

DETERMINACIÓN DE LOS PERIODOS FUNDAMENTALES DEL SUELO EN
ESTACIONES DE LA RED DE ACELERÓGRAFOS QUE CONFORMAN EL
OBSERVATORIO SISMOLÓGICO UDES - CDMB



SEBASTIAN CAMILO GARCIA BARRETO

UNIVERSIDAD DE SANTANDER UDES

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2019

DETERMINACIÓN DE LOS PERIODOS FUNDAMENTALES DEL SUELO EN
ESTACIONES DE LA RED DE ACELERÓGRAFOS QUE CONFORMAN EL
OBSERVATORIO SISMOLÓGICO UDES - CDMB

SEBASTIAN CAMILO GARCIA BARRETO

TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL

Director(a):

ING NURIAN BIBIANA MUNEVAR PEREZ

DIRECTORA DEL PROYECTO

UNIVERSIDAD DE SANTANDER UDES

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2019

**ACTAS DE SUSTENTACIÓN DE
TRABAJO DE GRADO**

Siendo las 9:00 a.m. del día 4 del mes de julio de 2019, se reunieron en la Sede Campus Universitario de Lagos del Cacique, aula múltiple del Edificio Muisca los estudiantes que a continuación se mencionan para hacer la sustentación pública de su proyecto de grado y optar al Título de: **INGENIERO CIVIL**

1. AUTOR: SEBASTIÁN CAMILO GARCÍA BARRETO Código: 13202149

2. TITULO: “DETERMINACIÓN DE LOS PERIODOS FUNDAMENTALES DEL SUELO EN LAS ESTACIONES DE LA RED DE ACELERÓGRAFOS QUE CONFORMAN EL OBSERVATORIO SISMOLÓGICO UDES - CDMB.”

3. DIRECTOR PROYECTO DE GRADO: NURIAN BIBIANA MUNÉVAR PÉREZ

**4. JURADO CALIFICADOR: JOSÉ ANTONIO DELGADO MONROY
HUGO ALBERTO LEÓN TÉLLEZ**


5. MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Después de escuchar la sustentación, el jurado, tomando en cuenta la coherencia con las áreas del conocimiento involucradas en el perfil de la carrera y la evaluación general del proceso de elaboración del Proyecto de Grado, asigna el siguiente concepto valorativo a dicho Proyecto de Grado:

Nota: 5.0 (Cinco punto cero)

En constancia firman:


José Antonio Delgado Monroy
Calificador


Ing. José Antonio Delgado Monroy
Decano de Ingenierías


Hugo Alberto León Tellez
Calificador


Nurian Bibiana Munevar Pérez
Director de Proyecto



DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente al dueño de todo, Dios, por permitirme plantearme, trabajar y cumplir esta importante meta que de alguna u otra forma cambia mi vida y abre paso a enfocarme en otras metas.

Dedico con amor a mi padre Gustavo Alirio García Porras y a mi madre Candelaria De Jesús Barreto Salgado por darme ese apoyo incondicional que fue muy necesario en esta etapa de mi vida y principalmente por tener esa confianza en mí que me sirvió para demostrar que con esfuerzo y dedicación se pueden hacer grandes cosas.

Dedico a mi hermana Mónica Patricia García Barreto por todo el apoyo y la confianza que depósito en mí, por ser una buena hermana y amiga en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la vida y permitirme cumplir esta importante meta, por haberme dado tres personas valiosas; mi padre, madre y hermana que nunca se han apartado de mí, siempre han estado como un apoyo incondicional y que hacen dar ganas de seguir adelante para cumplir todas esas metas que de un momento se plantean y no se dejan de trabajar hasta cumplirlas

Agradezco a mi Padre Gustavo Alirio García Porras, a mi madre Candelaria Barreto Salgado y a mi hermana Mónica Patricia García Barreto por confiar en mí y brindarme todo ese apoyo que fue útil para seguir adelante pese a los obstáculos que se presentaron en el camino de esta carrera profesional.

Agradezco a la Ingeniera Nurian Bibiana Munevar Pérez por ser parte importante en la finalidad de mi carrera, gracias por su profesionalismo y su dedicación, gracias por su orientación y sus consejos, gracias por todos los conocimientos que me compartió en el transcurso de la carrera.

Agradezco al Ingeniero Carlos Fernando Lozano Lozano por ser parte de la dirección del proyecto, por su disponibilidad y por todos aquellos conocimientos que me compartió.

Agradezco a COLCIENCIAS por la oportunidad que me brindo de ser joven investigador, por su apoyo en la realización del proyecto de grado y por colaborar en la educación con oportunidades como esta.

Agradezco a la Universidad De Santander UDES por su proceso de formación y a todo su cuerpo administrativo que velan por formar buenos profesionales y ser cada día una mejor institución educativa.

Agradezco a todo el cuerpo de docentes que durante el trascurso de mi carrera compartieron el conocimiento gracias a su experiencia, gracias por su dedicación y por formar buenos profesionales.

CONTENIDO

1.INTRODUCCIÓN.....	10
2.OBJETIVOS.....	11
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	11
3.MARCO TEORICO	12
3.1. SISMICIDAD A NIVEL MUNDIAL.....	12
3.1.1 SISMICIDAD HISTÓRICA EN EL MUNDO	15
3.1.2 NIDOS SÍSMICOS EN EL MUNDO	16
3.1.2.1 NIDO SÍSMICO VRANCEA, RUMANIA	17
3.1.2.2 NIDO SÍSMICO HINDU KUSH, AFGANISTÁN.	17
3.2. SISMICIDAD EN COLOMBIA.....	18
3.2.1 EVENTOS SÍSMICOS HISTÓRICOS EN COLOMBIA.	21
3.2.2 DESCRIPCIÓN DE EVENTOS SÍSMICOS REPRESENTATIVOS E HISTÓRICOS EN COLOMBIA.	22
3.3. SISMICIDAD EN SANTANDER, COLOMBIA.....	23
3.3.1 SISMICIDAD HISTÓRICA EN SANTANDER, COLOMBIA	24
3.3.2 NIDO SÍSMICO EN BUCARAMANGA, SANTANDER.....	26
3.4 ONDAS SISMICAS	28
3.4.1 ONDAS SÍSMICAS INTERNAS	28
3.4.2 ONDAS SÍSMICAS SUPERFICIALES	30
3.5 MEDICION DE LOS EVENTOS SISMICOS	31
3.5.1 ESCALA DE MAGNITUD LOCAL (ML) (RICHTER).....	32
3.5.2 ESCALA DE MAGNITUD DE MOMENTO (MW)	32
3.5.3 ESCALA DE INTENSIDAD DE MERCALLI.....	33
3.5.4 ESCALA MACRO SÍSMICA DE INTENSIDAD EMS-98.....	34
3.6 PERIODO FUNDAMENTAL DEL SUELO.....	35
3.6.1 EFECTO LOCAL.....	35
3.6.2 RUIDO SÍSMICO (VIBRACIONES AMBIENTALES).....	35
3.6.3 MÉTODO DEL COCIENTE ESPECTRAL (H/V) - TÉCNICA DE NAKAMURA.....	36
3.7 ESTUDIOS RELACIONADOS Y APLICACIONES AL METODO DE COCIENTE ESPECTRAL	39

3.7.1 ESTAHBAN BRANCH, ESTAHBAN, IRAN.....	39
3.7.2 VARAŽDIN, NORTE DE CROACIA.....	41
4. METODOLOGIA	43
4.1 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....	44
4.2 MEDICIONES DE VIBRACION AMBIENTAL EN BUCARAMANGA (SANTANDER, COLOMBIA)...	44
4.3 SELECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.....	49
4.3.1 SESAME EUROPEAN RESEARCH PROJECT	49
4.3.2 OPENHVS.....	50
4.4 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES DE VIBRACIÓN AMBIENTAL Y CALCULO DEL PERIODO FUNDAMENTAL DEL SUELO	50
4.4.1 CONVERSIÓN DE LA SEÑAL.....	51
4.4.2 CARGA DE LA SEÑAL.....	51
4.4.3 VENTANAS DE ANÁLISIS	52
4.4.4 PARÁMETROS DE PROCESAMIENTO Y TRANSFORMADA DE FOURIER.....	53
4.4.5 COCIENTE ESPECTRAL Y FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE LA SEÑAL.....	54
5. ANALISIS Y RESULTADOS.....	57
5.1 ESTACIÓN DE CAMPOHERMOSO	57
5.2 ESTACIÓN DE NAZARETH	61
5.3 ESTACIÓN DE MORRORICO	65
5.4 ESTACIÓN DE PROVENZA	69
5.5 ESTACIÓN DE VILLA HELENA	73
5.6 ESTACIÓN DE LA ROSITA	77
5.7 ESTACIÓN DE CARRIZAL	81
5.8 ESTACIÓN DE LOS SANTOS.....	84
6. CONCLUSIONES.....	88
7. RECOMENDACIONES.....	91
8. BIBLIOGRAFÍA.....	92

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DE DISTRIBUCIÓN SISMICIDAD MUNDIAL	12
FIGURA 2. MAPA DIVISIÓN PLACAS TECTONICAS.....	13
FIGURA 3. MAPA DEL CINTURON DE FUEGO DEL PACIFICO	14
FIGURA 4. MAPA ZONIFICACIÓN DE LA ACTIVIDAD SISMICA MUNDIAL.....	14
FIGURA 5. LOCALIZACION DE LOS NIDOS SISMICOS INTERMEDIOS MAS IMPORTANTES EN EL MUNDO.....	16
FIGURA 6. MAPA DE LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCION DE LOS NIDOS SISMICOS MAS IMPORTANTES DEL MUNDO	17
FIGURA 7. MAPA DE ZONIFICACIÓN DE LA ACTIVIDAD SISMICA EN COLOMBIA 2016.....	18
FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN EVENTOS SISMICOS EN COLOMBIA A INICIOS DEL AÑO 2019	20
FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DE LOS EVENTOS SISMICOS EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA A INICIOS DEL AÑO 2019	23
FIGURA 10. IMÁGENES DE LA DESTRUCCIÓN DE MUNICIPIOS CERCANOS A LOS SANTOS, SANTANDER OCACIONADA POR EL SISMO DE MARZO 10 DE 2015	25
FIGURA 11. MAPA DE INTENSIDADES SISMO DE MARZO 10 DE 2015	26
FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN DE LOS EVENTOS SISMICOS EN EL NIDO SISMICO DE BUCARAMANGA (MUNICIPIO DE LOS SANTOS, SANTANDER, COLOMBIA)	27
FIGURA 13. REPRESENTACIÓN DE LOS EFECTOS MECÁNICOS ONDAS P.	29
FIGURA 14. REPRESENTACIÓN DE LOS EFECTOS MECÁNICOS ONDAS S.	29
FIGURA 15. REPRESENTACIÓN DE LOS EFECTOS MECÁNICOS ONDAS RAYLEIGH.	30
FIGURA 16. REPRESENTACIÓN DE LOS EFECTOS MECÁNICOS ONDAS LOVE.....	31
FIGURA 17. ESTRUCTURA GEOLÓGICA DE UNA ZONA SEDIMENTARIA.....	37
FIGURA 18. MAPA DE ZONAS SEGURAS Y ZONAS VULNERABLES EN AREA SELECCIONADA DE LA CIUDAD DE ZHIRAZ.	40
FIGURA 19. COMPARACION DE LAS FRECUENCIAS FUNDAMENTALES DEL SUELO Y UN EDIFICIO EN LA CIUDAD DE VARAŽDIN	42
FIGURA 20. ETAPAS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	43
FIGURA 21. RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS EN COLOMBIA	45
FIGURA 22. LOCALIZACIÓN RED DE ACELEROGRAFOS BUCARAMANGA, SANTANDER	46
FIGURA 23. ACELERÓGRAFO TIPO REFTEK	47
FIGURA 24. SEÑAL EMITIDA DEL ACELEROGRAFO DIGITAL.....	48
FIGURA 25. SEÑAL CARGADA EN EL SOFTWARE GEOPSY	51

FIGURA 26. SEÑAL CARGADA EN EL PROGRAMA OPENHVSR.....	52
FIGURA 27. DIVISION DE LA SEÑAL EN VENTANAS DE ANALISIS.....	53
FIGURA 28. RESULTADO PROCESAMIENTO CON GEOPSY	55
FIGURA 29. RESULTADO PROCESAMIENTO CON OPENHVSR.....	56
FIGURA 30. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE CAMPOHERMOSO.	58
FIGURA 31. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE CAMPOHERMOSO CON GEOPSY	59
FIGURA 32. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE CAMPOHERMOSO CON OPENHVSR	60
FIGURA 33. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE NAZARETH	62
FIGURA 34. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE NAZARETH CON GEOPSY	63
FIGURA 35. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE NAZARETH CON OPENHVSR	64
FIGURA 36. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE MORRORICO.	66
FIGURA 37. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE MORRORICO CON GEOPSY	67
FIGURA 38. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE MORRORICO CON OPENHVSR	68
FIGURA 39. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE PROVENZA	70
FIGURA 40. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE PROVENZA CON GEOPSY.....	71
FIGURA 41. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE PROVENZA CON OPENHVSR	72
FIGURA 42. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE VILLA HELENA.	73
FIGURA 43. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE VILLA HELENA CON GEOPSY	74
FIGURA 44. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE VILLA HELENA CON OPENHVSR	75
FIGURA 45. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE LA ROSITA	77
FIGURA 46. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE LA ROSITA CON GEOPSY.....	78
FIGURA 47. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE LA ROSITA CON OPENHVSR	79
FIGURA 48. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE CARRIZAL.	81
FIGURA 49. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE CARRIZAL CON GEOPSY.....	82
FIGURA 50. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE CARRIZAL CON OPENHVSR	83
FIGURA 51. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE LOS SANTOS	84
FIGURA 52. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE LOS SANTOS CON GEOPSY	85
FIGURA 53. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE LOS SANTOS CON OPENHVSR	86

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. SISMICIDAD HISTORICA EN EL MUNDO	15
TABLA 2. SISMICIDAD HISTORICA DE COLOMBIA	21
TABLA 3. EVENTOS SISMICOS REPRESENTATIVOS EN COLOMBIA.....	22
TABLA 4. SISMICIDAD HISTORICA DE SANTANDER, COLOMBIA	24
TABLA 5. GRADOS DE LA ESCALA DE MAGNITUD RICHTER ML Y MW	32
TABLA 6. ESCALA DE INTENSIDAD DE MERCALLI.	33
TABLA 7. ESCALA MACROSISMICA EUROPEA (EMS-98)	34
TABLA 8. PERIODOS FUNDAMENTALES EN ESTACIONES DE ACELEROGRAFOS.....	81

RESUMEN

TÍTULO: DETERMINACIÓN DE LOS PERIODOS FUNDAMENTALES DEL SUELO EN ESTACIONES DE LA RED DE ACELEROGRAFOS DE BUCARAMANGA

AUTOR: SEBASTIAN CAMILO GARCIA BARRETO

PALABRAS CLAVES: FRECUENCIA FUNDAMENTAL, PERIODO FUNDAMENTAL, COCIENTE ESPECTRAL, METODO NAKAMURA, VIBRACIONES AMBIENTALES, RUIDO SISMICO.

DESCRIPCIÓN:

La Universidad De Santander UDES en un convenio con la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga llevan a cabo el proyecto del observatorio sismológico UDES-CDMB con el funcionamiento y monitoreo de ocho acelerógrafos especializados para el registro permanente de las aceleraciones del suelo en sitios específicos del área metropolitana de Bucaramanga.

Con el fin de obtener parámetros geomecánicos del suelo y determinar la respuesta sísmica en los sitios donde están ubicadas las estaciones de la red de acelerógrafos del área metropolitana de Bucaramanga en este proyecto de investigación se determinaron los periodos fundamentales del suelo a partir del procesamiento de las señales de vibración ambiental o ruido sísmico ambiental y aplicando el método del cociente espectral o técnica Nakamura que relaciona las componentes horizontal y vertical de los movimientos del suelo.

Como resultado se pudo determinar que los sitios en donde están ubicadas las estaciones de acelerógrafos presentan características dinámicas relacionadas con una zonificación sismogeotécnica y geológica de sitios conformados por depósitos de roca o suelos residuales competentes sobre el manto rocoso relacionadas con los periodos fundamentales que están en rangos de periodos bajos de vibración entre 0,035 y 0,066 segundos, el suelo con un mayor periodo fundamental fue el de la estación de Nazareth con 0,066 segundos y el suelo con un menor periodo fundamental se encontró en la estación de Morrhico con 0,035 segundos.

ABSTRACT

TITLE: DETERMINATION THE FUNDAMENTAL SOIL PERIODS IN STATIONS OF THE ACCELEROGRAPHS NETWORK OF BUCARAMANGA

AUTHOR: SEBASTIAN CAMILO GARCIA BARRETO

KEYWORDS: FUNDAMENTAL FREQUENCY, FUNDAMENTAL PERIOD, SPECTRAL RATIO, NAKAMURA'S METHOD, ENVIRONMENTAL VIBRATIONS, SEISMIC NOISE.

DESCRIPTION:

The University of Santander UDES in an agreement with the Regional Autonomous Corporation for the Defense of the Bucaramanga Plateau carry out the project of the seismological observatory UDES-CDMB with the operation and monitoring of eight accelerators for the permanent registration of soil accelerations in specific sites of the metropolitan area of Bucaramanga.

The purpose is obtaining geomechanical parameters of the soil and determine the seismic response in sites of the stations of the accelerographs network of the Bucaramanga metropolitan área. In this research project, the fundamental periods of the soil were determined from the processing of the signs of environmental vibration or environmental seismic noise and application of the spectral ratio method or Nakamura technique that relates the horizontal and vertical components of soil movements.

The result determined that the sites where the accelerator stations are located have seismogeotécnical and geological characteristics of sites formed by rock deposits or competent residual soils on the rock mantle related to the fundamental periods in ranges of low periods of vibration between 0.035 and 0.066 seconds, the soil with the highest fundamental period was on the Nazareth station with 0.066 seconds and the soil with the lowest fundamental period was in the Morrórico station with 0.035 seconds.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es uno de los países que presentan alta actividad sísmica y mayor riesgo sísmico en el mundo, evidenciado por los eventos sísmicos que han causado efectos destructivos en las diferentes regiones del país y los constantes eventos de mediana magnitud que corresponden a zonas de alta intensidad sísmica, el departamento de Santander es una de esas zonas ya que más del 50% de los eventos sísmicos del país tienen como epicentro a Santander y está clasificado por tener el segundo nido sísmico con mayor actividad del mundo; el nido sísmico de Bucaramanga.

La universidad De Santander UDES en su iniciativa para la generación de planes de mitigación del riesgo sísmico en el área metropolitana de Bucaramanga, se une con la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga para levantar un Observatorio Sismológico con el funcionamiento y monitoreo de ocho estaciones de acelerógrafos ubicados en puntos estratégicos en el área metropolitana de Bucaramanga, con esto se abre paso para la vinculación de proyectos de investigación enfocados al conocimiento de los fenómenos sísmicos.

Para la caracterización dinámica y la determinación de las respuestas sísmicas de los suelos en donde están ubicadas las estaciones de la red de acelerógrafos de Bucaramanga, se plantea un proyecto de investigación basado en la determinación de los periodos fundamentales del suelo en estaciones de la red de acelerógrafos de Bucaramanga.

El proyecto de investigación se concentra en revisar el estado del arte sobre la determinación de periodos fundamentales del suelo a partir de información de ruido sísmico local, en seleccionar los datos de las estaciones de la red de acelerógrafos a emplear en la determinación de periodos fundamentales del suelo y en la elaboración de rutinas de cálculo para procesar información y determinar periodos fundamentales del suelo todo esto aplicando el método del cociente espectral o técnica Nakamura para la relación espectral de las componentes horizontal y vertical de las aceleraciones del suelo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar los periodos fundamentales del suelo con fines de caracterización local en las estaciones que forman parte de la Red de Acelerógrafos del Área Metropolitana de Bucaramanga operada por el Observatorio Sismológico UDES CDMB.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Revisar el estado del arte sobre la determinación de periodos fundamentales del suelo a partir de información de ruido sísmico local.
2. Seleccionar los datos de las estaciones de la red de acelerógrafos a emplear en la determinación de periodos fundamentales del suelo.
3. Elaborar rutinas de cálculo para procesar información y determinar periodos fundamentales del suelo.
4. Calcular los periodos fundamentales del suelo de las estaciones que forman parte de la red de acelerógrafos.
5. Caracterizar de forma local el sitio donde están ubicadas las estaciones de la Red de Acelerógrafos del Área Metropolitana de Bucaramanga operada por el Observatorio Sismológico UDES CDMB.

