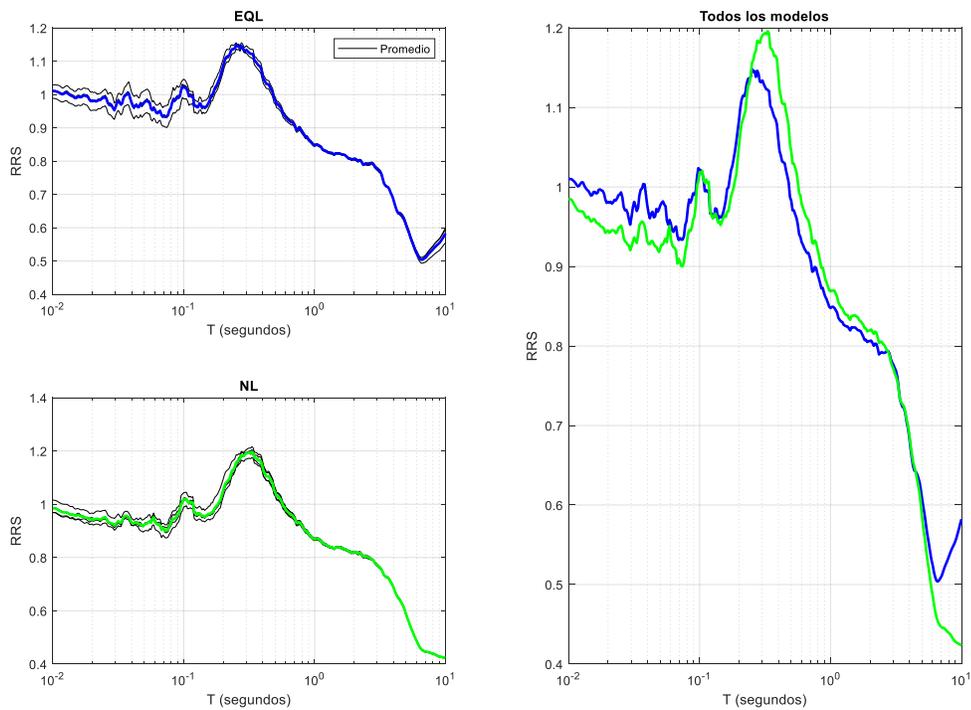


Figura 27 - RRS P2

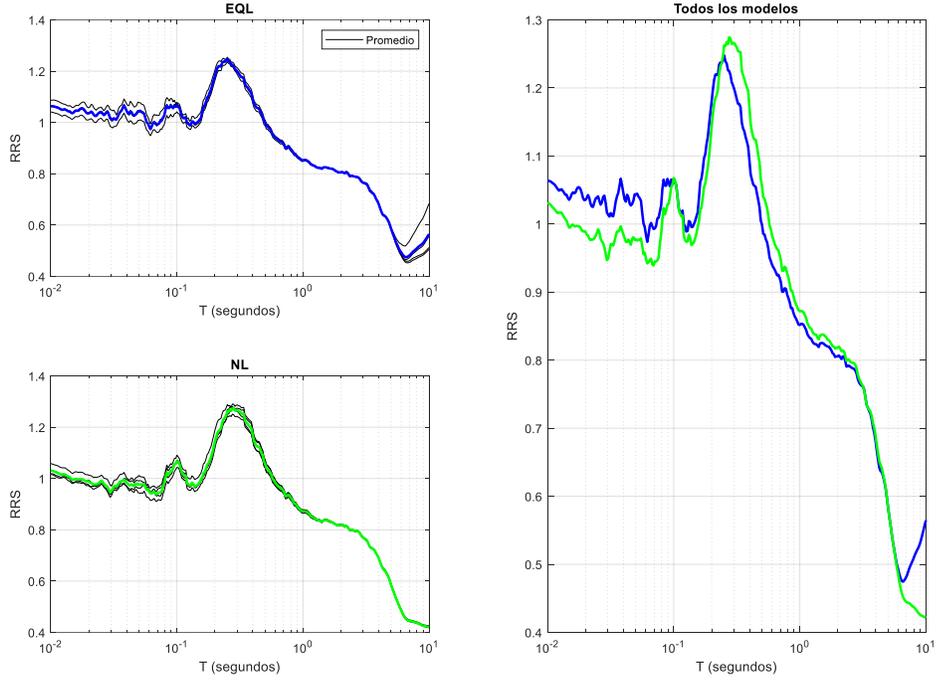


Figura 30 - RRS P3