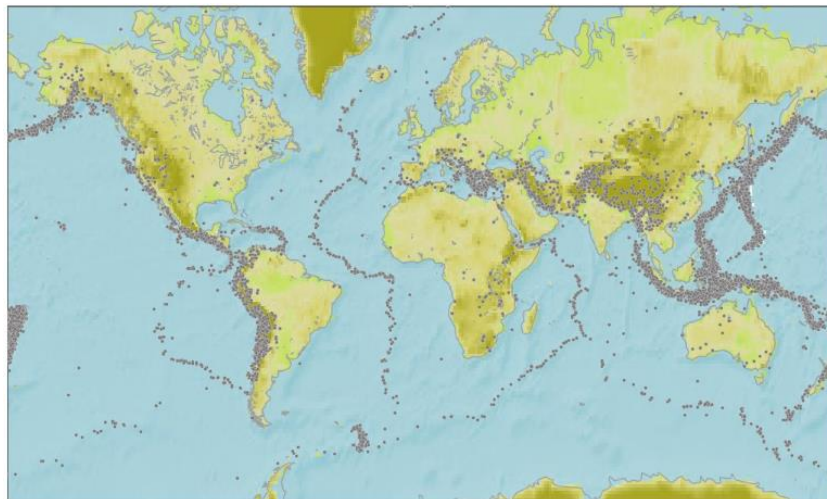
3.MARCO TEORICO

A finales del siglo XIX e inicios del siglo XX comienza la gran labor de la sismología, empezando con los primeros registros de los movimientos bruscos de la tierra que fomentaban la curiosidad de sus causas y consecuencias. Esta rama de la geofísica contribuye de manera considerable en el estudio de la dinámica de la tierra. [1] Mediante el avance tecnológico se inició el registro instrumental de las ondas sísmicas generadas por los eventos sísmicos, lo que permitió determinar la tendencia de la sismicidad a nivel mundial. [2]

3.1. SISMICIDAD A NIVEL MUNDIAL

En una escala mundial la sismicidad se distribuye en zonas delimitadas por una actividad sísmica alta y zonas de baja actividad sísmica, en la figura 1 se puede observar la distribución de una serie de eventos sísmicos registrados en el mundo que determina las divisiones de las placas tectónicas a partir de la representación de los focos de los eventos sísmicos. Se observa una sismicidad importante en las zonas del océano pacifico, conocido como el cinturón o anillo de fuego, está caracterizado por la concentración de las zonas de subducción más importantes del mundo. [2]

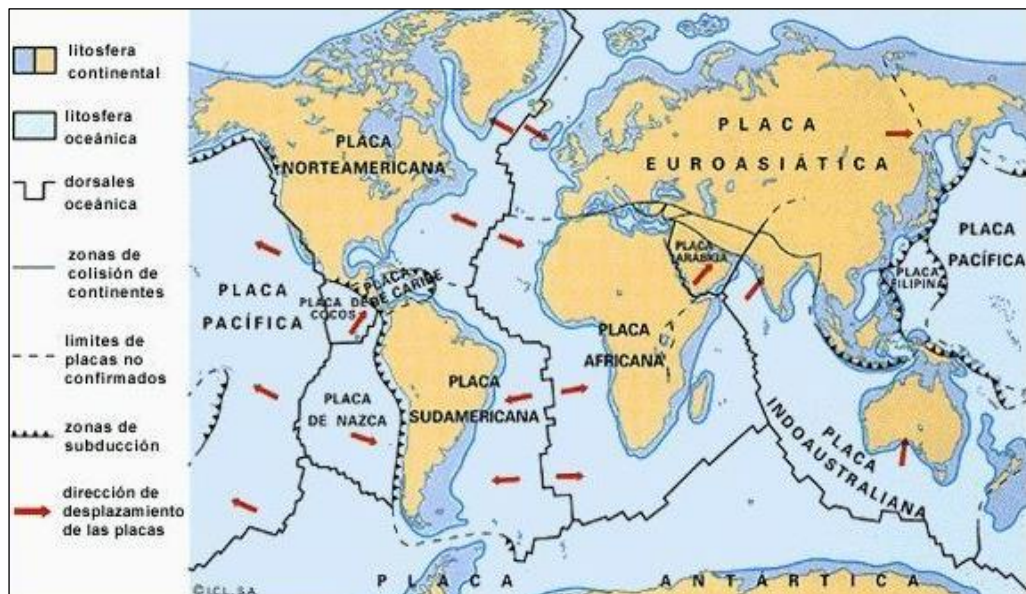
FIGURA 1. MAPA DE DISTRIBUCIÓN SISMICIDAD MUNDIAL



Fuente: Tomado de [3]

La distribución de los eventos sísmicos observados en la figura 1 confirma la teoría de la tectónica de placas de que la corteza terrestre está dividida en una serie de placas (ver figura 2) que con un comportamiento dinámico van en constante movimiento, la teoría describe el movimiento de las placas y los efectos de este movimiento, ya que es la causa principal de los eventos sísmicos y las erupciones volcánicas en la tierra. Este movimiento provoca tensión entre las capas que chocan y acumulan energía que se libera en forma de sismo o liberando parte del magma que está bajo la superficie terrestre [4]

FIGURA 2. MAPA DIVISIÓN PLACAS TECTONICAS



Fuente: tomado de [5]

Una de las áreas sísmológica y volcánicamente más activa del mundo la constituye el llamado "Cinturón de Fuego del Pacífico". En la figura 3 se puede observar los límites de los cuales se conforma el cinturón de fuego y aquellas placas tectónicas que definen su forma. [4]

Entre los países y zonas que conforman el anillo de fuego están Chile, Argentina, Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia, Panamá, Costa Rica, Nicaragua, El Salvador, Honduras, Guatemala, México, Estados Unidos, Canadá, las islas Aleutianas, las costas e islas de

Rusia, Japón, Taiwán, Filipinas, Indonesia, Malasia, Timor Oriental, Brunéi, Singapur, Papúa Nueva Guinea, Islas Salomón, Tonga, Samoa, Tuvalu y Nueva Zelanda. [2]

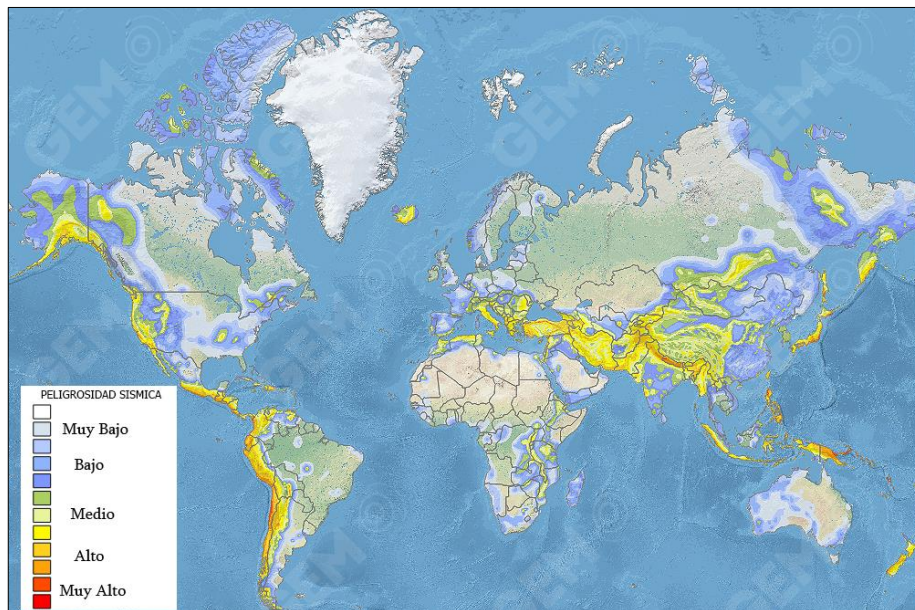
FIGURA 3. MAPA DEL CINTURON DE FUEGO DEL PACIFICO



Fuente: Tomado de [6]

A nivel mundial se cuenta con una clasificación de peligrosidad sísmica conforme a la actividad sísmica que se presenta en diferentes zonas. La figura 4 muestra la clasificación de la peligrosidad sísmica correspondiente a cada localidad (Muy Bajo – Bajo – Medio – Alto - Muy Alto), podemos observar que los países o lugares aledaños a las zonas del pacífico tienen peligrosidad sísmica de alta a muy alta.

FIGURA 4. MAPA ZONIFICACIÓN DE LA ACTIVIDAD SISMICA MUNDIAL



Fuente: Tomado de [7]

3.1.1 Sismicidad histórica en el mundo

Gracias a la red de sismógrafos ubicados alrededor del mundo se mantiene el monitoreo de los eventos sísmicos que afectan las diferentes localidades. El mundo ha sufrido un aumento en los eventos sísmicos de gran magnitud y de alto impacto, por lo tanto, la energía liberada por estos eventos sísmicos causa efectos devastadores que cobran vidas humanas, convirtiéndose en un peligro latente cada día. La tabla 1 muestra 20 eventos sísmicos de mayor magnitud que han ocurrido en el mundo a lo largo de los años. Se ha querido determinar los patrones de ocurrencia de los eventos sísmicos de alta energía, pero aún no hay datos suficientes para identificar una tendencia que alerte la ocurrencia de un evento sísmico. [8]

TABLA 1. SISMICIDAD HISTORICA EN EL MUNDO

N°	FECHA (UTC)	UBICACIÓN	Magnitud(MW)	Hora (UTC)	Latitud	Longitud
1	MAYO 22 1960	Valdivia, Chile	9.5	19:11	38.14 ° S	73.41 ° W
2	MARZO 28 1964	Alaska del sur	9.2	3:36	60.91 ° N	147.34 ° W
3	DICIEMBRE 26 2004	En la costa oeste de Sumatra del Norte	9.1	0:58	3.30 ° N	95.98 ° E
4	MARZO 11 2011	Cerca de la costa este de Honshu, Japón	9.1	5:46	38.30 ° N	142.37 ° E
5	NOVIEMBRE 4 1952	En la costa este de la península de Kamchatka, Rusia	9.0	16:58	52.62 ° N	159.78 ° E
6	FEBRERO 27 2010	Offshore Bio-Bio, Chile	8.8	6:34	36.12 ° S	72.90 ° W
7	ENERO 31 1906	Cerca de la costa de Ecuador	8.8	15:36	0.96 ° N	79.37 ° W
8	FEBRERO 4 1965	Islas de la Rata, Islas Aleutianas, Alaska	8.7	5:01	51.25 ° N	178.72 ° E
9	AGOSTO 15 1950	Región fronteriza Xizang-India oriental	8.6	14:09	28.36 ° N	96.45 ° E
10	ABRIL 11 2012	fuera de la costa oeste de Sumatra del Norte	8.6	8:39	2.33 ° N	93.06 ° E
11	MARZO 28 2005	Sumatra del Norte, Indonesia	8.6	16:10	2.09 ° N	97.11 ° E
12	MARZO 3 1957	Islas Andreanof, Islas Aleutianas, Alaska	8.6	14:23	51.50 ° N	175.63 ° W
13	ABRIL 1 1946	Sur de alaska	8.6	12:29	53.49 ° N	162.83 ° W
14	FEBRERO 1 1938	Banda Sea	8.5	19:04	5.05 ° S	131.61 ° E
15	NOVIEMBRE 11 1922	Atacama, Chile	8.5	4:33	28.29 ° S	69.85 ° W
16	OCTUBRE 13 1963	Islas kuriles	8.5	5:18	44.87 ° N	149.48 ° E
17	FEBRERO 3 1923	Cerca de la costa este de la península de Kamchatka, Rusia	8.4	16:02	54.49 ° N	160.47 ° E
18	SEPTIEMBRE 12 2007	Sumatra Meridional, Indonesia	8.4	11:10	4.44 ° S	101.37 ° E
19	JUNIO 23 2001	Cerca de la costa del sur del Perú	8.4	20:33	16.27 ° S	73.64 ° W
20	MARZO 2 1933	En la costa este de Honshu, Japón	8.4	17:31	39.21 ° N	144.59 ° E

Fuente: Tomado de [9]

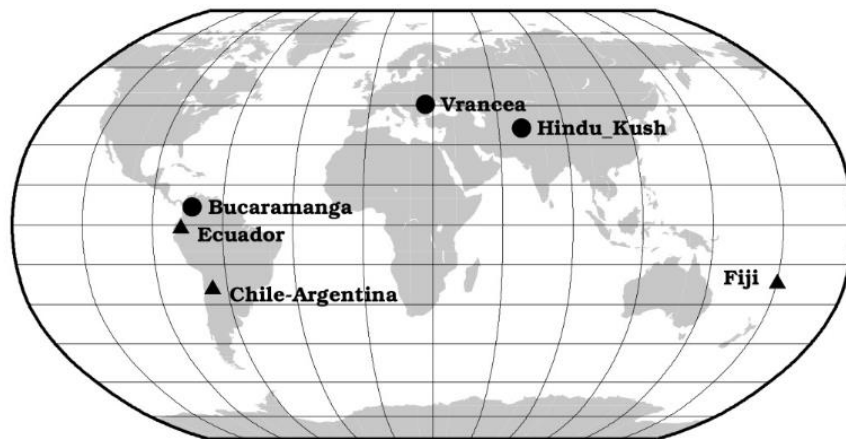
3.1.2 Nidos Sísmicos en el Mundo

En el mundo hay regiones particulares en donde se observa una agrupación de alta actividad sísmica, en la mayoría de los casos asociada a la conformación tectónica y debido a la subducción de las placas tectónicas, estos lugares se denominan nidos sísmicos. [10]

Un nido sísmico es definido por una alta actividad sísmica estacionaria en un volumen determinado relativamente más activo en entorno. Los nidos sísmicos se pueden clasificar conforme a su profundidad, en nidos de profundidad intermedia en relación a procesos de subducción y en nidos pocos profundos en relación con la actividad volcánica. [10]

Los tres nidos sísmicos de profundidad intermedia más conocidos en el mundo son: los nidos (Bucaramanga, Colombia), (Vrancea, Rumania), (Hindu Kush, Afganistán) y algunos sitios con características similares a los nidos sísmicos intermedios están ubicados en Chile-Argentina, Ecuador y Fiji. La figura 5 muestra el mapa de la localización de los nidos sísmicos de profundidad intermedia más importantes del mundo. [10]

FIGURA 5. LOCALIZACION DE LOS NIDOS SISMICOS INTERMEDIOS MAS IMPORTANTES EN EL MUNDO.



Fuente: Tomado de [11]

3.1.2.1 Nido Sísmico Vrancea, Rumania

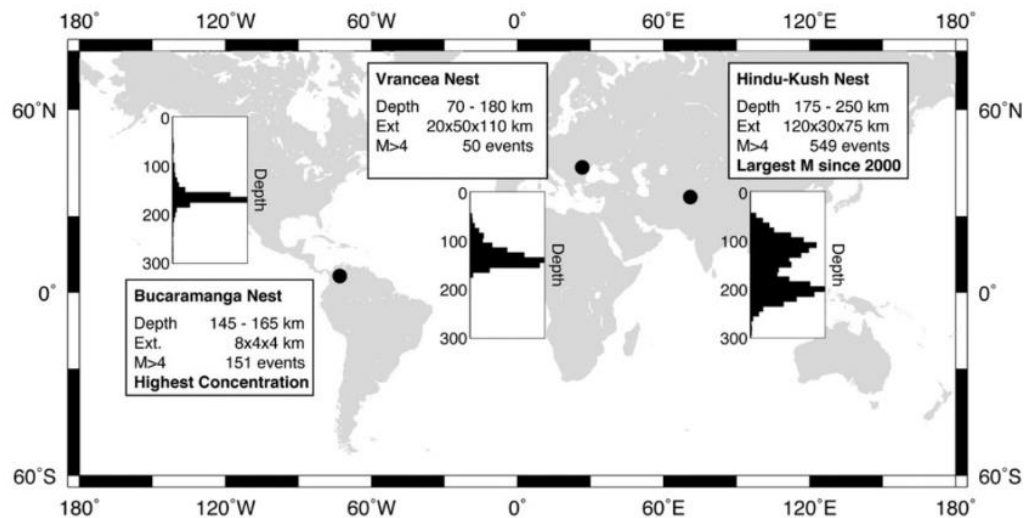
El nido sísmico está comprendido por un área de 20x50 km, alrededor de una profundidad de 70 a 180 km. Significativos eventos sísmicos han sido reportados en los alrededores del nido sísmico, con magnitudes altas comprendidas encima de los 7 grados MW. En algunos casos con efectos destructivos con víctimas fatales. [10]

3.1.2.2 Nido Sísmico Hindu Kush, Afganistán.

El nido sísmico está asociado con la colisión de las placas tectónicas (india y Eurasiático). Es el nido sísmico más activo de los tres principales del mundo, comprendido por área aproximada de 30 km² y con profundidad de alrededor de 215 km. Múltiples eventos sísmicos se presentan en el nido sísmico con magnitudes extremadamente altas. En los últimos 100 años se han presentado 15 terremotos con efectos devastadores y múltiples víctimas fatales. [10]

La figura 6 describe los tres nidos sísmicos de profundidad intermedia más importantes del mundo, las características de cada nido sísmico como su extensión, rango de profundidades en los que se presenta la concentración de actividad sísmica y las magnitudes de los eventos sísmicos que frecuentemente ocurren. [10]

FIGURA 6. MAPA DE LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCION DE LOS NIDOS SISMICOS MAS IMPORTANTES DEL MUNDO

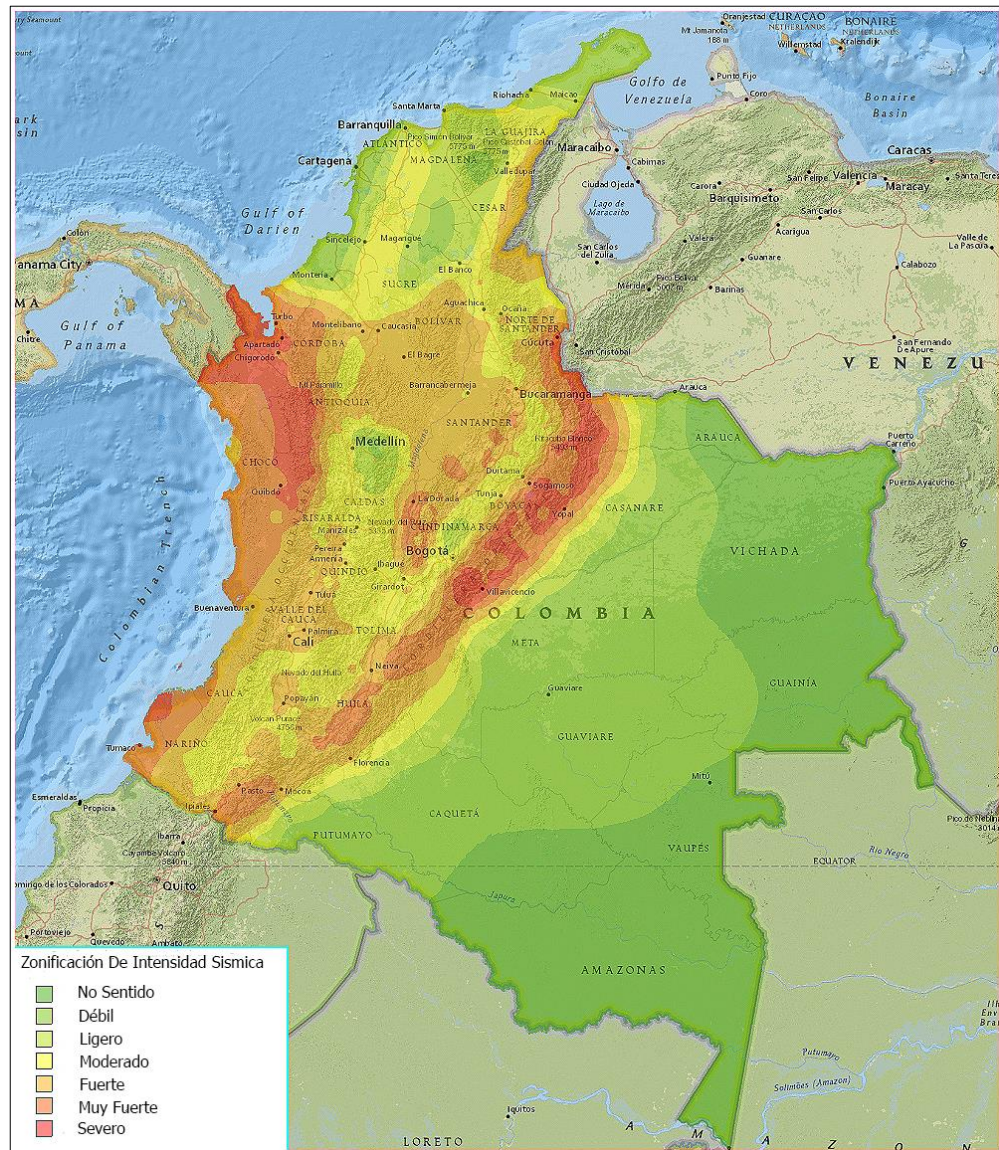


Fuente: Tomado de [10]

3.2. SISMICIDAD EN COLOMBIA

Colombia es un país con alta actividad sísmica, los eventos sísmicos están relacionados con la actividad en la zona de subducción del pacífico colombiano y en las fallas geológicas, ya que el país se ubica sobre dos áreas de subducción relevantes, la placa de Nazca con la placa Sudamericana y la placa Sudamericana con la placa del Caribe. [12]

FIGURA 7. MAPA DE ZONIFICACIÓN DE LA ACTIVIDAD SISMICA EN COLOMBIA 2016



Fuente: Tomado de [12]

En la Figura 7 se puede observar la zonificación de la actividad sísmica en Colombia, presentando las zonas más activas sísmicamente en la región andina y la región pacífica del país.

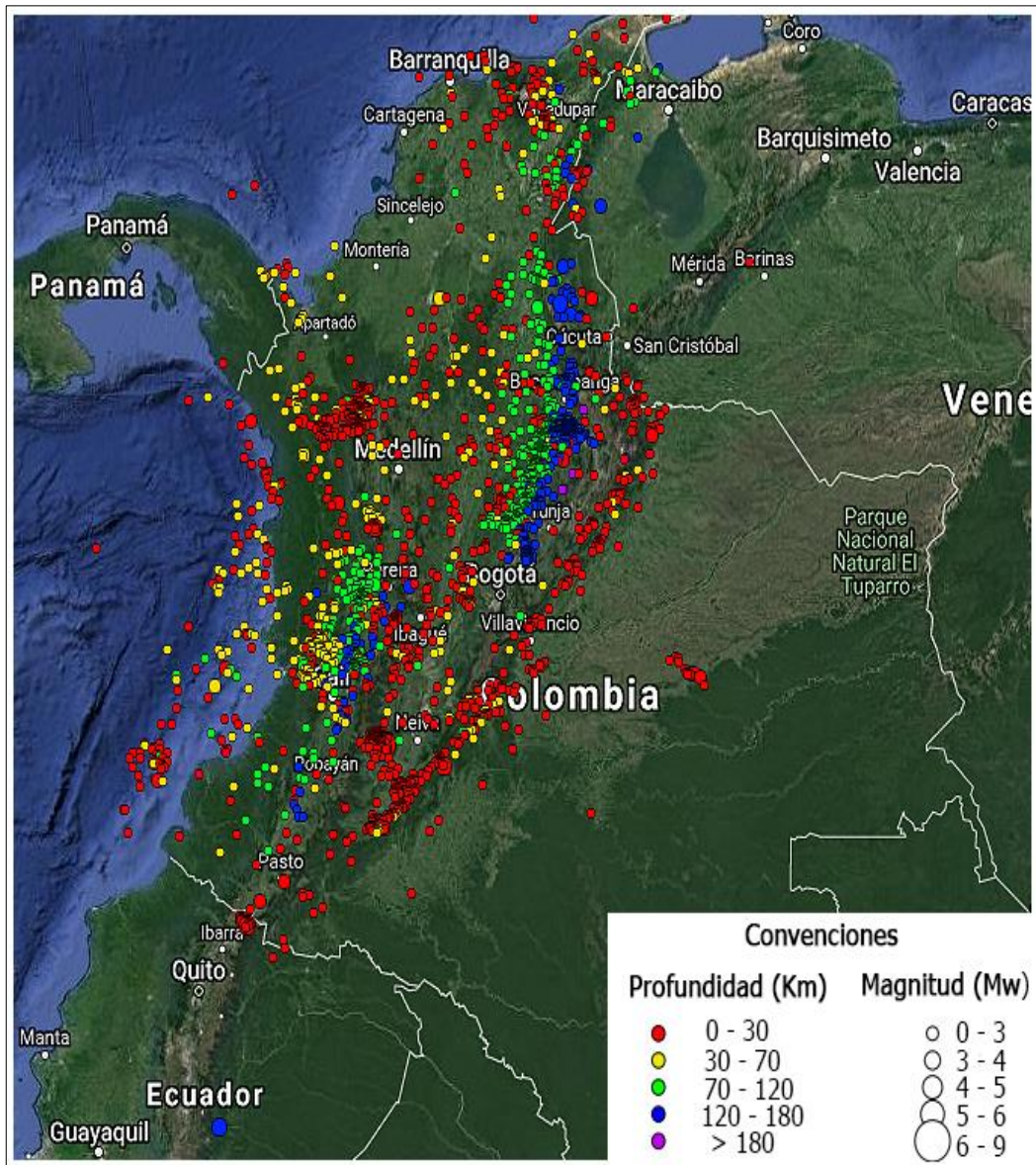
El servicio geológico de Colombia es una institución técnica y científica adscrita al ministerio de minas y energía, tiene como propósito científico e investigativo el estudio de los recursos naturales y el monitoreo de amenazas de origen geológico, asimismo el control nuclear y radioactivo del país.

El servicio geológico colombiano ha llevado el registro de la actividad sísmica del país durante años, actualmente gracias a una red de 120 acelerógrafos ubicados en puntos específicos del país.

Sus registros muestran que desde mitad del año 1993 hasta el inicio del año 2019 han ocurrido 200.000 eventos sísmicos, con un promedio de 12.000 eventos sísmicos por año.

El año 2019 es uno de los años en donde se está viendo reflejada esa alta actividad sísmica en el país, ya que durante los meses de enero y febrero se presentaron alrededor de 4.500 eventos sísmicos registrados por el servicio geológico de Colombia, en la figura 8 se observa la distribución de los eventos sísmicos a inicios del año 2019. [12]

FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN EVENTOS SISMICOS EN COLOMBIA A INICIOS DEL AÑO 2019



Fuente: Tomado de [12]

3.2.1 Eventos sísmicos históricos en Colombia.

El servicio geológico colombiano en conjunto con diferentes fuentes de investigación ha recopilado información acerca de los eventos sísmicos más representativos que han causado daños severos en diferentes regiones del país.

Desde el siglo XVI se ha reunido y conservado información de sismos históricos, en la Tabla 2 se encuentra una lista algunos de los eventos sísmicos más intensos y con magnitudes altas que han causado efectos desastrosos en Colombia, se puede considerar la fecha, la hora del evento sísmico y el área epicentral en la cual ocurrieron. [12]

TABLA 2. SISMICIDAD HISTORICA DE COLOMBIA

N°	Fecha	Hora local	Magnitud (MW)	Profundidad (km)	Intensidad máxima (EMS-98)	Area Epicentral
1	ENERO 16 1644	5:00	6.5	15	9	Pamplona, Norte de Santander
2	ABRIL 03 1646	2:00	6	15	8	Muzo, Boyacá
3	JULIO 09 1766	16:00	6.5	15	8	Buga, Valle del Cauca
4	JULIO 12 1785	7:45	7.1	10	7	Suroriente de Cundinamarca, Cundinamarca
5	JUNIO 16 1805	3:15	6.1	15	9	Honda, Tolima
6	NOVIEMBRE 16 1827	18:00	7.1	15	10	Altamira, Huila
7	ENERO 20 1834	7:00	6.7	15	9	Santiago, Putumayo
8	MAYO 22 1834	3:00	6.4	10	8	Santa Marta, Magdalena
9	MAYO 18 1875	11:15	6.8	15	10	Cúcuta, Norte de Santander
10	SEPTIEMBRE 07 1882	3:20	6.5	15	9	Colón, Colón-Panamá
11	ENERO 31 1906	10:36	8.8	20	10	Costa Pacífica, Pacífico
12	ABRIL 10 1911	13:42	7.2	120	7	Yarumal, Antioquia
13	FEBRERO 04 1938	21:23	7	150	8	Eje Cafetero, Colombia
14	ABRIL 21 1951	16:12	6.6	120	7	Málaga, Santander
15	FEBRERO 09 1967	10:24	7	36	10	Colombia, Huila
16	JULIO 29 1967	5:24	6.8	161	8	Betulia, Santander
17	SEPTIEMBRE 26 1970	7:02	6.6	15	8	Bahía Solano, Chocó
18	JULIO 12 1974	20:18	7.1	10	8	Costa Pacífica, Pacífico
19	ABRIL 09 1976	2:09	6.6	17.4	8	Esmeraldas, Esmeraldas-Ecuador
20	JULIO 11 1976	15:41	7.3	17.5	8	Darién, Darién-Panamá
21	NOVIEMBRE 23 1979	18:40	7.2	110	8	Eje Cafetero, Colombia
22	DICIEMBRE 12 1979	2:59	8.1	23.6	10	Costa Pacífica, Pacífico
23	OCTUBRE 17 1981	23:35	5.9	30	8	Cúcuta, Norte de Santander
24	MARZO 31 1983	8:12	5.6	15	9	Popayán, Cauca
25	NOVIEMBRE 22 1983	9:21	6.7	25	5	Costa Pacífica, Pacífico
26	OCTUBRE 18 1992	11:12	7.1	10	10	Murindó, Antioquia
27	JUNIO 06 1994	15:47	6.8	10	8	Páez (Belalcázar), Cauca
28	ENERO 19 1995	10:05	6.5	17	8	Tauramena, Casanare
29	FEBRERO 08 1995	13:40	6.4	71	8	Calima (Darién), Valle del Cauca
30	ENERO 25 1999	13:19	6.1	15	9	Armenia, Quindío
31	NOVIEMBRE 15 2004	4:06	7.2	15	8	Bajo Baudó (Pizarro), Chocó
32	MAYO 24 2008	14:20	5.9	10	8	Quetame, Cundinamarca
33	FEBRERO 09 2013	9:16	7	162	7	Guaitarilla, Nariño
34	OCTUBRE 20 2014	14:33	5.8	10	6	Chiles, Cumbal-Nariño
35	MARZO 10 2015	15:55	6.3	157.7	7	Los Santos, Santander
36	OCTUBRE 30 2016	19:20	5.2	13.2	6	Colombia, Huila

Fuente: Tomado de [12]

3.2.2 Descripción de Eventos sísmicos representativos e históricos en Colombia.

De los muchos eventos sísmicos que se ve afectado Colombia, hay una serie de eventos que nunca serán olvidados por las diferentes poblaciones del país, ya que han terminado de manera destructiva y han ocasionado daño a las comunidades de diferentes localidades. En la tabla 3 se encuentran 3 eventos sísmicos, con sus respectivas características que ocurrieron en Colombia, asimismo una descripción de los daños que ocasionaron y el alcance que tuvieron.

TABLA 3. EVENTOS SISMICOS REPRESENTATIVOS EN COLOMBIA.

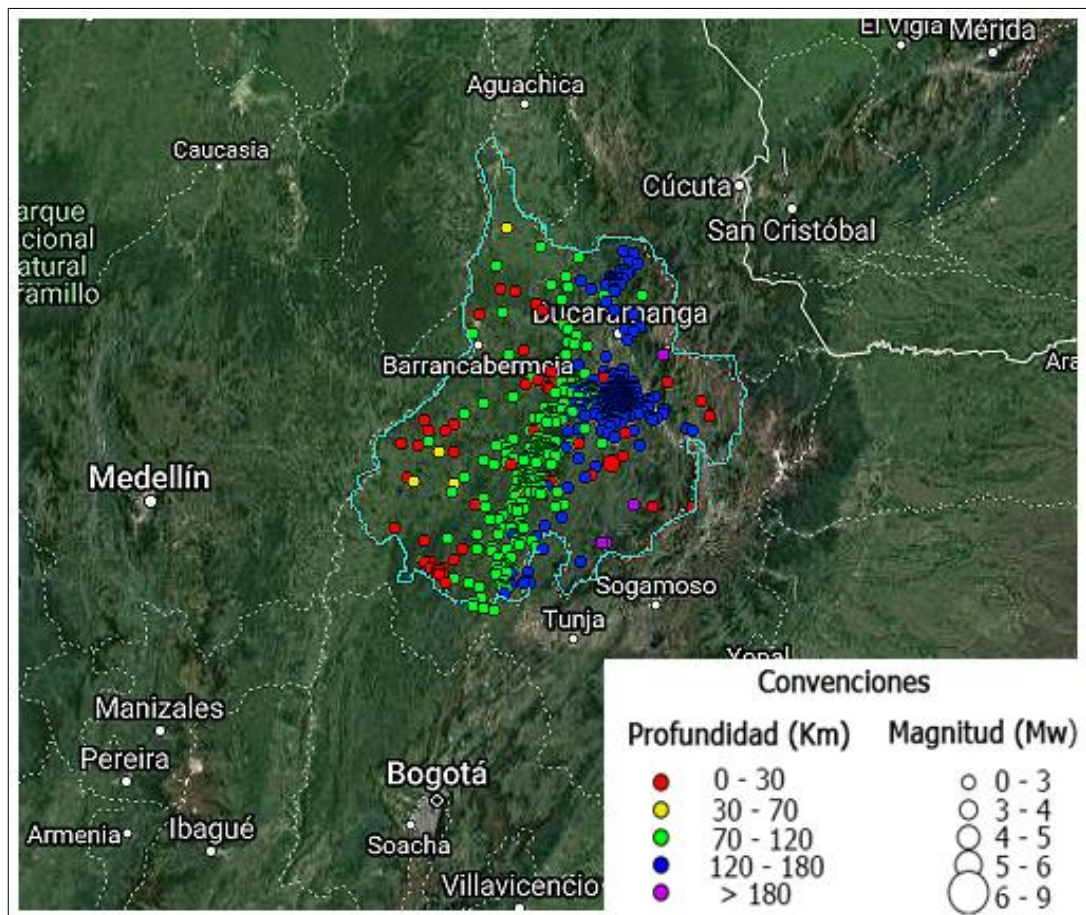
N°	Fecha	Magnitud (MW)	Area Epicentral	Descripción
1	MAYO 18 1875	6.8	Cúcuta, Norte de Santander	El 18 de mayo de 1875 a las 11:15 am, un terremoto destruyó la ciudad de Cúcuta y afectó municipios de su área metropolitana. Este violento terremoto destruyó casi en su totalidad a Cúcuta y Villa del Rosario en Colombia y poblaciones limítrofes de Venezuela como San Antonio y Ureña. Igualmente, hubo daños considerables en Pamplona, Cucutilla, Chinacota, Matanza y en otras poblaciones del Estado de Táchira como San Cristóbal, Colón, Palmira y Tariba. El "Boletín Oficial" del 8 de julio de 1875, reporta un total de 461 personas muertas en Cúcuta
2	MARZO 31 1983	5.6	Popayán, Cauca	Este evento sismo ocurrió el jueves de la Semana Santa de 1983 a las 8:15 am, afectó al departamento del Cauca, principalmente las poblaciones de Cajete, Cajibío, Julumito, Popayán y Timbío. Las cifras aproximadas sobre lo ocurrido en el departamento del Cauca fueron: 250 muertos y 1.500 heridos, 4.964 construcciones destruidas y 13.796 viviendas con daños muy graves. Se reportaron réplicas sentidas hasta finales del mes de abril de ese año. Se generaron deslizamientos y grietas en el terreno.
3	ENERO 25 1999	6.1	Armenia, Quindío	El 25 de enero de 1999, a la 1:19 p.m., se vivió una de sus peores tragedias en Colombia. Sobrevivientes recogieron sus pasos, La ciudad de Armenia; capital del Departamento del Quindío donde residían cerca de 300.000 habitantes sufrió las mayores pérdidas por causa de este sismo: 921 muertos, 2.300 heridos, más de 30.000 viviendas afectadas, cerca del 75% de las escuelas y colegios con daños y más de un millón de metros cúbicos de escombros

Fuente: Tomado de [12], [13], [14] y [15]

3.3. SISMICIDAD EN SANTANDER, COLOMBIA

Según el servicio geológico de Colombia, aproximadamente el 60% de los eventos sísmicos en Colombia ocurren en el departamento de Santander, esto debido en gran parte a que en un municipio (Los Santos) cercano a la capital Bucaramanga se encuentra el segundo nido sísmico más activo del mundo. En la figura 9 se muestra la distribución de los eventos sísmicos al inicio del año 2019 en Santander. [12]

FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DE LOS EVENTOS SISMICOS EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA A INICIOS DEL AÑO 2019.



Fuente: Tomado de [12]

3.3.1 Sismicidad Histórica en Santander, Colombia

El registro de los eventos sísmicos más representativos que han causado mayor afectación en las diferentes ciudades del departamento de Santander, Colombia es una labor que ha llevado a lo largo de los años el servicio Geológico Colombiano (SGC), La tabla 4 muestra una serie de eventos sísmicos ocurridos en Santander entre los de mayor magnitud e intensidad.

TABLA 4. SISMICIDAD HISTORICA DE SANTANDER, COLOMBIA

Fecha	Hora local	Magnitud (MW)	Profundidad (km)	Intensidad máxima (EMS-98)	Area Epicentral
MAYO 18 1875	11:15	6.8	15	10	Bucaramanga, Santander
AGOSTO 31 1917	6:36	6.7	15	9	Bucaramanga, Santander
DICIEMBRE 22 1923	4:56	5.9	15	8	Socorro, Santander
NOVIEMBRE 01 1928	11:08	5.9	15	8	Bucaramanga, Santander
FEBRERO 04 1938	21:23	7	150	9	Bucaramanga, Santander
DICIEMBRE 26 1942	7:30	6.2	15	10	Bucaramanga, Santander
ABRIL 21 1957	16:12	6.6	120	8	Barrancabermeja, Santander
JUNIO 16 1961	5:33	6.5	114	8	Bucaramanga, Santander
JULIO 30 1962	15:18	6.5	64	9	Barrancabermeja, Santander
FEBRERO 09 1967	10:24	7	36	10	Socorro, Santander
JULIO 29 1967	5:24	6.8	161	9	Los Santos, Santander
AGOSTO 30 1973	13:25	6.3	180	9	Bucaramanga, Santander
ABRIL 17 1974	20:19	4.8	25	9	Cepitá, Santander
AGOSTO 30 1977	19:42	6.5	23.3	8	Barrancabermeja, Santander
NOVIEMBRE 23 1979	18:40	7.2	110	9	Barrancabermeja, Santander
NOVIEMBRE 23 1979	18:40	7.2	110	9	Bucaramanga, Santander
OCTUBRE 18 1992	11:12	7.1	10	10	Málaga, Santander
OCTUBRE 18 1992	11:12	7.1	10	10	Oiba, Santander
ENERO 19 1995	10:05	6.5	17	9	Bucaramanga, Santander
ENERO 19 1995	10:05	6.5	17	9	Palmas del Socorro, Santander
ENERO 19 1995	10:05	6.5	17	9	San Joaquín, Santander
ENERO 19 1995	10:05	6.5	17	9	Socorro, Santander
FEBREO 08 1995	13:40	6.4	71	8	Bucaramanga, Santander
MAYO 24 2008	14:20	5.9	10	9	Bucaramanga, Santander
MARZO 10 2015	15:55	6.3	157.7	8	Bucaramanga, Santander
MARZO 10 2015	15:55	6.3	157.7	8	Los Santos, Santander

Fuente: Tomado de [12]

3.3.1.1 Evento Sísmico (marzo 10 2015) Los Santos, Santander, Colombia

De acuerdo con el reporte del Servicio Geológico, el día 10 de marzo de 2015, a las 3:55 p.m. de la tarde se presentó un sismo de magnitud 6.6, con epicentro a 7.4 kilómetros al noreste de la cabecera municipal de Los Santos, Santander. [16]

El departamento más afectado por el evento sísmico fue Santander, donde 1.863 viviendas de siete municipios resultaron averiadas, de las cuales 1.372 presentaron daños menores, 310 fueron consideradas no habitables y 181 colapsaron, en tanto que en otras 22 localidades del departamento sólo se reportaron afectaciones menores. En la figura 10 se puede observar la destrucción de algunas viviendas de los municipios cercanos a los santos. Debido a la severidad de los daños, las autoridades declararon la calamidad pública en Betulia, El Playón, Matanza, Onzaga, Rionegro y Suratá, en Santander, y Cáchira, en Norte de Santander. [17]

FIGURA 10. IMÁGENES DE LA DESTRUCCIÓN DE MUNICIPIOS CERCANOS A LOS SANTOS, SANTANDER OCASIONADA POR EL SISMO DE MARZO 10 DE 2015



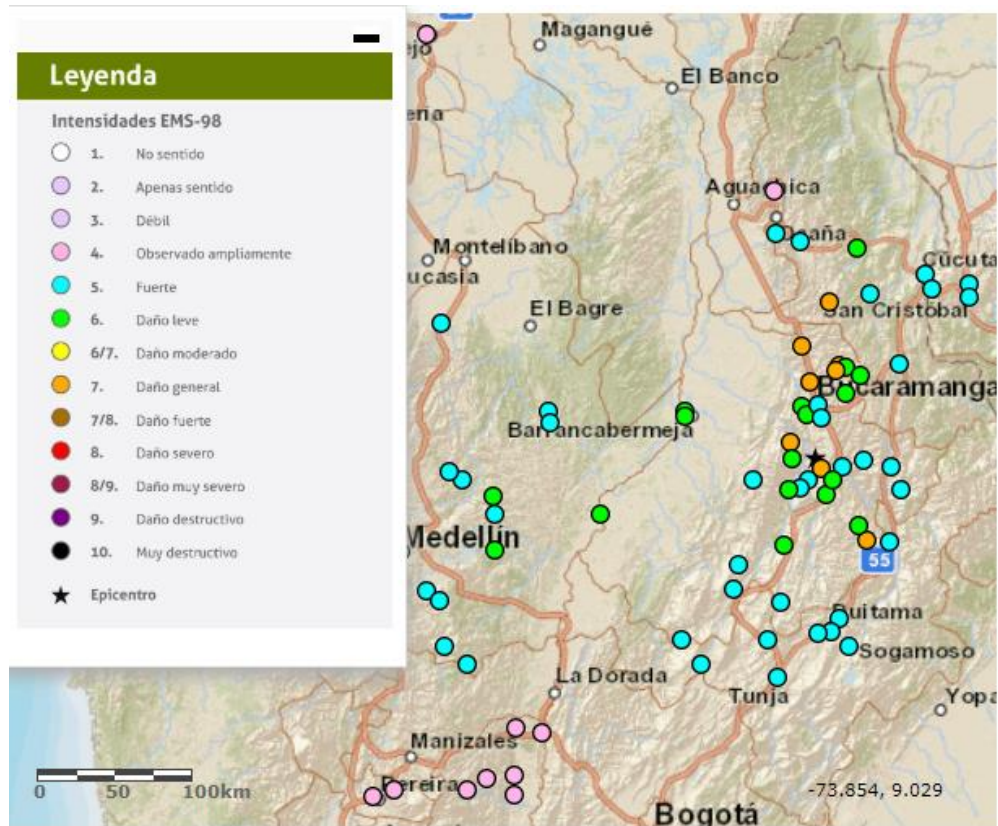
Fuente: tomado de [12]

La evaluación de intensidades del sismo se realizó utilizando la información recopilada en campo (ver figura 11), así como reportes de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres -UNGRD- y prensa, resultando un total de 97 sitios intensidad

estimada. [12]

Debido a la profundidad del sismo, fue sentido en una amplia zona del país, en ciudades como Santa Marta, Cali, Medellín, Bogotá, Villavicencio, Cúcuta, Bucaramanga, entre otras y en algunas poblaciones venezolanas. Se reportaron daños en municipios de Santander, Norte de Santander, Antioquia, Cundinamarca y Boyacá. [12]

FIGURA 11. MAPA DE INTENSIDADES SISMO DE MARZO 10 DE 2015



Fuente: Tomado de [12]

3.3.2 Nido Sísmico En Bucaramanga, Santander

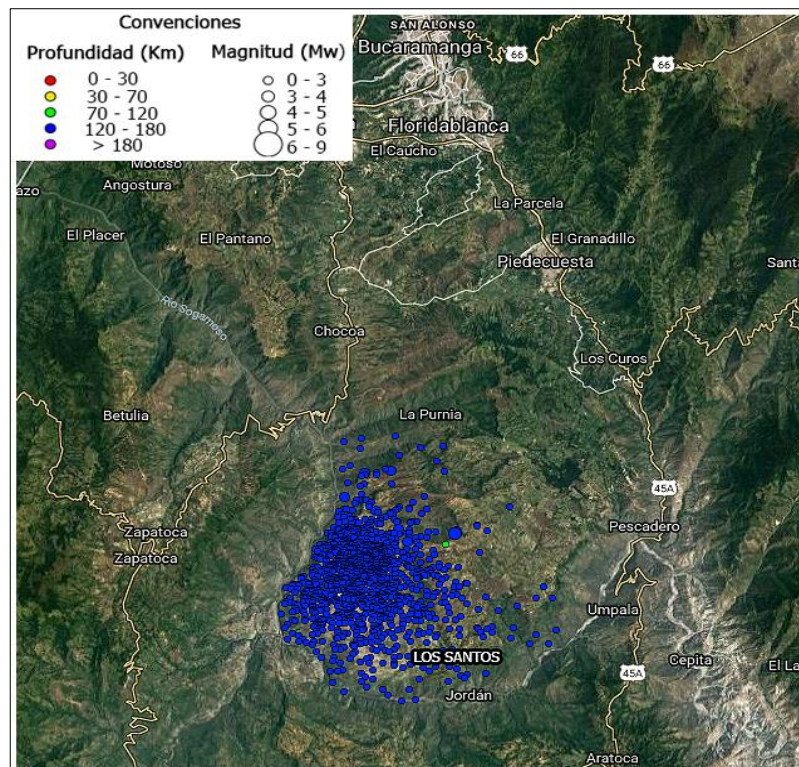
El nido sísmico presenta una única concentración de actividad sísmica en profundidades de alrededor de 160km. Numerosos eventos sísmicos se presentan en el nido sísmico, se estima que aproximadamente un evento sísmico de magnitud por encima de 4 grados MW se presenta por mes en los alrededores del nido sísmico de Bucaramanga, Colombia y comparando la actividad sísmica del nido de Bucaramanga con los demás nidos sísmicos,

este nido tiene una mayor concentración de actividad sísmica en profundidades intermedias en relación a su pequeña área. [10]

La ubicación del nido se observa en el cambio de dirección de la cordillera oriental a través de los Sistemas de Fallas principales de la región (Santa Marta – Bucaramanga, Suárez, Boyacá – Belén, Gachetá – Chicamocha, Carmen, San Vicente, Salinas). [12] En la figura 12 también podemos observar la tendencia de los eventos sísmicos gráficamente debido a la aglomeración de los puntos en una zona específica, en este caso se refiere al nido sísmico de Bucaramanga.