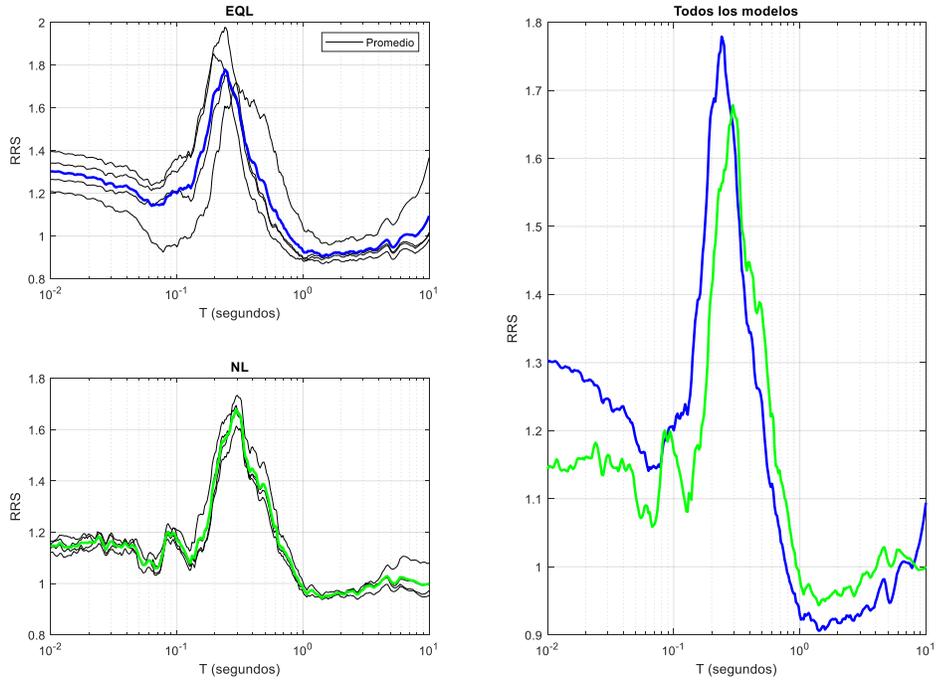


Figura 29 - RRS P4

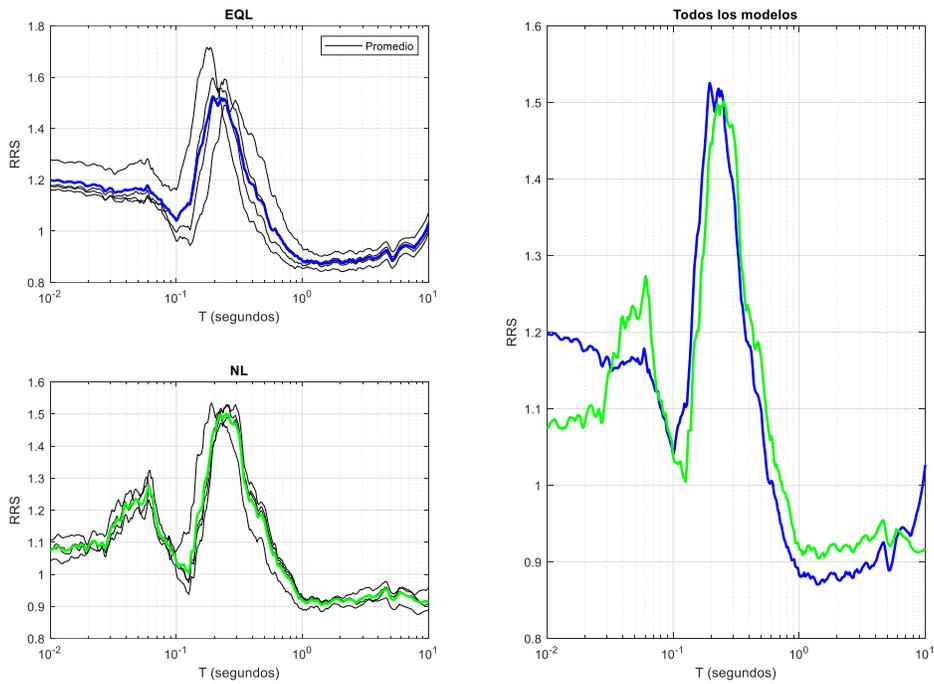


Figura 32 - RRS P5

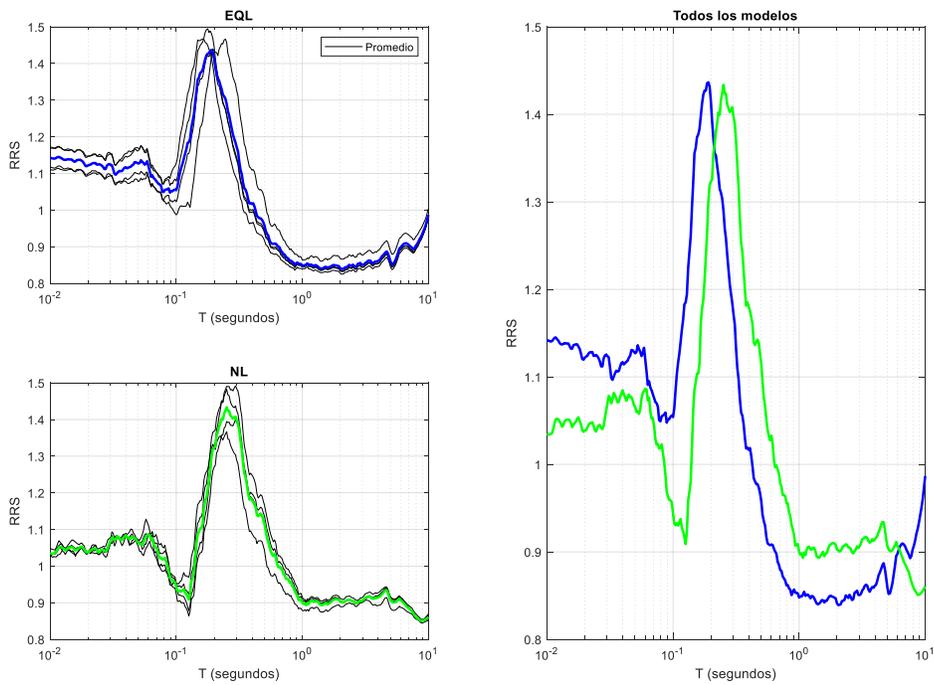