Aproximadamente el 65% de los eventos sísmico ocurridos en el departamento de Santander tienen presencia en el municipio de los santos (Nido Sísmico de Bucaramanga), en la figura 12 nos muestra más detalladamente el patrón de los eventos sísmicos ocurridos en el municipio de los santos a inicios del año 2019 entre los meses de enero y febrero.

FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN DE LOS EVENTOS SISMICOS EN EL NIDO SISMICO DE BUCARAMANGA (MUNICIPIO DE LOS SANTOS, SANTANDER, COLOMBIA)



Fuente: Tomado de [12]

3.4 ONDAS SISMICAS

Al ocurrir un evento sísmico se libera energía, se generan ondas que se propagan a través de la tierra inicialmente desde su interior, deformando el terreno a su paso hasta la superficie de la tierra.

Las ondas sísmicas se encuentran dentro de la categoría de ondas elásticas, que son aquellas perturbaciones tensionales que se propagan a lo largo de un medio.[18]

Hablando un poco de la clasificación de las ondas sísmicas, precisando su medio de propagación se puede encontrar dos tipos de ondas, las ondas internas y las ondas superficiales, estas que a su vez tienen una clasificación de acuerdo a su comportamiento y a su forma de propagación.

3.4.1 Ondas sísmicas internas

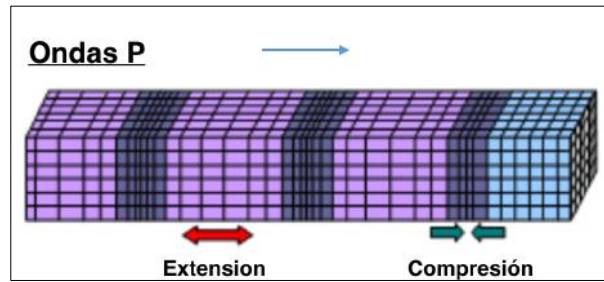
Las ondas sísmicas internas son aquellas que se originan desde el momento en que ocurre el evento sísmico como una forma de liberación de energía, desde el interior de la tierra llegando hasta la superficie. Acondicionadas por su recorrido de propagación, se clasifican en ondas P y Ondas S.

3.4.1.1 Ondas P

Las ondas P son ondas longitudinales que se propagan produciendo oscilaciones del material con el que se encuentran en el mismo sentido en el cual se propagan, produciendo así compresiones y dilataciones (Ver Figura 13).

Estas ondas son las más veloces de todas las ondas que se generan en el evento sísmico, Su velocidad de propagación es de aproximadamente unos 7,5 kilómetros por segundo variando según el material en el que se propagan, por lo tanto, son las ondas que primero llegan a la superficie y las primeras en ser registradas en las redes de sismógrafos. [19]

FIGURA 13. REPRESENTACIÓN DE LOS EFECTOS MECÁNICOS ONDAS P.



Fuente: Tomado de [20]

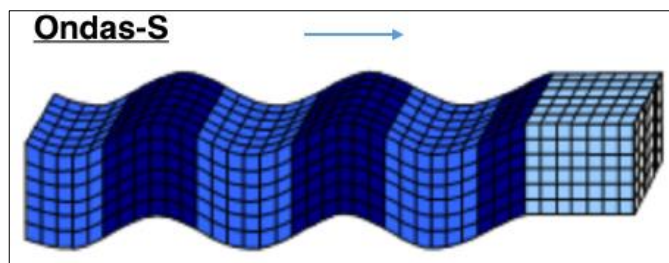
3.4.1.2 Ondas S

Las ondas S son ondas transversales que se propagan produciendo movimientos perpendiculares a la dirección en que se propagan, a través del material en que se transmiten (Ver figura 14), están asociadas con deformaciones del terreno de tipo cortante. [18]

Estas ondas son las segundas más veloces de todas las ondas que se originan en un evento sísmico, alcanzando velocidades de propagación de 4,2 kilómetros por segundo, también dependen del material en el que se propagan, ya que estas ondas no se propagan a través de líquidos al no poder soportar los esfuerzos cortantes que estas generan. [19]

Las ondas s frecuentemente tienen más amplitud que las ondas p, por lo tanto, son sentidas con más fuerza. [19]

FIGURA 14. REPRESENTACIÓN DE LOS EFECTOS MECÁNICOS ONDAS S.



Fuente: Tomado de [20]

3.4.2 Ondas sísmicas superficiales

Las ondas sísmicas superficiales son aquellas que se propagan a lo largo de la superficie ya que la energía de estas ondas se concentra en la superficie teniendo allí su amplitud máxima y disminuyendo a medida de la profundidad. [21]

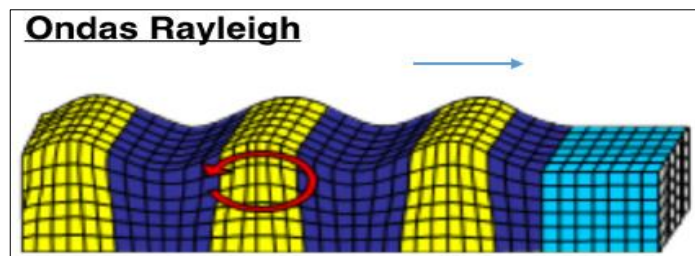
Gracias a la contribución de los físicos Lord Rayleigh y Augustus Love en el estudio de la propagación de las ondas, las ondas superficiales se clasifican en honor a su nombre Ondas Rayleigh Y Ondas Love, estas ondas superficiales son generadas por la interacción de las ondas internas (Ondas P y Ondas S). [21]

3.4.2.1 Ondas Rayleigh

Las ondas Rayleigh son ondas internas caracterizadas por la baja frecuencia y energía fuerte, surgen de la interacción de las ondas p y las ondas s, son ondas de velocidades bajas aproximadamente de 1,4 kilómetros por hora. [19]

La amplitud de las ondas Rayleigh disminuye con la profundidad. Al igual que las ondas P, las ondas de Rayleigh son alternativamente compresivas y extensivas causando cambios en el volumen del suelo a través del cual pasan (Ver figura 15). [22]

FIGURA 15. REPRESENTACIÓN DE LOS EFECTOS MECÁNICOS ONDAS RAYLEIGH.



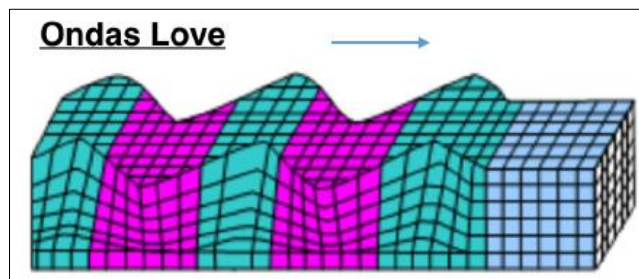
Fuente: Tomado de [20]

3.4.2.2 Ondas Love

Las ondas Love tienen un comportamiento muy similar al de las ondas Rayleigh, pero estas ondas surgen solamente de la interferencia de las ondas S en su componente horizontal por lo tanto el desplazamiento del medio debido a la onda es completamente perpendicular a la dirección de propagación y no tiene componentes verticales ni longitudinales. (Ver Figura 16). Estas ondas tienen velocidades de 1 a 4.5 kilómetros por segundo, son más veloces que las ondas Rayleigh [19].

La energía de las ondas Love es fuerte, por lo que estas ondas producen un gran registro en estaciones sísmicas incluso cuando se originan en eventos sísmicos distantes. [22]

FIGURA 16. REPRESENTACIÓN DE LOS EFECTOS MECÁNICOS ONDAS LOVE.



Fuente: Tomado de [20]

3.5 MEDICION DE LOS EVENTOS SISMICOS

Los eventos sísmicos tienen dos parámetros de medición que determinan su dimensión relacionando escalas numéricas que posicionan el efecto que causan, estos dos parámetros son la magnitud y la intensidad, que expresan de manera diferentes las propiedades del evento sísmico.

3.5.1 Escala De Magnitud Local (ML) (Richter)

Las escalas de magnitud consisten en asociar la magnitud del evento sísmico con la "amplitud" de la onda sísmica, en propagación del movimiento en un área determinada, esta escala representa la energía sísmica liberada en cada evento sísmico basándose en el registro de los sismógrafos. La asignación numérica de la escala cuantifica la energía liberada del evento sísmico en forma logarítmica.

La escala más conocida es la escala de magnitud de Richter (1935) definida por Charles Richter y es utilizada para medir la magnitud de los eventos sísmicos (ver tabla 5) poco profundos, en profundidades menores de 600km, también es llamada Magnitud Local(ml). [23]

3.5.2 Escala De magnitud De momento (MW)

La magnitud Richter tiene la desventaja de saturarse, para eventos sísmicos muy grandes, el valor de la magnitud ya no permite determinar correctamente las propiedades del evento sísmico. [24]

La escala de magnitud momento (1977) fue definida por Kanamori como sucesión de la escala de Richter, permite determinar eficazmente el tamaño de los sismos, sean de amplitudes grandes o pequeñas, ya que los eventos sísmicos superiores a los 6,9 grados deben medirse con la escala de magnitud de momento (MW) y no con la escala de magnitud local (ML) para efectos de evitar la saturación de los datos. [25]

TABLA 5. GRADOS DE LA ESCALA DE MAGNITUD RICHTER ML Y MW

MAGNITUD	EFFECTOS DEL TERREMOTO
Menor a 3.5	Es registrado, pero no se siente.
3.5 - 5.4	A menudo se puede sentir, pero no causa daños mayores.
5.5 - 6.0	Ocasiona daños ligeros a las construcciones.
6.1 - 6.9	Puede ocasionar daños severos en áreas muy pobladas.
7.0 a 7.9	Terremoto. Causa daños graves.
Mayor a 8	Gran terremoto. Destrucción total.

Fuente: Tomado de [26]

3.5.3 Escala de Intensidad de Mercalli

La escala de intensidad se centra en relacionar la violencia de un evento sísmico en relación a los efectos que ocasiona en el suelo, construcciones u objetos cercanos al evento sísmico, asimismo clasifica el impacto que efectúa en la comunidad. [27]

Para correlacionar los efectos destructivos del evento sísmico, con los datos instrumentales a fin de establecer una medida adecuada de la intensidad [28], en 1902 fue definida la escala de intensidad por Giuseppe Mercalli mediante la percepción cualitativa de los efectos que ocasionan los diferentes eventos sísmicos. En 1931 la escala se modificó por Wood y Neumann, actualmente se conoce como escala modificada de Mercalli (ver tabla 6). [27]

TABLA 6. ESCALA DE INTENSIDAD DE MERCALLI.

INTENSIDAD	DESCRIPCION
I. Muy débil	Imperceptible para la mayoría excepto en condiciones favorables.
II. Débil	Perceptible sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios. Los objetos colgantes suelen oscilar
III. Leve	Perceptible solo por algunas personas dentro de los edificios, especialmente en pisos altos. Muchos no lo perciben como un terremoto. Los automóviles detenidos se mueven ligeramente. Sensación semejante al paso de un camión pequeño.
IV. Moderado	Perceptible por la mayoría de las personas dentro de los edificios, por pocas personas en el exterior durante el día. Durante la noche algunas personas pueden despertarse. Perturbación en cerámica, puertas y ventanas. Las paredes suelen hacer ruido. Los automóviles detenidos se mueven con más energía. Sensación semejante al paso de un camión grande.
V. Poco Fuerte	Sacudida sentida casi por todo el país o zona y algunas piezas de vajilla o cristales de ventanas se rompen; pocos casis de agrietamiento de aplanados; caen objetos inestables. Se observan perturbaciones en los árboles, postes y otros objetos altos. Se detienen los relojes de péndulo.
VI. Fuerte	Sacudida sentida casi por todo el país o zona. Algunos muebles pesados cambian de sitio y provoca daños leves, en especial en viviendas de material ligero.
VII. Muy Fuerte	Ponerse de pie es difícil. Muebles dañados. Daños insignificantes en estructuras de buen diseño y consttrucción. Daños leves a moderados en estructuras ordinarias bien construidas. Daños considerables en estructuras pobremente construidas. Mampostería dañada. perceptible por personas en vehículos en movimiento.
VIII. Destructivo	Daños leves en estructuras especializadas. Daños considerables en estructuras ordinarias bien construidas, posibles derrumbes. Daño severo en estructuras pobremente construidas. Mampostería seriamente dañada o destruida. Muebles completamente sacados de lugar.
IX. Muy destructivo	Pánico generalizado. Daños considerables en estructuras especializadas, paredes fuera de plomo. Grandes daños en importantes edificios, con derrumbes parciales. Edificios desplazados fuera de las bases.
X. Desastroso	algunas estructuras de madera bien construidas quedan destruidas. La mayoría de las estructuras de mampostería y el marco destruido con sus bases. Vías ferroviarias dobladas.
XI. Muy Desastroso	Pocas estructuras de mampostería, si las hubiera, permanecen en pie. Puentes destruidos. Vías férreas curvadas en gran medida.
XII. Catastrófico	Destrucción total con pocos supervivientes. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados. Imposibilidad de mantenerse en pie.

Fuente: Tomado de [28]

3.5.4 Escala Macro sísmica de Intensidad EMS-98

La escala macrosísmica europea ems-98 es una versión mejorada de las escalas de intensidad; es importante mencionar que el uso de métodos informáticos en la evaluación de datos sísmicos ha dirigido a una mejor definición de la escala de intensidad de los eventos sísmicos. [30]

Esta escala (ver tabla 7) se basa en los efectos destructivos que pueden ocasionar eventos sísmicos de diferentes magnitudes, como efectos en las personas, Efectos en objetos o en la naturaleza, los efectos y fallos en el suelo, los daños a edificios y construcciones.

La EMS-98 es la base para la determinación de la intensidad sísmica en los países europeos y, además, en se presenta el uso de esta escala en la mayoría de los otros continentes. [30]

TABLA 7. ESCALA MACROSISMICA EUROPEA (EMS-98)

GRADO	DESCRIPCIÓN
I. No sentido	No se siente, ni en las circunstancias más favorables.
II. Apenas sentido	La vibración se percibe solo por algunas personas (1%) especialmente personas en reposo en los pisos superiores de los edificios.
III. Débil	La vibración es débil y se percibe en interiores sólo por unas pocas personas. Las personas en reposo sienten un balanceo o ligero temblor.
IV. Ampliamente observado	El terremoto se percibe en interiores por muchas personas, pero al aire libre por muy pocas. Algunas personas se despiertan. El nivel de vibración no es alarmante. Traqueteo de ventanas, puertas y platos. Los objetos colgados se balancean.
V. Fuerte	El terremoto se percibe en interiores por la mayoría, al aire libre por unos pocos. Muchas personas que dormían se despiertan. Algunos escapan de los edificios, que tiemblan en su totalidad. Los objetos colgados se balancean considerablemente. Los objetos de porcelana y cristal entrechocan. La vibración es fuerte. Los objetos altos se vuelcan. Puertas y ventanas se abren y cierran solas.
VI. Levemente dañino	Sentido por la mayoría en los interiores y por muchos en el exterior. En los edificios muchas personas se asustan y escapan. Los objetos pequeños caen. Daño ligero en los edificios corrientes, por ejemplo, aparecen grietas en el enlucido y caen trozos.
VII. Dañino	La mayoría de las personas se asustan y escapan al exterior. Los muebles se desplazan y los objetos caen de las estanterías en cantidad. Muchos edificios corrientes sufren daños moderados: pequeñas grietas en las paredes, derrumbe parcial de chimeneas.
VIII. Gravemente dañino	Pueden volcarse los muebles. Muchos edificios corrientes sufren daños: las chimeneas se derrumban; aparecen grandes grietas en las paredes y algunos edificios pueden derrumbarse parcialmente.
IX. Destructor	Monumentos y columnas caen o se tuercen. Muchos edificios corrientes se derrumban parcialmente, unos pocos se derrumban completamente.
X. Muy destructor	Muchos edificios corrientes se derrumban.
XI. Devastador	La mayoría de los edificios corrientes se derrumban.
XII. Completamente devastador	Prácticamente todas las estructuras por encima y por debajo del suelo quedan gravemente dañadas o destruidas.

Fuente: Tomado de [31]

3.6 PERIODO FUNDAMENTAL DEL SUELO

Uno de los objetivos más importantes que aborda este proyecto es la determinación de los periodos fundamentales del suelo, conforme a la recolección de los datos en los sitios donde están ubicados los acelerógrafos con la posibilidad de caracterizar dinámicamente el suelo ante los efectos sísmicos locales, se emplea la técnica del cociente espectral (técnica Nakamura H/V) para la determinación de los periodos fundamentales.

3.6.1 Efecto local

En un evento sísmico, se debe tener en cuenta la importancia de los efectos Locales del sitio ya que la gravedad de los daños se ve relacionada con las condiciones geológicas y geotécnicas del lugar.

El conjunto de ondas generadas a partir del evento sísmico puede sufrir determinadas modificaciones en sus características principales, estas modificaciones pueden ser la amplificación de la onda, mayor duración, el incremento de su frecuencia y por ende la disminución del periodo de la onda. [33]

Por lo tanto, tener en conocimiento las características dinámicas del suelo en regiones con actividad sísmica activa es importante para determinar posibles amplificaciones de los eventos sísmicos y, asimismo tener presente las condiciones a la que se verán involucradas las edificaciones en su entorno. [34]

3.6.2 Ruido sísmico (vibraciones ambientales)

La comprensión de las características de las capas superficiales es un elemento de revisión importante en el análisis de los desastres que puede ocasionar un gran evento sísmico.

Conocidos métodos para la estimación de las características dinámicas del suelo requieren cierto costo para su ejecución, asimismo el monitoreo de los eventos sísmicos requiere tiempo debido a que no se sabe en qué momento pueda ocurrir un determinado evento sísmico de gran magnitud.

El método para estimar las características dinámicas de las capas superficiales utilizando las vibraciones ambientales en sitios específicos ha sido exhaustivamente estudiado a lo

largo de años, en cuanto a vibraciones ambientales se refiere a las vibraciones en efecto producidas por fuentes artificiales como lo puede ser el tráfico y el conjunto de industrias, asimismo el producto de las actividades humanas en características de gran frecuencia y el ruido natural ocasionado por la actividad de las plantas, el generado por las mareas, por vientos de gran magnitud, también involucra eventos sísmicos con epicentro a una distancia considerable y eventos sísmicos débiles con una baja frecuencia.[35]

En este proyecto se emplea el método de Cociente espectral H/V o también llamada técnica de Nakamura que utiliza las vibraciones ambientales o ruido sísmico para la estimación de la frecuencia fundamental del suelo.

3.6.3 Método del cociente espectral (h/v) - Técnica de Nakamura

El cociente espectral o la relación de las componentes horizontal y vertical de los espectros de registros en eventos sísmicos ha sido empleada habitualmente en el campo de la sismología, en donde se integra la transformada de Fourier para espectros de frecuencia de los registros en donde se unifica la señal emitida por los acelerógrafos y así se obtiene un solo espectro de frecuencias para su respectivo análisis. [36]

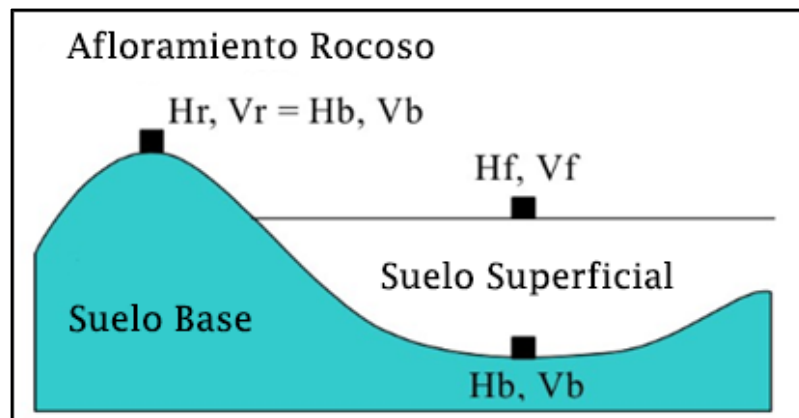
Esta relación fue propuesta primeramente por Nogoshi e Igarashi en 1971 empleando los datos de las mediciones de vibraciones ambientales en la superficie para la estimación de la frecuencia fundamental de un sitio específico. [37]

Entre los años 1989-2000 Nakamura realizó una revisión de este método de la relación espectral (h/v) y presento varias aplicaciones con los resultados de dicha técnica, como lo fue la revisión de la frecuencia fundamental del suelo, la relación que existe entre la profundidad de la capa blanda de la tierra y el cálculo de índice de vulnerabilidad del terreno superficial para la estimación de los daños en caso de un evento sísmico de gran magnitud. [35 y 38].

3.6.3.1 Explicación de la técnica de Nakamura

Nakamura sostiene que las vibraciones ambientales están divididas en dos partes, considerando que estas contienen ondas superficiales de tipo Rayleigh y ondas internas de tipo P Y S. La figura 17 muestra la estructura geológica de una zona sedimentaria, en donde se pueden determinar diversos factores en el comportamiento de las ondas sísmicas respecto a la base rocosa y la capa superficial de la tierra. [38]

FIGURA 17. ESTRUCTURA GEOLÓGICA DE UNA ZONA SEDIMENTARIA.



Fuente: Tomado de [38]

Los espectros del movimiento horizontal (H_f) y vertical (V_f) en la capa superficial de la tierra pueden determinarse a partir de la suma del movimiento debido a las ondas internas que parten desde la base rocosa hasta la superficie, más las ondas superficiales. (Ecuación 1) [38]

$$H_f = A_h * H_b + H_s \quad V_f = A_v * V_b + V_s$$

Ecuación (1)

En donde (Ah) y (Av) son factores de amplificación de los movimientos horizontales y verticales debidos a las ondas internas, (Hb) y (Vb) son los espectros de Fourier horizontal y vertical debido a las ondas internas en la base rocosa de la tierra, (Hs) y (Vs) son los espectros de Fourier del movimiento horizontal y vertical debido a las ondas superficiales (tipo Rayleigh). [38]

Las funciones de transferencia horizontal (Th) y vertical (Tv) entre el movimiento en la superficie y la base rocosa, involucra a los espectros de movimientos debidos a las ondas internas y superficiales. (Ecuación 2) [38].

$$Th = \frac{Hf}{Hb} \quad Tv = \frac{Vf}{Vb}$$

(Ecuación 2)

Considerando que la capa sedimentaria no puede amplificar la componente vertical (Av=1) en rangos de frecuencia donde la componente horizontal es la dominante y si no hay efecto de ondas Rayleigh (Vf ≈ Vb). Por otro lado, si Vf es mayor que Vb se considera los efectos de las ondas Rayleigh.

Para estimar estos efectos la función de transferencia horizontal puede determinarse como el cociente de las trasferencias (Th y Tv). (ecuación 3) [38].

$$Th^* = \frac{Th}{Tv} = \frac{\frac{Hf}{Hb}}{\frac{Vf}{Vb}} = \frac{QTS}{\frac{Hb}{Vb}} = \frac{\left[\frac{Ah + \frac{Hs}{Hb}}{Av + \frac{Vs}{Vb}} \right]}{\frac{Hb}{Vb}} \quad QTS = \frac{Hf}{Vf} = \frac{Ah * Hb + Hs}{Av * Vb + Vs} = \frac{Hb}{Vb} * \frac{\left[\frac{Ah + \frac{Hs}{Hb}}{Av + \frac{Vs}{Vb}} \right]}{\left[\frac{Hb}{Vb} \right]}$$

(Ecuación 3)

Nakamura determinó que el cociente entre (H_b) y (V_b) es aproximadamente 1 para el rango de frecuencias fundamentales del depósito. Y agregó el término QTS que representa el primer orden el espectro de transferencia (Quasi Transfer Septum), demostrando que independientemente del grado de ondas la relación de los espectros en la superficie presenta una concordancia con la frecuencia fundamental del suelo en relación a las vibraciones horizontales. [38]

3.7 ESTUDIOS RELACIONADOS Y APLICACIONES AL METODO DE COCIENTE ESPECTRAL

De acuerdo al análisis de los acontecimientos de eventos sísmicos anteriores y actuales se ha podido demostrar que las condiciones del sitio local afectan el comportamiento de las ondas sísmicas y su potencial para causar eventos sísmicos de característica destructiva.

Por lo tanto, las investigaciones de microzonificación sísmica se han convertido en estudios muy importantes para la estimación de la peligrosidad sísmica que determinados sitios presentan, con ello se proporciona las características locales del suelo que pueden ayudar a evaluar los posibles efectos sísmicos.

3.7.1 Estahban Branch, Estahban, Iran

Una de las aplicaciones a el estudio de la microzonificación sísmica es la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en áreas urbanas donde se encuentran construcciones y demás elementos que hacen parte del entorno urbano.

En Iran en el 2015 se realizó un estudio de la vulnerabilidad sísmica en la ciudad de Shiraz en aplicación del método de cociente espectral o técnica de Nakamura, se presenta como un método para estimar el grado de vulnerabilidad de las estructuras utilizando la relación espectral H/V . [39]

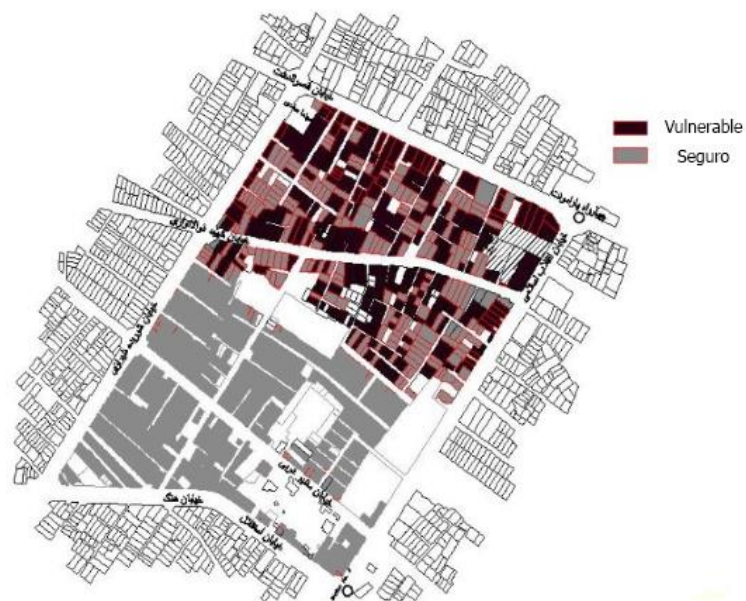
Se seleccionaron 11 estructuras de construcción diferentes, incluyendo mampostería, acero y concreto, se obtuvo la frecuencia fundamental y la amplificación de la relación espectral

H / V para edificios. Además, se calculó la frecuencia de resonancia y el factor de amplificación del suelo. [39]

Con estas aplicaciones se definen los índices de vulnerabilidad de la construcción y del suelo para la obtención del factor de daño de los edificios durante un terremoto. [39]

La Figura 18 ilustra los edificios seguros y vulnerables en el área seleccionada según lo evaluado en la ciudad de Zhiraz utilizando técnicas de relación espectral H / V. Los resultados se pueden repetir para un terremoto de escala Richter 9, como un análisis de riesgo probabilístico, en el caso de áreas urbanas en los estudios de características. [39]

FIGURA 18. MAPA DE ZONAS SEGURAS Y ZONAS VULNERABLES EN AREA SELECCIONADA DE LA CIUDAD DE ZHIRAZ.



Fuente: Tomado de [39]

La relación espectral H / V de los micro temblores se obtiene en poco tiempo y a un bajo costo. Esta relación puede proporcionar información valiosa sobre la frecuencia natural, factor de amplificación y puntos débiles para todo tipo de suelo y estructura. [39]

3.7.2 Varaždin, Norte De Croacia

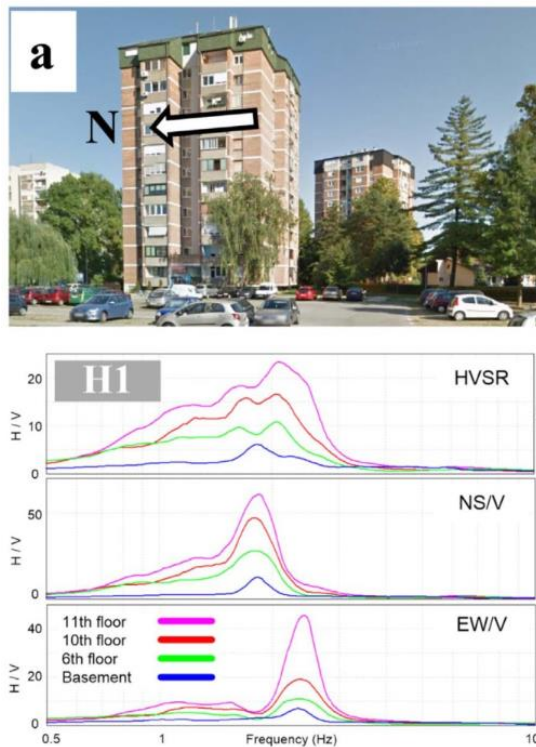
En aplicación a la técnica de Nakamura o método de cociente espectral, en la ciudad de Varaždin, Norte de Croacia en el 2017 se realizó un estudio para el análisis sísmico de los efectos locales y el análisis de resonancia entre el suelo-estructura en sitios específicos de la ciudad. [40]

La ciudad de Varaždin está situada a lo largo de la cuenca del río Drava, los efectos locales debido a los sedimentos blandos aluviales pueden desempeñar un efecto crucial en la amplificación de las ondas sísmicas en este sitio.

Las mediciones de ruido ambiental y el método del cociente espectral para la determinación de la respuesta sísmica del sitio expresada en la frecuencia fundamental del suelo y la amplificación del sitio mostraron variaciones en la frecuencia del suelo de (0,47 Hz-5,19 Hz) y amplificación del sitio de (1,95-4,65). [40]

Para la determinación de los efectos de resonancia entre el suelo-estructura se eligieron diferentes edificios localizados en la ciudad de Varaždin y se les realizó mediciones de micro temores, en la figura 19 se puede observar uno de los edificios que se utilizó para las mediciones y las correspondientes curvas del cociente espectral del suelo y del edificio con las cuales se analiza la frecuencia fundamental de los dos elementos. [40]

FIGURA 19. COMPARACION DE LAS FRECUENCIAS FUNDAMENTALES DEL SUELO Y UN EDIFICIO EN LA CIUDAD DE VARAŽDIN



Fuente: Tomado de [40]

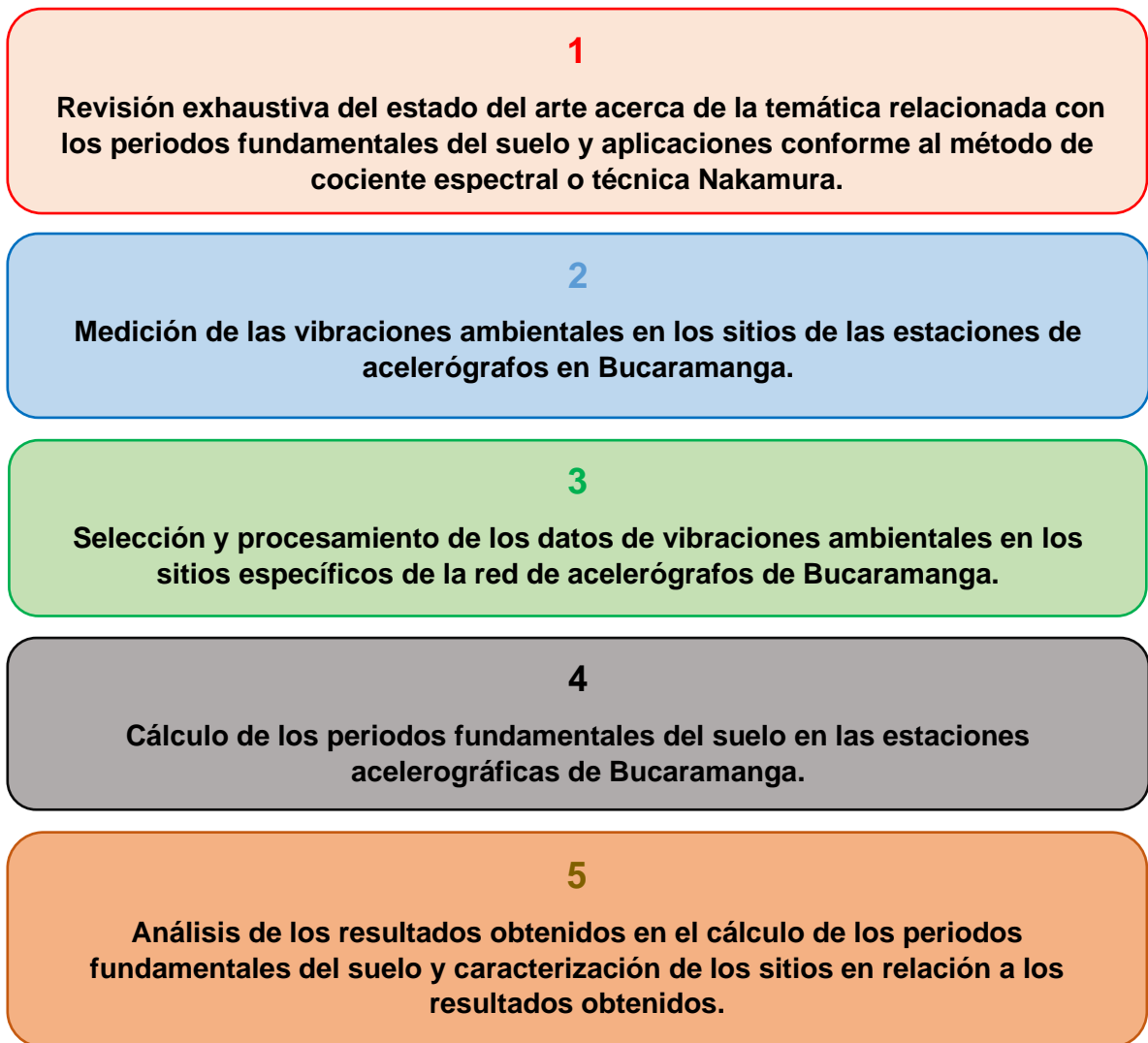
La frecuencia fundamental de los edificios a los que se les realizó las mediciones varió entre 1,78 Hz para los edificios altos hasta 5,67 Hz para los edificios más pequeños. Si la frecuencia del edificio está cercana a la del suelo, el movimiento sísmico crea una posible resonancia. Los edificios más pequeños de máximo 6 pisos mostraron menor potencial de resonancia, mientras que los edificios más altos de máximo 11 pisos mostraron mayor potencial de resonancia, esto debido a que la frecuencia fundamental del suelo para el área de la ciudad es baja. [40]

El método de cociente espectral demuestra ser muy útil para la estimación de los efectos locales ante los eventos sísmicos, también para la determinación de los peligros potenciales de la resonancia con relación al suelo-estructura.

4. METODOLOGIA

El proyecto de investigación se realiza mediante una serie de etapas que son necesarias para llegar a esa finalidad o a ese objetivo principal que es la determinación de los periodos fundamentales del suelo en los sitios de las estaciones de acelerógrafos en Bucaramanga. La figura 20 muestra un resumen de aquellas etapas que se llevaron a cabo durante este proyecto de investigación.

FIGURA 20. ETAPAS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



Fuente: Autor

4.1 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

El proyecto de investigación contempló una amplia temática con relación al campo de la sismología, para llevar a cabo una buena ejecución del proyecto se realizó la revisión del estado del arte que permite una afinidad con el tema, a su vez con el conocimiento expresado en diferentes investigaciones, lograr un análisis y resultados claros con la validez de un exhaustivo reconocimiento del tema.

Desde los primeros registros de eventos sísmicos, el ser humano ha tenido curiosidad por sus causas y posibles efectos, en el marco teórico del proyecto se plasmó de manera estructurada la revisión de los contenidos relacionados con el tema.

A partir de los niveles de sismicidad mundial, sismicidad en Colombia y sismicidad en Santander en donde se hace un recuento de los eventos sísmicos que demuestran la situación de peligro que puede afectar a las diferentes poblaciones en el mundo.

También la teoría relacionada con los eventos sísmicos que liberan energía en forma de ondas sísmicas, las cuales se presentan de diferente manera, la forma de medición de estas ondas y los respectivos análisis de sus componentes, los efectos del suelo que pueden llegar a causar amplificaciones de estas ondas con efectos devastadores.

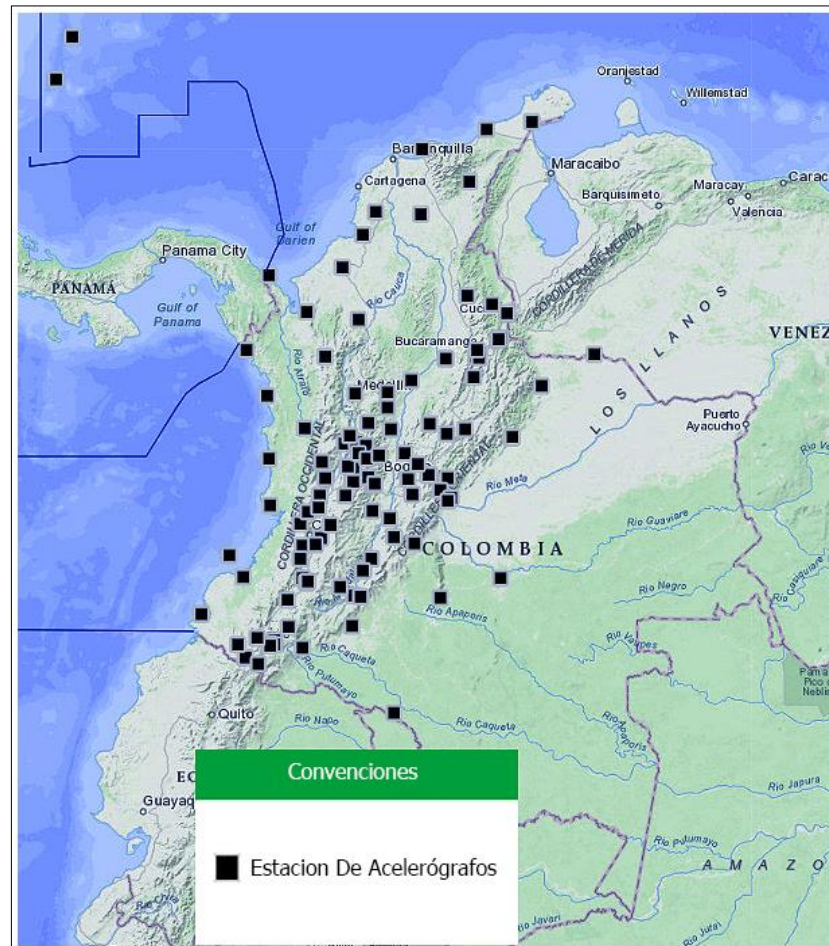
La revisión de uno de los métodos más empleados para determinar la frecuencia fundamental del suelo a base de las mediciones de vibraciones ambientales, el método de cociente espectral o técnica Nakamura, las aplicaciones del método que conllevan a la realización de estudios importantes e investigaciones que tienen finalidades útiles para el análisis de los riesgos sísmicos.

4.2 MEDICIONES DE VIBRACION AMBIENTAL EN BUCARAMANGA (SANTANDER, COLOMBIA)

El registro de un evento sísmico se lleva a cabo mediante equipos especializados que miden las aceleraciones del suelo a efectos de las ondas sísmicas, estos equipos pueden ser acelerógrafos instalados en lugares específicos donde se considere una mejor ubicación para la medida de los efectos de los eventos sísmicos.

Actualmente Colombia cuenta con la RNAC (Red Nacional De Acelerógrafos De Colombia) es su función de monitoreo constante de los eventos sísmicos que ocurren en el país con 120 estaciones de acelerógrafos (Ver figura 21). [12]

FIGURA 21. RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS EN COLOMBIA

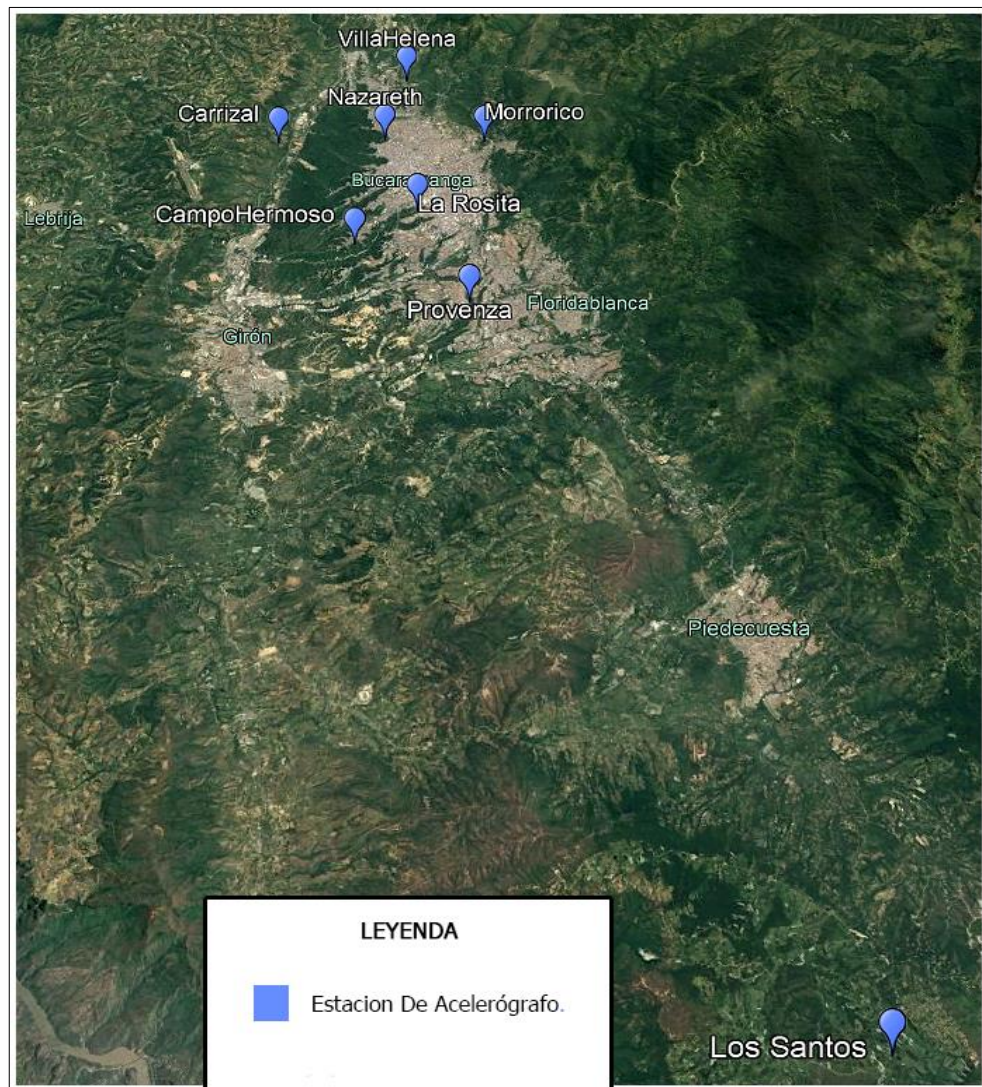


Fuente: Tomado de [12]

La red de acelerógrafos del área metropolitana de Bucaramanga consta de 8 acelerógrafos, son operados por el Observatorio Sismológico UDES – CDMB con el objetivo monitorear de movimientos fuertes del terreno. En la figura 22 se encuentra la ubicación de los 8 acelerógrafos que hace parte de la red de acelerógrafos de Bucaramanga.

Gracias a el convenio del observatorio sismológico UDES-CDMB el proyecto se llevó a cabo con el monitoreo de los 8 acelerógrafos para el registro de las vibraciones ambientales, debido a que los acelerógrafos están en constante monitoreo, se concentró en la labor de seleccionar los datos para el correcto procesamiento y permitir el avance del proyecto con el cálculo de los periodos fundamentales del suelo.