Figura 31 - RRS P6

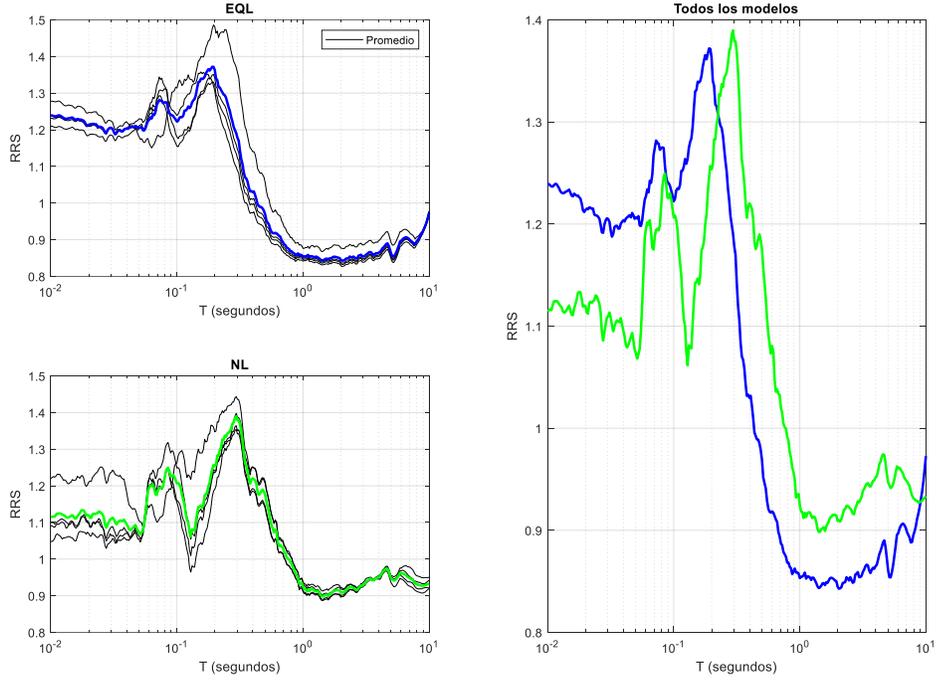


Figura 34 - RRS P7

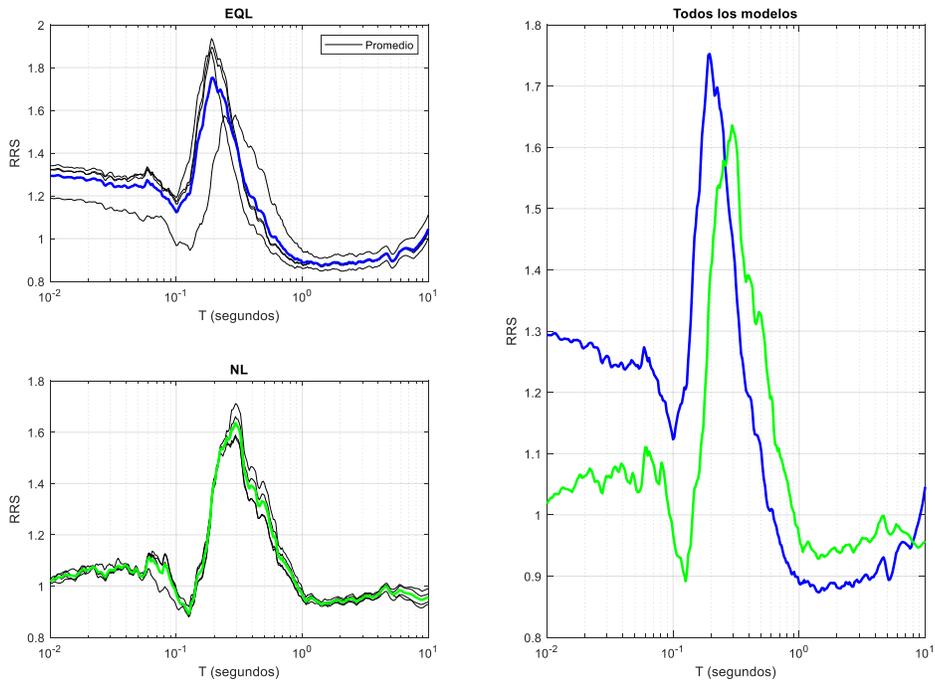


Figura 33 - RRS P8

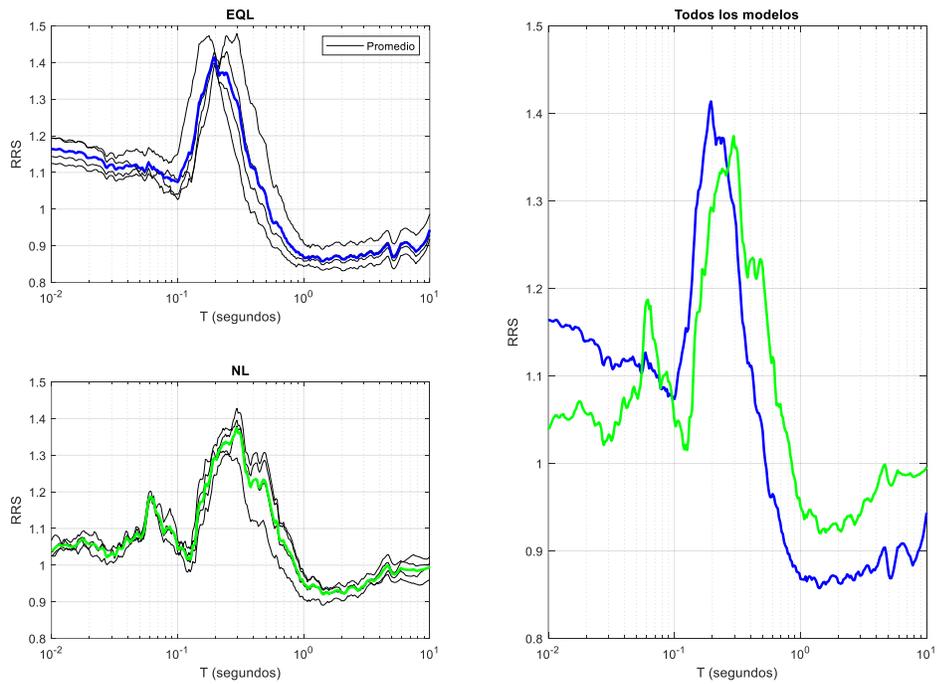


Figura 36 - RRS P9

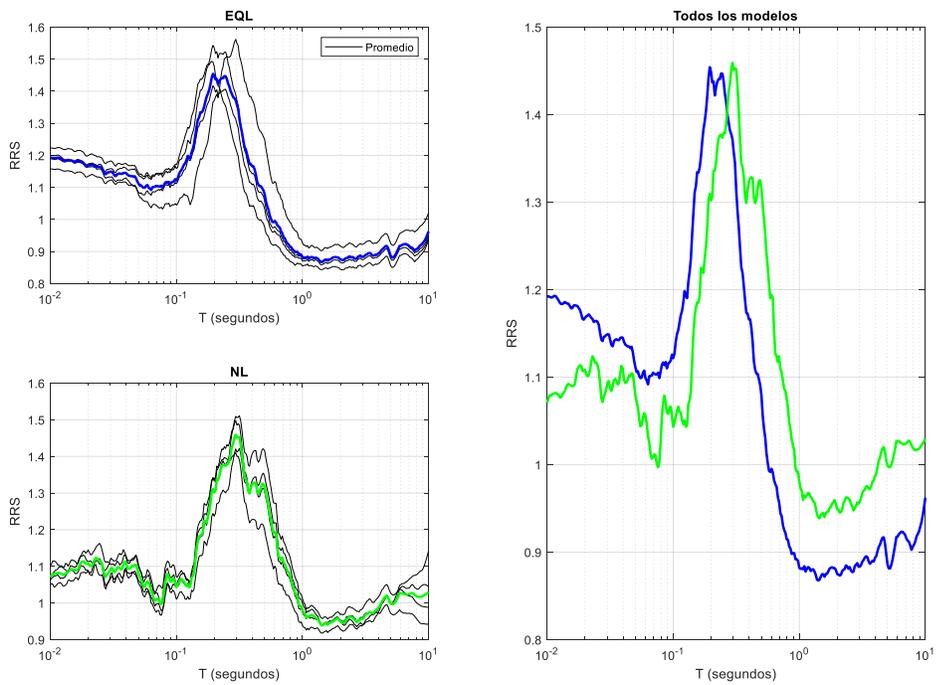


Figura 35 - RRS P10