FIGURA 22. LOCALIZACIÓN RED DE ACELEROGRAFOS BUCARAMANGA, SANTANDER



Fuente: Google Earth

Existen diferentes tipos de acelerógrafos dependiendo de su sistema funcional, en este proyecto se registraron los datos con acelerógrafos digitales tipo Reftek (Ver figura 23), la facilidad de este acelerógrafo es la conectividad por medio de internet a un servidor central que se encarga de recibir la información de los movimientos del suelo segundo a segundo. [32]

FIGURA 23. ACELERÓGRAFO TIPO REFTEK



Fuente: Autor

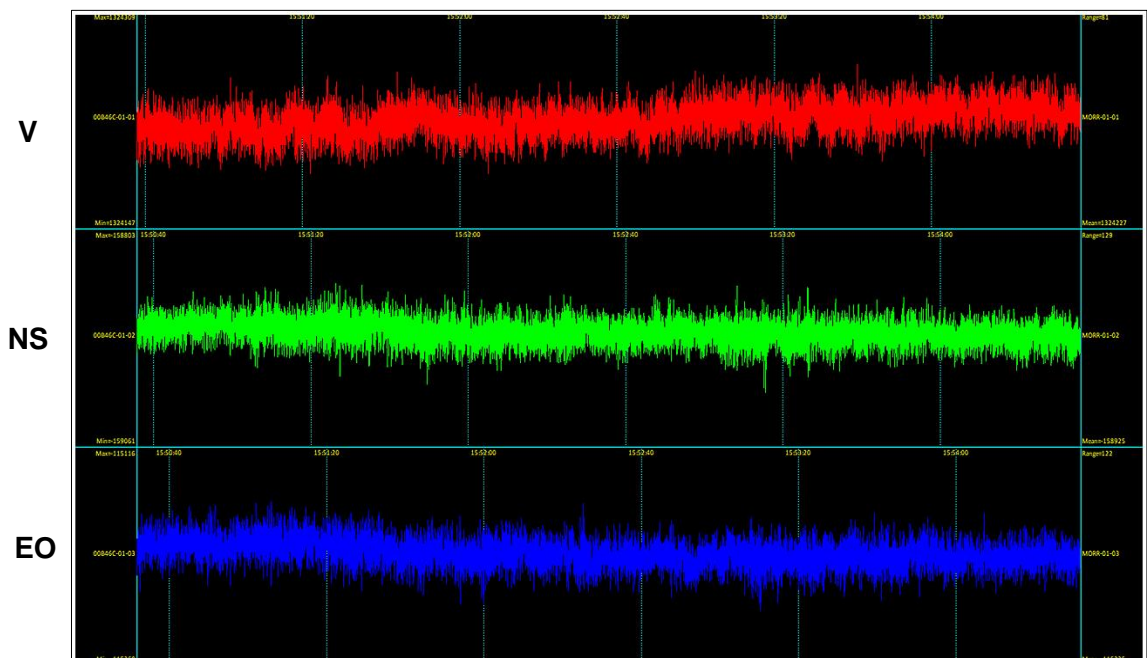
El acelerógrafo digital representa la señal de los movimientos del suelo contemplando los movimientos en las componentes horizontales (Norte-Sur, Este-Oeste) y la componente vertical. (figura 24)

El monitoreo y recolección de datos de los eventos sísmicos permitió conocer las características fundamentales (amplitud, frecuencia, periodo, velocidad, aceleración) y el

comportamiento de las ondas sísmicas con respecto al tipo de suelo, con el manejo de los datos en softwares especializados se puede determinar el periodo fundamental del suelo que es uno de los puntos más importantes de este proyecto.

Esta información permite conocer a nivel instrumental el comportamiento sísmico del suelo. Con el fin de obtener parámetros geo mecánicos del suelo y determinar la respuesta sísmica en los sitios donde están ubicadas las estaciones de la red de acelerógrafos del área metropolitana de Bucaramanga.

FIGURA 24. SEÑAL EMITIDA DEL ACELEROGRAFO DIGITAL.



Fuente: Autor

4.3 SELECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.

De acuerdo con el registro constante que llevan los acelerógrafos, hay un punto importante en esta etapa del proyecto que es la selección de los datos de vibraciones ambientales en cada uno de los sitios en donde se encuentren los acelerógrafos.

El procesamiento de los datos seleccionados se llevó a cabo en dos softwares de código libre MATLAB y Geopsy, asimismo llevando un criterio de procedimiento guiado por las investigaciones de SESAME (2004) y OpenHVSr (2018) se analiza los procedimientos y los resultados del cociente espectral para la determinación de los periodos fundamentales del suelo.

Se seleccionaron los datos de grabación de un día completo en cada una de las estaciones para realizar el análisis de las vibraciones ambientales de 24 horas, con esto se pudo analizar el comportamiento de la señal a diferentes horas del día ya que en horas quietas y en horas de mayor influencia de ruido externo se puede analizar diferentes factores.

4.3.1 SESAME European Research Project

El proyecto Sesame es un proyecto europeo en el que participaron y colaboraron eminentes investigadores alrededor del mundo, pensado para mitigación del riesgo sísmico con la importancia de la estimación del efecto local en áreas urbanas, enfocado en dos técnicas de costo bajo utilizando las vibraciones sísmicas ambientales, técnicas como el cociente espectral anunciada por Nakamura y técnicas de medición de matrices de ruido para las curvas de dispersión de ondas superficiales. [41]

Uno de los objetivos del proyecto fue investigar la confiabilidad de las técnicas utilizando los registros de vibraciones ambientales abordando diferentes puntos de vista, comprendiendo la base física y el significado que tiene la estimación de los efectos de sitio. [41]

Se propusieron pautas y un software de procesamiento para asegurar el uso correcto de las técnicas, a raíz del proyecto surge el desarrollo del programa GEOPSY, proporcionando herramientas para el procesamiento de vibraciones ambientales con una documentación

estructurada en torno a tutoriales y manuales de referencia para la correcta interpretación de los experimentos. [41]

4.3.2 OpenHVSr

El proyecto OpenHVSr nace como un impulso personal del geofísico Ph.D Samuel Bignardi en el año 2015 hasta llegarse a convertir en un proyecto de investigación completo, año tras año en investigación con resultados plasmados en artículos científicos.

El proceso de la investigación basada en el manejo de los microtremores lo llevo al desarrollo de dos programas en computadora creados en el entorno del software MATLAB, el primero de ellos “OpenHVSr Inversión” [42] fue publicado en el año 2016 e implementado para mejorar la inversión de la relación espectral del componente horizontal y vertical con una visualización 2d y 3d para una mejor comprensión de la geología local.

El segundo programa “OpenHVSr-Processing Toolkit” [43] publicado en el año 2018 para el procesamiento de señales necesario para el cálculo de las curvas del cociente espectral a partir de los registros de microtremores con mejoras en el procesamiento de señal de cada estación, creación de mapas y visualizaciones de los resultados en 2d y 3d.

4.4 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES DE VIBRACIÓN AMBIENTAL Y CALCULO DEL PERIODO FUNDAMENTAL DEL SUELO

El procesamiento de una señal de vibración ambiental requiere una serie de pasos que son necesarios y que cumplen una función específica para la determinación del periodo fundamental del suelo. En este proyecto se realiza basándose en los parámetros de procesamiento correspondientes en los proyectos de investigación de Sesame [41] y OpenHvsr [42 y 43] ya mencionados. A continuación, se explica cada uno de los pasos empleados para el procesamiento de las señales de vibración ambiental de la red de acelerógrafos de Bucaramanga.

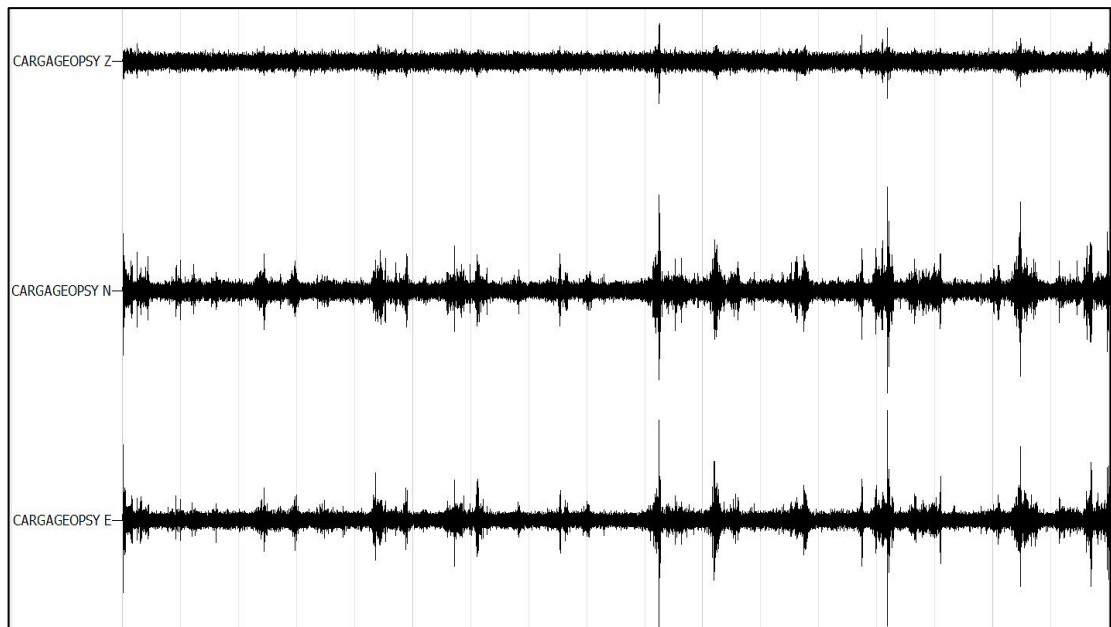
4.4.1 Conversión de la señal.

El acelerógrafo digital Tipo Reftek genera la señal de vibración ambiental en un formato de archivo binario, para la correcta manipulación de la señal en los diferentes softwares que se trabajó en este proyecto es necesario realizar la conversión de la señal en un formato de archivo ASCII, ya que las diferentes plataformas de software permiten más fácilmente la lectura de archivos en formato ASCII.

4.4.2 Carga de la señal.

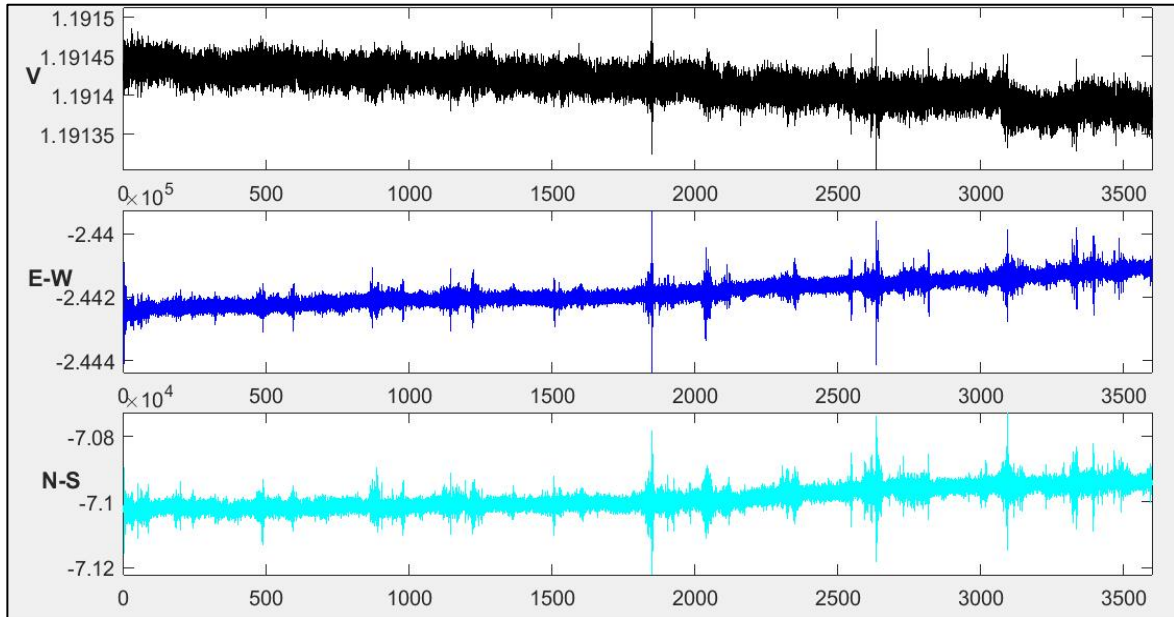
La señal de vibración ambiental está compuesta por la grabación de los tres componentes en un movimiento del suelo estas son la componente vertical y dos componentes horizontales correspondientes al plano horizontal en las direcciones Norte-sur y Este-oeste. En la figura 25 y 26 se muestra la señal cargada de una de las estaciones de la red de acelerógrafos en los dos softwares que se emplearan para la determinación de los periodos fundamentales.

FIGURA 25. SEÑAL CARGADA EN EL SOFTWARE GEOPSY



Fuente: Software GEOPSY

FIGURA 26. SEÑAL CARGADA EN EL PROGRAMA OPENHVSR



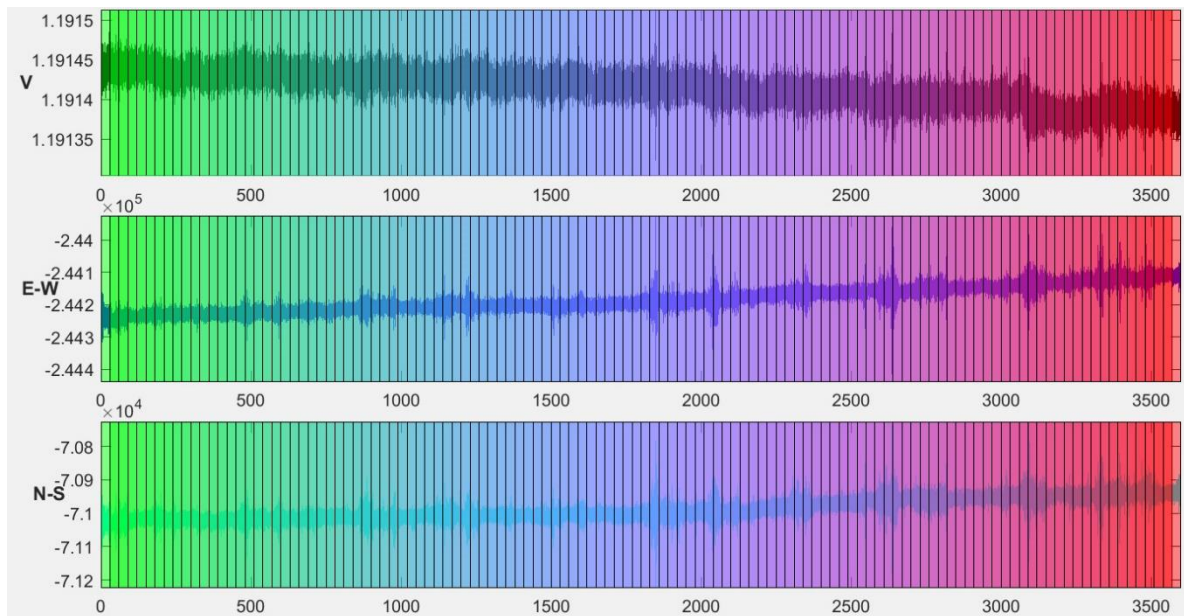
Fuente: Programa OpenHvsr

4.4.3 Ventanas de análisis

Para el análisis de la señal, es necesario realizar la división de esta en ventanas medidas en unidad de tiempo (segundos), este proceso es determinado por el usuario. Para continuar con la división de las ventanas se debe realizar un proceso de filtrado en donde se elige los rangos de frecuencia los cuales serán analizados y un proceso de traslapo de ventana para una correcta unión de la señal, evitando errores en la superposición de cada una de las ventanas, se realizó la división de ventanas de 30s para la señal con el filtrado de frecuencias de 0,1 a 25 Hz y un traslapo de ventana de 50%.

El rango de frecuencia hasta el que se analiza señal es 50 Hz lo que corresponde a la mitad de la frecuencia de muestreo (100 Hz) también es llamada la frecuencia Nyquist, cada uno de los programas realiza la división de ventanas de cada uno de los componentes y de acuerdo con el tiempo de la señal saldrán un numero de ventanas determinado, en la figura 27 se muestra la división de la señal en ventanas.

FIGURA 27. DIVISION DE LA SEÑAL EN VENTANAS DE ANALISIS.



Fuente: Programa OpenHvsr

4.4.4 Parámetros de Procesamiento y Transformada de Fourier

Una vez se dividió la señal en ventanas de análisis el proceso siguiente que se realiza en los programas es la transformada de Fourier de cada una de las ventanas de análisis de cada uno de los componentes de la señal, la transformada de Fourier representa la señal en el dominio de la frecuencia y en el rango de la amplitud con esto se puede analizar el contenido frecuencial de la señal.

Para un análisis de frecuencia más representativo se realiza un suavizado Konno-Ohmachi [44] para el espectro de Fourier en cada una de las ventanas de análisis, en este proyecto se suavizo con un coeficiente de 40.

4.4.5 Cociente espectral y frecuencia fundamental de la señal.

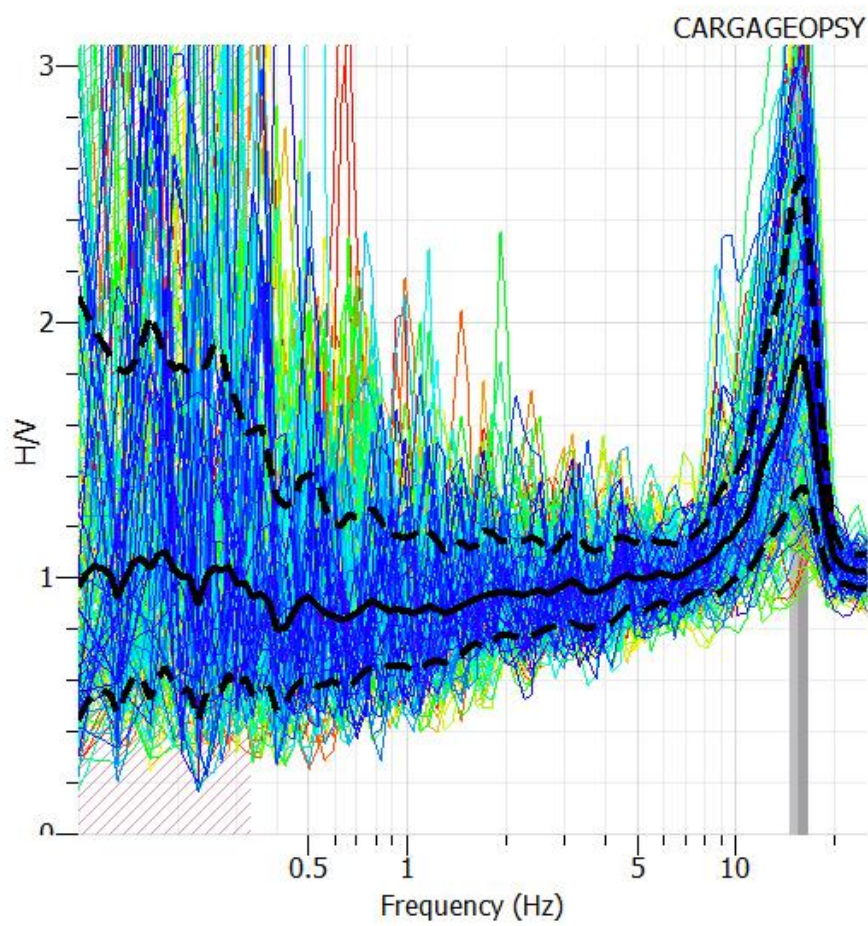
Para la realizar el cociente espectral, primeramente, a cada ventana de análisis se le realiza la transformada de Fourier y se promedia respecto a cada componente (horizontales y vertical) para así tener los espectros de Fourier de cada una de las componentes, se realiza el cociente de los espectros de Fourier de la componente horizontal con la vertical (NS/V y EO/V). Con el promedio de los dos cocientes espectrales se puede analizar el espectro H/V.

El espectro H/V resultante es el que contiene la frecuencia fundamental del suelo, el cociente espectral es representado con una curva en un plano en donde las abscisas significan los rangos de frecuencia analizados y las ordenadas, los rangos adimensionales de amplitud que representan un factor de amplificación del suelo (H/V). La frecuencia fundamental del suelo será representada en el valor que corresponda al pico máximo de esa curva del cociente espectral.

El procesamiento de las señales tratadas en este proyecto, se basa en los parámetros de procesamiento del proyecto SESAME, en su documentación se encuentran los parámetros de procesamiento que se deben tener en cuenta para el cálculo de los periodos fundamentales del suelo, como lo son las condiciones de registro de las señales, el tiempo de registro de las señales, los parámetros de división de ventanas, filtrado y suavizado asimismo las formas de analizar las curvas de H/V y también diferentes ejemplos de señales procesadas en distintos sitios, con esto se puede determinar y dar un resultado de la frecuencia fundamental del suelo.

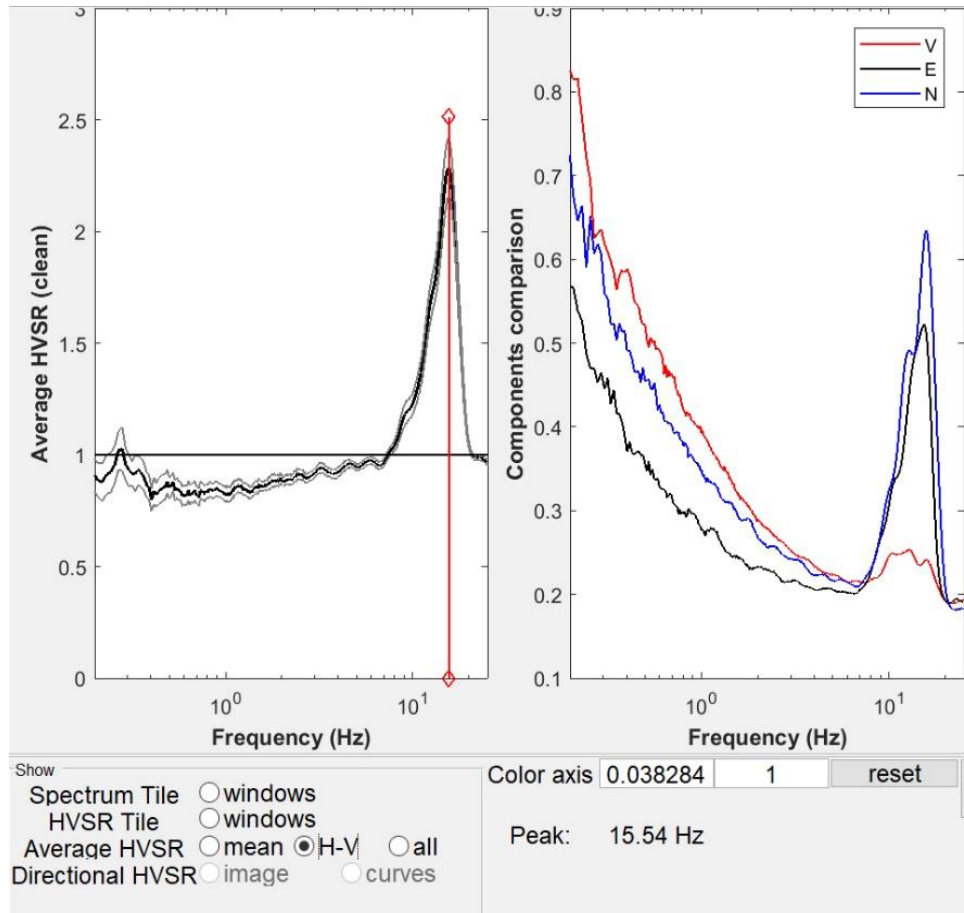
En la figura 28 y 29 se muestran los resultados del procesamiento de una señal escogida de una estación de la red de acelerógrafos de Bucaramanga, se realizó en cada uno de los programas Sesame y OpenHvsr.