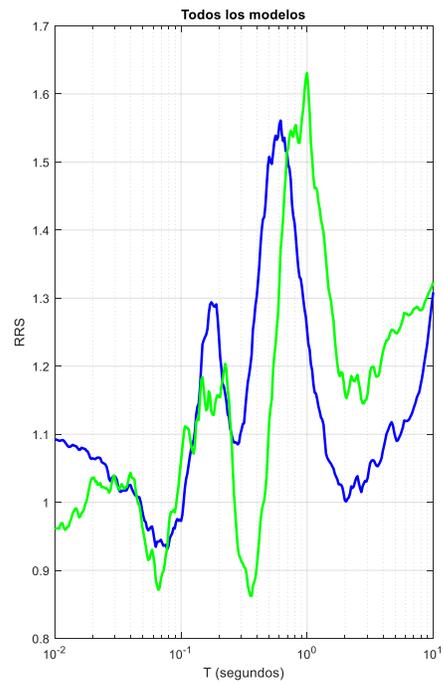
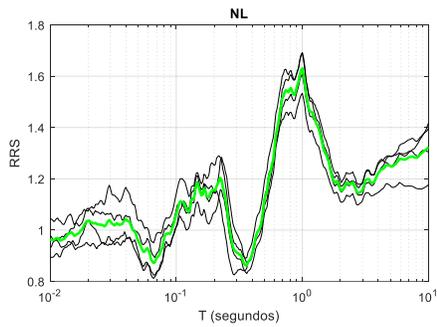
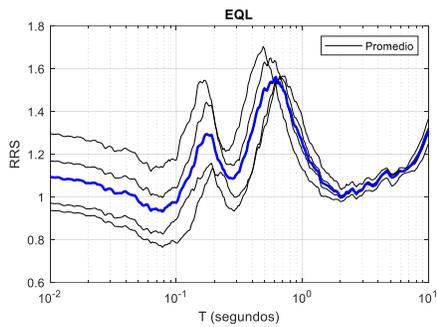