FIGURA 28. RESULTADO PROCESAMIENTO CON GEOPSY



Fuente: Software GEOPSY

FIGURA 29. RESULTADO PROCESAMIENTO CON OPENHVSR



Fuente: Programa OpenHvsr

Los resultados generados con el procesamiento de la señal en los dos programas son similares, con GEOPSY demuestra una frecuencia fundamental del suelo de los rangos de 15,53 Hz para un periodo de 0,064 s, en el programa OpenHvsr demuestra la frecuencia fundamental en el mismo rango de frecuencia 15,54 Hz para un periodo de 0,064 s.

Con estos resultados se tiene una confiabilidad de uso de los dos programas y son muy útiles para la determinación de los periodos fundamentales del suelo.

5. ANALISIS Y RESULTADOS

Siguiendo la metodología propuesta para el cálculo de los periodos fundamentales del suelo se realizó el procesamiento de los datos en cada una de las estaciones de la red de acelerógrafos de Bucaramanga y se analizaron cada uno de los resultados que se obtuvieron.

En el análisis y resultados del procesamiento en cada una de las estaciones de la red de acelerógrafos de Bucaramanga se basa en información geológica de los lugares en los que están ubicados los acelerógrafos, para así relacionar los resultados de las frecuencias fundamentales con una base geológica y poder tener esos resultados como claros y confiables.

5.1 ESTACIÓN DE CAMPOHERMOSO

La estación de acelerógrafo de Campohermoso se encuentra en una zona aledaña al barrio Campohermoso de Bucaramanga, en las coordenadas $7^{\circ} 6'2.70''N$, $73^{\circ} 8'26.52'' O$. En la figura 30 se encuentra la ubicación de la estación de acelerógrafo.

FIGURA 30. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE CAMPOHERMOSO.

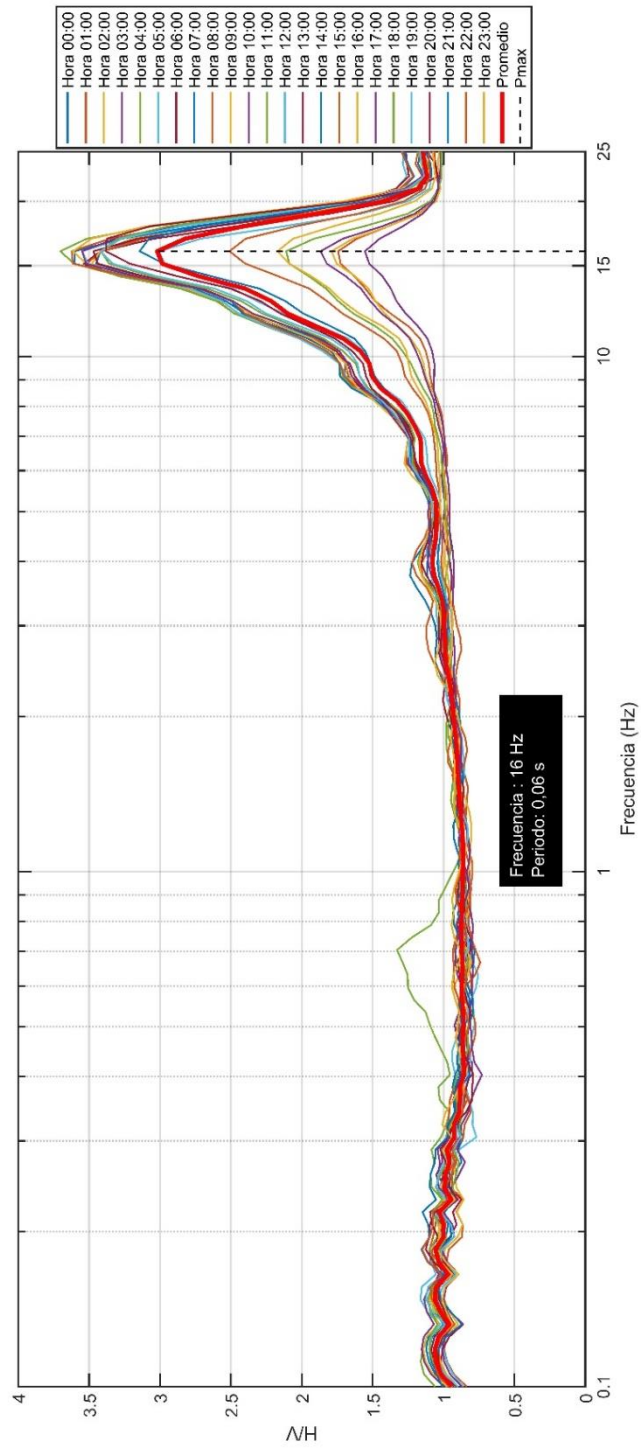


Fuente: Google Earth

Los datos que se seleccionaron para el procesamiento y cálculo del periodo fundamental del suelo corresponden al día 24 de agosto de 2018, para la determinación de la frecuencia del suelo se procesó las 24 horas del día, dando como resultado una frecuencia del rango de 16 Hz para un periodo de 0,06 s.

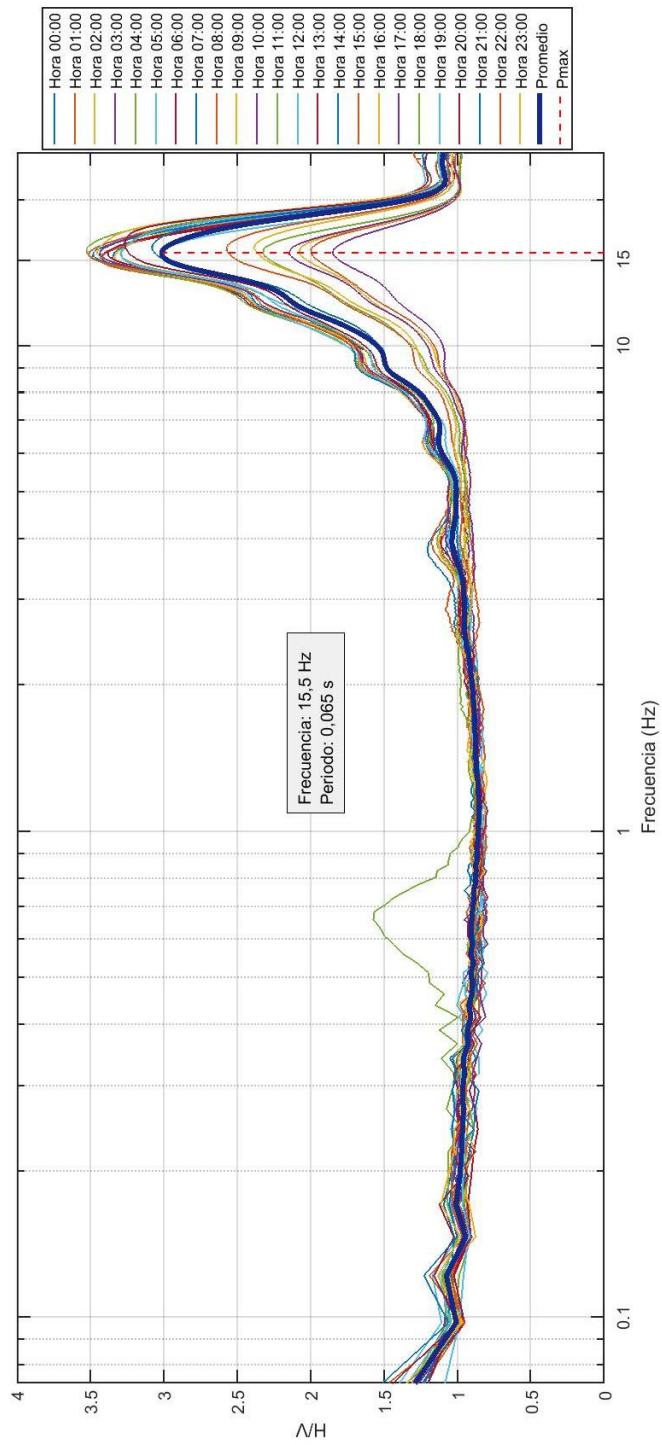
En las figuras 31 y 32 se encuentra el procesamiento de las 24 horas del día de la estación de Campohermoso.

FIGURA 31. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE CAMPOHERMOSO CON GEOSY



Fuente: Autor

FIGURA 32. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE CAMPOHERMOSO CON OPENHVS



Fuente: Autor

Para relacionar los resultados del procesamiento con una base geológica del lugar en el cual se tomaron los registros de vibraciones ambientales podemos ubicarnos en los mapas de zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga [45], [46] y [47].

El sitio analizado corresponde a la zona 1 relacionada con los depósitos de roca correspondientes a residuos residuales competentes sobre el manto rocoso y las zonas aledañas del barrio Campohermoso correspondientes a la zona 2 relacionada con depósitos de suelo rígido reunido por las zonas del abanico de Bucaramanga. [45], [46] y [47].

El resultado de una frecuencia fundamental en el rango de los 16 Hz se puede relacionar con las condiciones geológicas del lugar ya que para el sitio con un periodo de vibración bajo en este caso 0,06 segundos puede estar caracterizado por depósitos competentes o roca.

En los gráficos podemos observar que en las horas de mayor influencia de ruido externo se presenta mayores factores de amplitud (Hora 11:00 a 13:00), pero la frecuencia fundamental se mantiene en el rango de los 16 Hz en cada hora del día.

5.2 ESTACIÓN DE NAZARETH

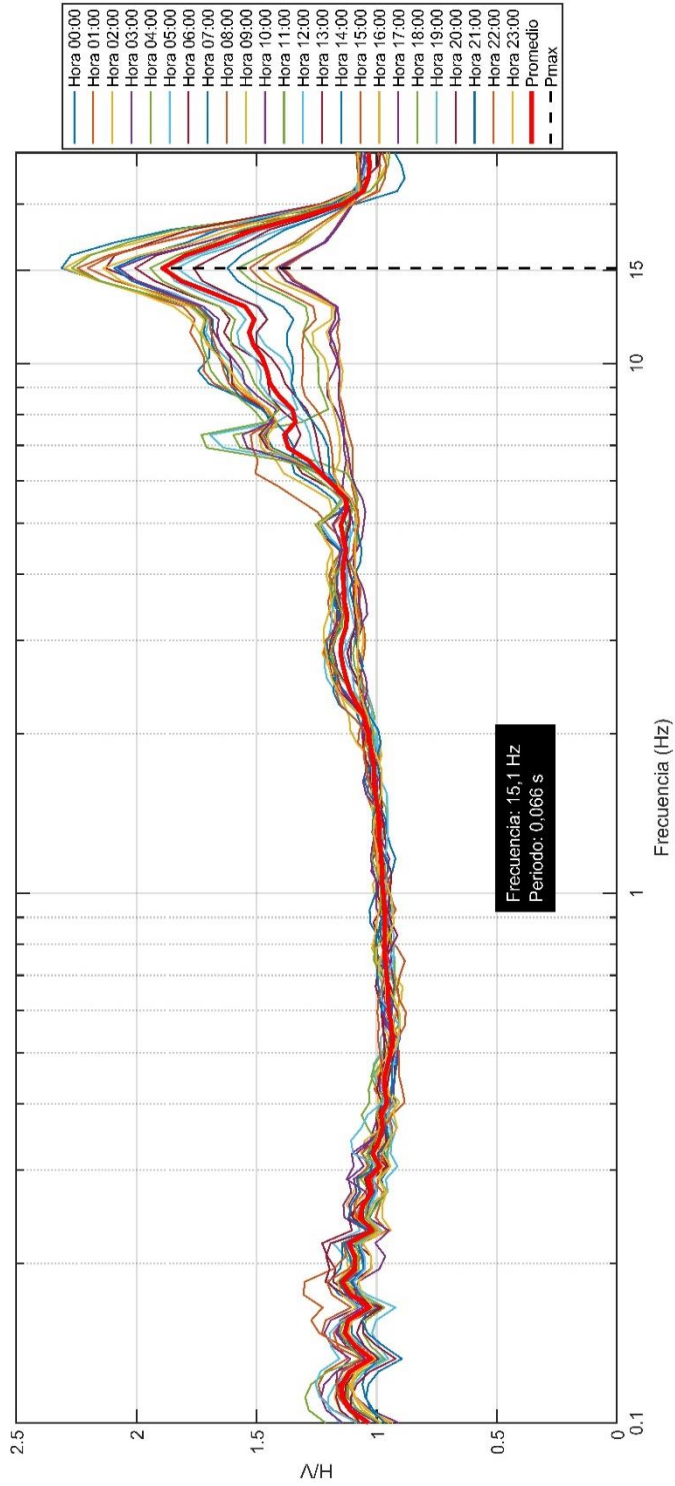
La estación de Nazareth está ubicada en una zona cercana a la localidad de Nazareth en Bucaramanga, en las coordenadas 7° 8'4.24" N, 73° 7'57.72" O. En la figura 33 se puede observar la ubicación específica del acelerógrafo de la estación de Nazareth y en las figuras 34 y 35 lo correspondiente al procesamiento de las vibraciones ambientales en el sitio.

FIGURA 33. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE NAZARETH



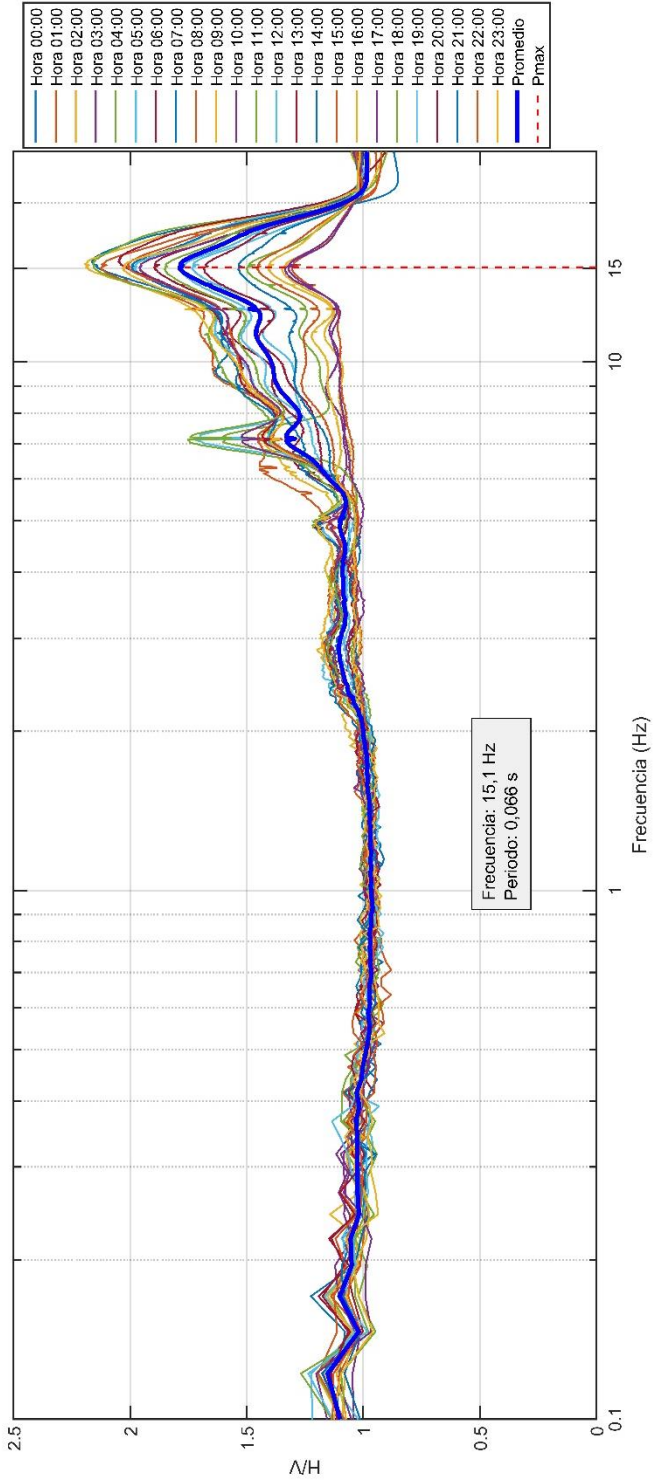
Fuente: Google Earth

FIGURA 34. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE NAZARETH CON GEOPSY



Fuente: Autor

FIGURA 35. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE NAZARETH CON OPENHVSR



Fuente: Autor

Se procesaron los datos de las 24 horas del día 24 de julio de 2015 y como resultado de ese procesamiento que podemos observar en las gráficas de las figuras 34 y 35 que el sitio presenta una frecuencia fundamental del rango de los 15,1 Hz para un periodo fundamental de 0,066 s.

Las gráficas muestran que, para cada hora de procesamiento, la curva tiende de la misma manera demostrando el pico más alto en la frecuencia de 15 Hz. Lo que se puede observar es que para las horas de mayor influencia de ruido externo que están entre las (horas 11.00 y 13:00) hay un mayor grado de amplitud, pero sigue demostrando la frecuencia fundamental en el rango de frecuencias de 15 Hz.

Según la ubicación de la estación en los mapas de zonificación sismogeotécnica este sitio corresponde a la zona 1, relacionada con suelos residuales competentes sobre el manto rocoso o cualquier depósito que se pueda considerar como roca pura [45] y para una zonificación geotécnica correspondiente a la formación Bucaramanga correspondiente a los escarpes de la meseta de Bucaramanga y a los miembros órganos afectados por los procesos erosivos. [46] y [47]

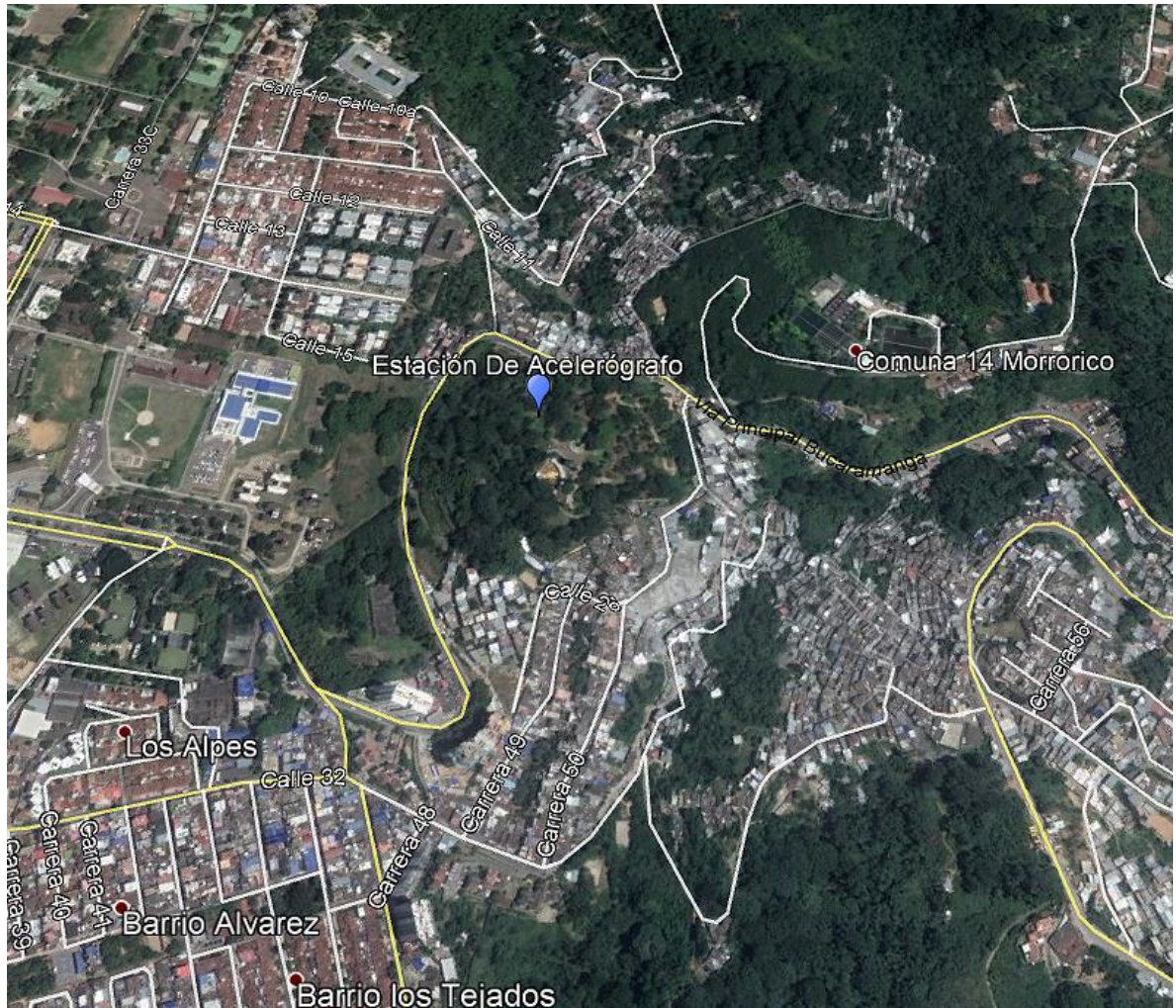
En zonas aledañas al sitio de análisis hay una conformación geotécnica relacionada con depósitos de coluvión que pueden tener otras características dinámicas con respecto a sus condiciones geotécnicas. [47]

5.3 ESTACIÓN DE MORRORICO

La estación de Morrорico se encuentra ubicada en la localidad del barrio Morrорico en Bucaramanga, alrededor del cerro del monumento al sagrado corazón de Jesús ubicado en el parque Morrорico en las coordenadas 7° 7'59.74" N, 73° 6'24.91" O. En la figura 36 se encuentra la ubicación del acelerógrafo.