Figura 38 - RRS P12

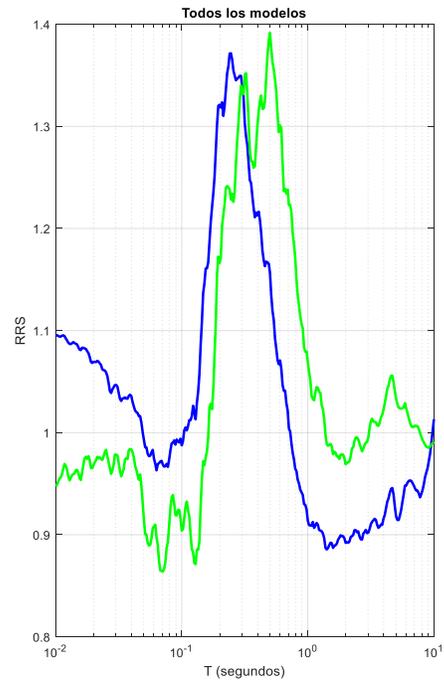
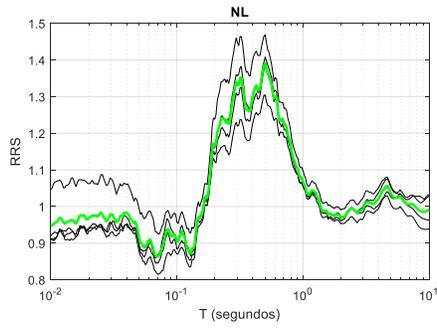
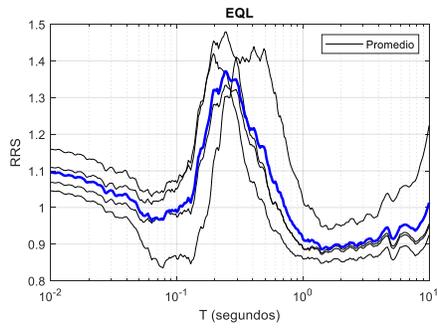


Figura 37 - RRS P11

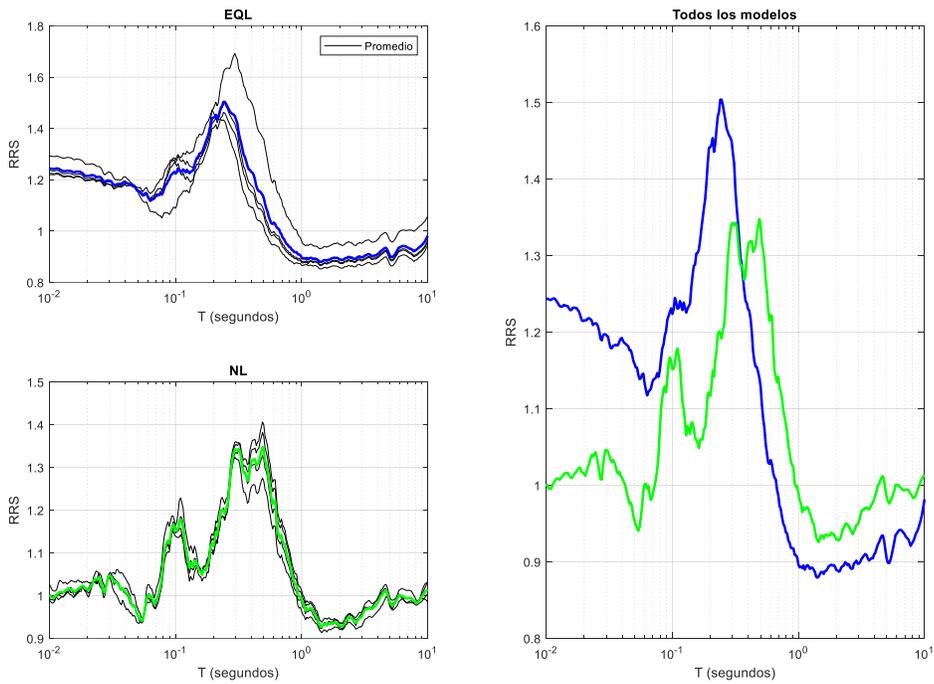


Figura 40 - RRS P13

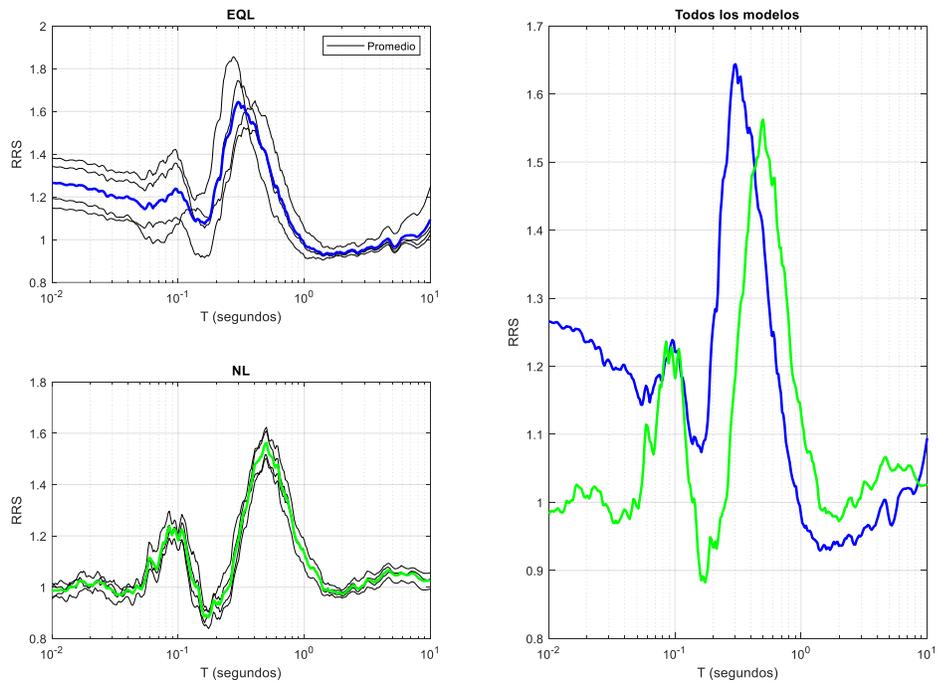


Figura 39 - RRS P14