Los datos que se procesaron para el cálculo de la frecuencia fundamental en este sitio corresponden al día 9 de noviembre del 2018, se procesaron las 24 horas de este día para analizar si la frecuencia se mantenía a cada hora del día.

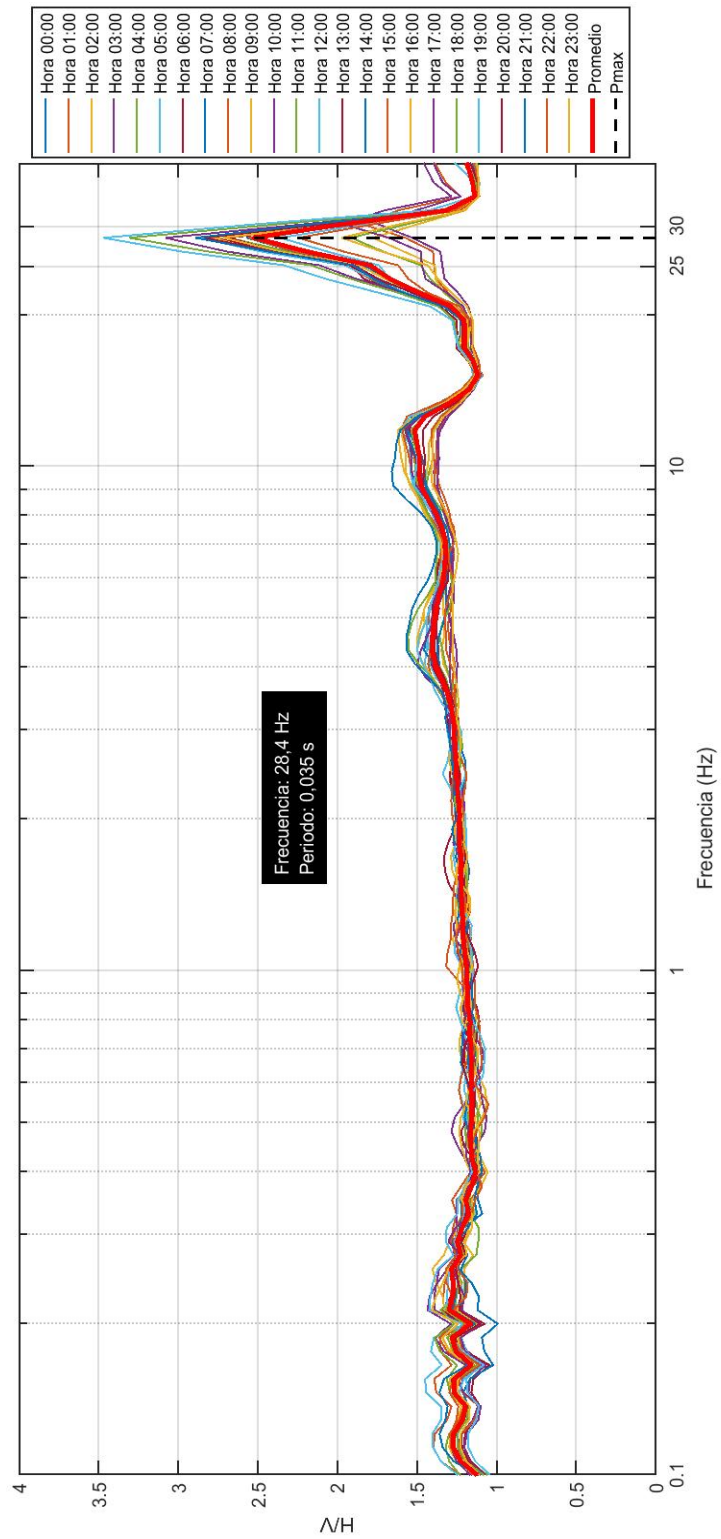
FIGURA 36. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE MORRORICO.



Fuente: Google Earth

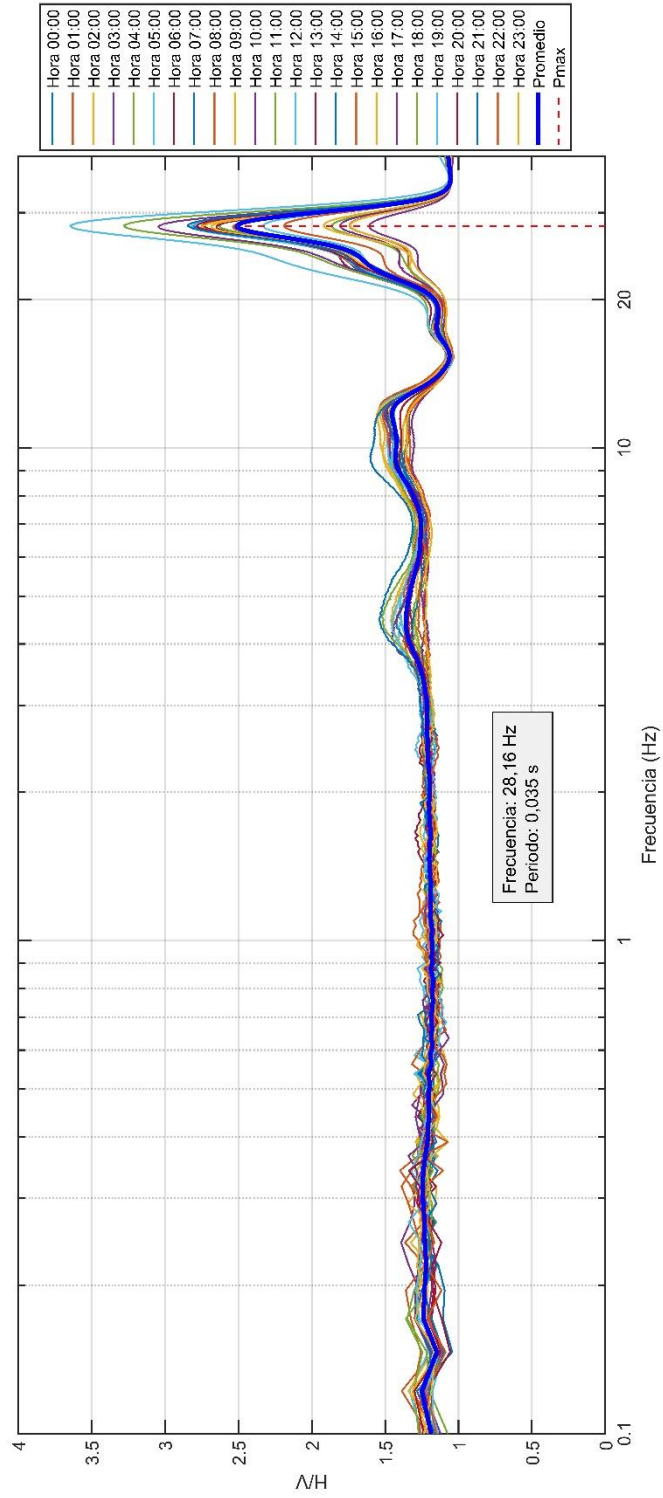
Los resultados del procesamiento indican que para este sitio de análisis la frecuencia fundamental del suelo está en el rango de los 28 Hz para un periodo fundamental de 0,035 segundos. En las figuras 37 y 38 se encuentra el procesamiento de las 24 horas de la estación de Morrорico.

FIGURA 37. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE MORRORICO CON GEOPSY



Fuente: Autor

FIGURA 38. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE MORRORICO CON OPENHVSR



Fuente: Autor

Según la clasificación sismo geotécnica indicativa del área de Bucaramanga el sitio de análisis corresponde a la zona 1 relacionada con suelos residuales competentes sobre el manto rocoso y la clasificación geotécnica del lugar está caracterizada por rocas ígneas y metamórficas del periodo cámbrico referente a la formación neis de Bucaramanga en estado fracturado afectado por las fallas geológicas en este caso por el sistema de fallas de Bucaramanga – Santa Marta. [45], [46] y [47].

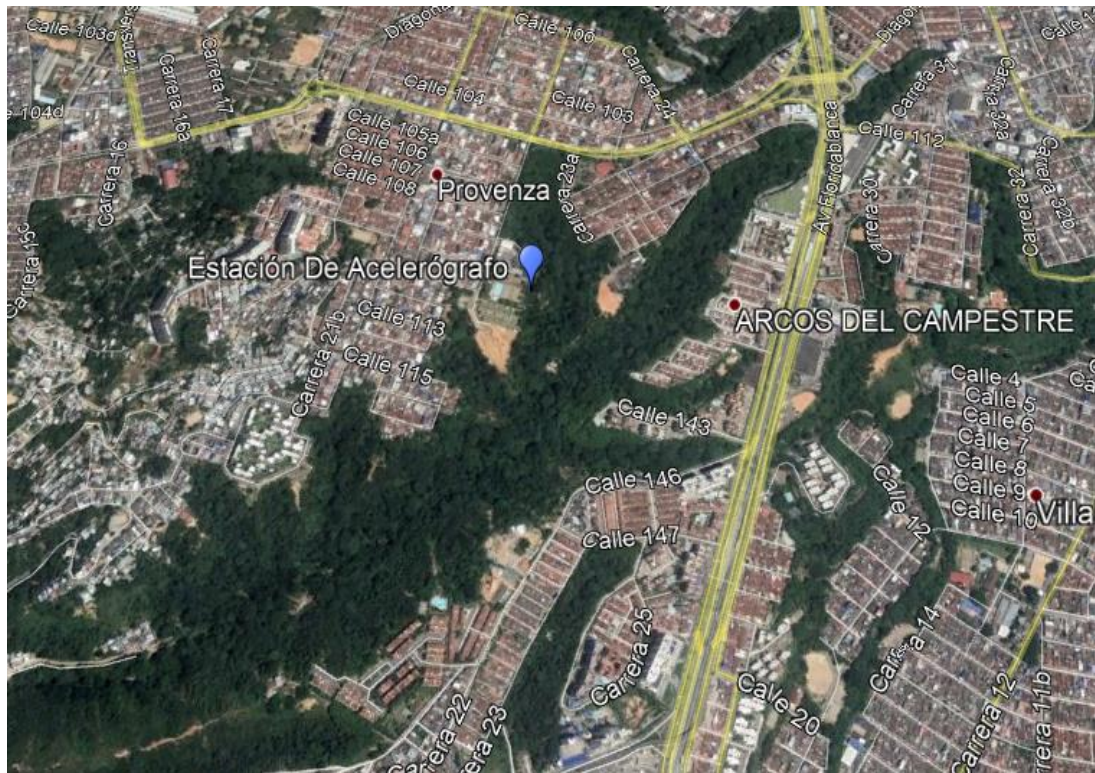
La presencia de la frecuencia fundamental en este caso 28 Hz para periodos bajos de vibración se ve relacionado con las características del sitio de análisis, ya que sitios con característica rocosa presentan periodos fundamentales bajos.

5.4 ESTACIÓN DE PROVENZA

La estación de acelerógrafo de Provenza se encuentra ubicada en el sector de Provenza en Bucaramanga en las coordenadas 7° 4'56.06" N, 73° 6'45.61" O. La ubicación del acelerógrafo se puede observar en la figura 39.

Para el análisis del sitio de esta estación se escogieron los datos registrados el día 24 de agosto de 2018 y siguiendo la metodología aplicada en las otras estaciones, se procesó 24 horas de ese día para analizar el comportamiento del suelo a diferentes horas del día y observar si la frecuencia fundamental del suelo se ve reflejada en las diferentes horas del día ya que por fuentes de demasiado ruido externo en algunos casos o en las horas que más actividad se tienen en algunas zonas determinadas, el proceso de análisis de la frecuencia fundamental del suelo se puede ver afectada.

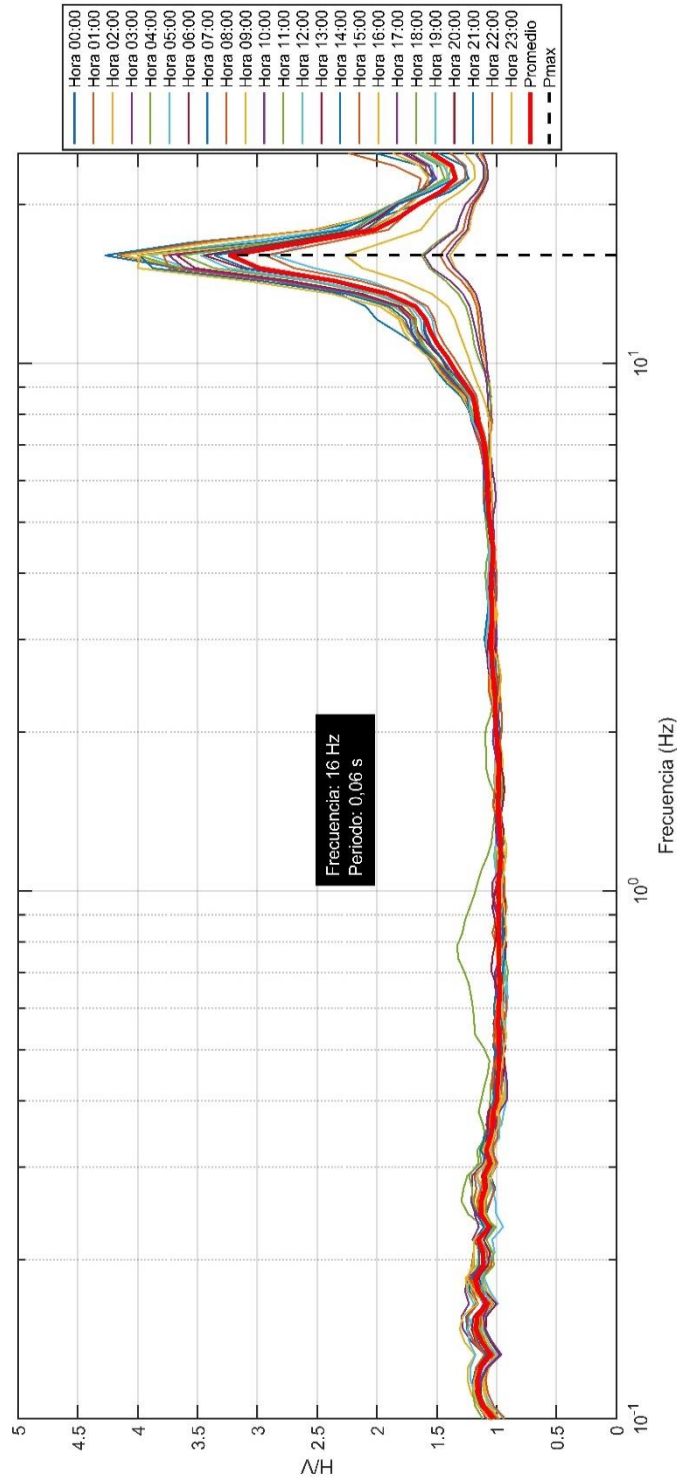
FIGURA 39. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE PROVENZA



Fuente: Google Earth

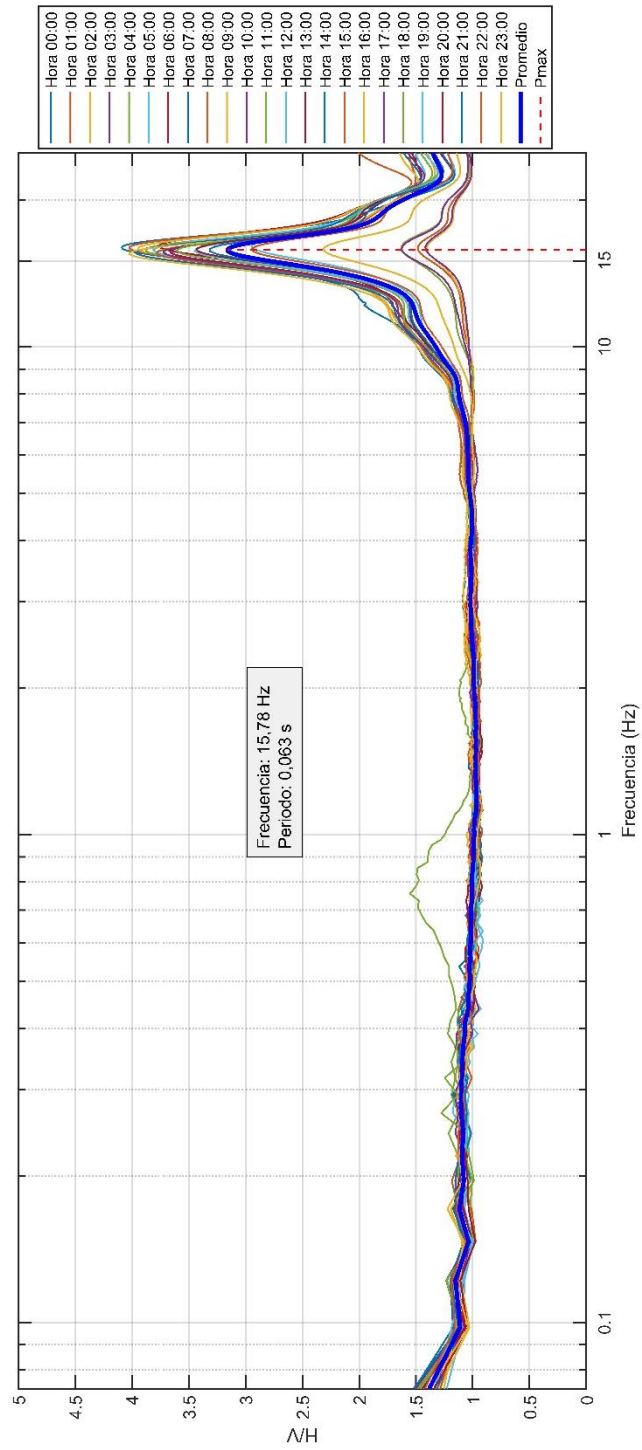
Los resultados obtenidos en este sitio indican una frecuencia fundamental en el rango de los 16 Hz para un periodo fundamental de 0,06 segundos y esta tendencia de frecuencia se mantiene en las diferentes horas de análisis, en las figuras 40 y 41 se puede observar el procesamiento de las 24 horas del día 24 agosto de 2018.

FIGURA 4032. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE PROVENZA CON GEOPSY



Fuente: Autor

FIGURA 4133. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE PROVENZA CON OPENHVSr



Fuente: Autor

La clasificación sismogeotécnica indica que el sitio de análisis corresponde a la zona 2 relacionada con un suelo rígido en parte del abanico de Bucaramanga y son zonas donde se encuentra la mayor parte de la población de Bucaramanga. [45]

La clasificación de la zonificación geotécnica del lugar descrita por los escarpes de la meseta de Bucaramanga y los limos correspondientes al abanico aluvial de Bucaramanga en clasificación de la formación Bucaramanga. [46]

5.5 ESTACIÓN DE VILLA HELENA

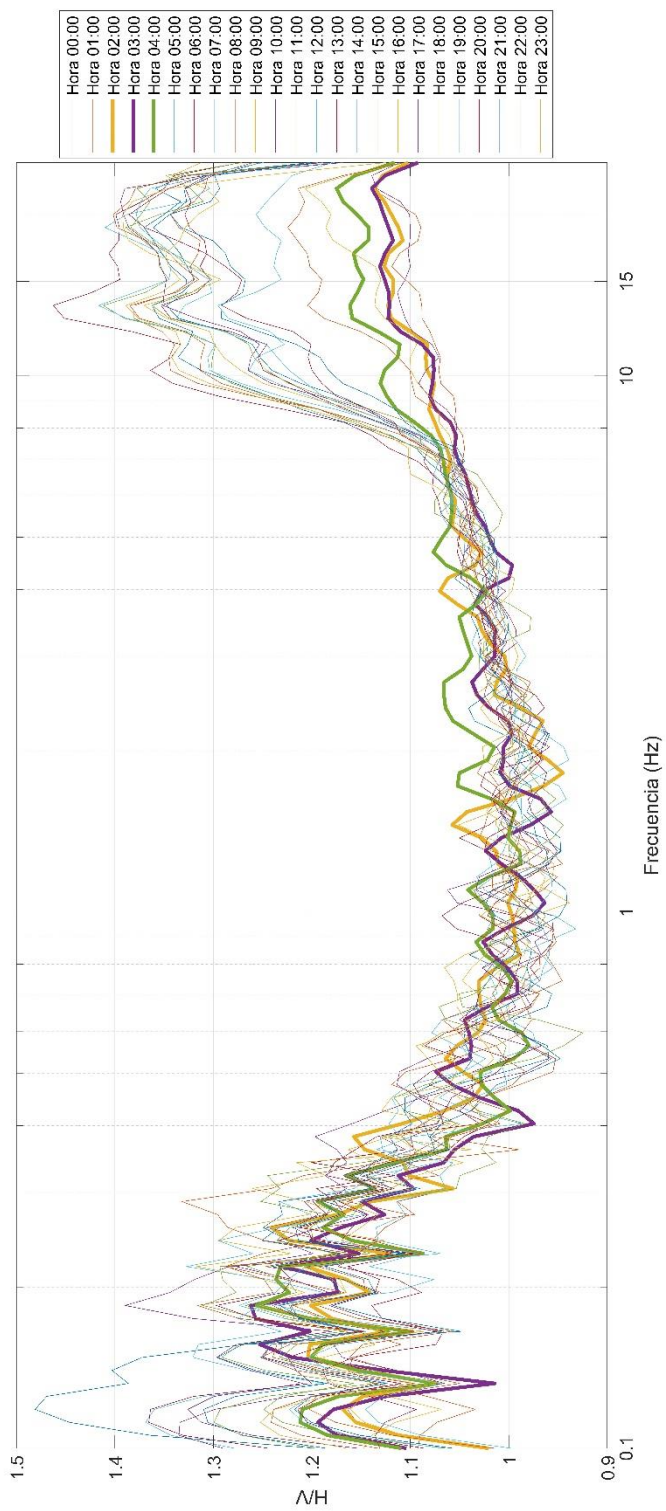
La estación de villa helena se encuentra ubicada en la parte norte de Bucaramanga, en el barrio Villa Helena en las coordenadas $7^{\circ} 9'16.34''$ N, $73^{\circ} 7'35.80''$ O. En la figura 42 se puede observar la ubicación exacta del acelerógrafo y se puede analizar el entorno en el cual se encuentra el barrio. En las figuras 43 y 44 se encuentra el procesamiento que se realizó con los datos de esta estación.

FIGURA 42. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE VILLA HELENA.



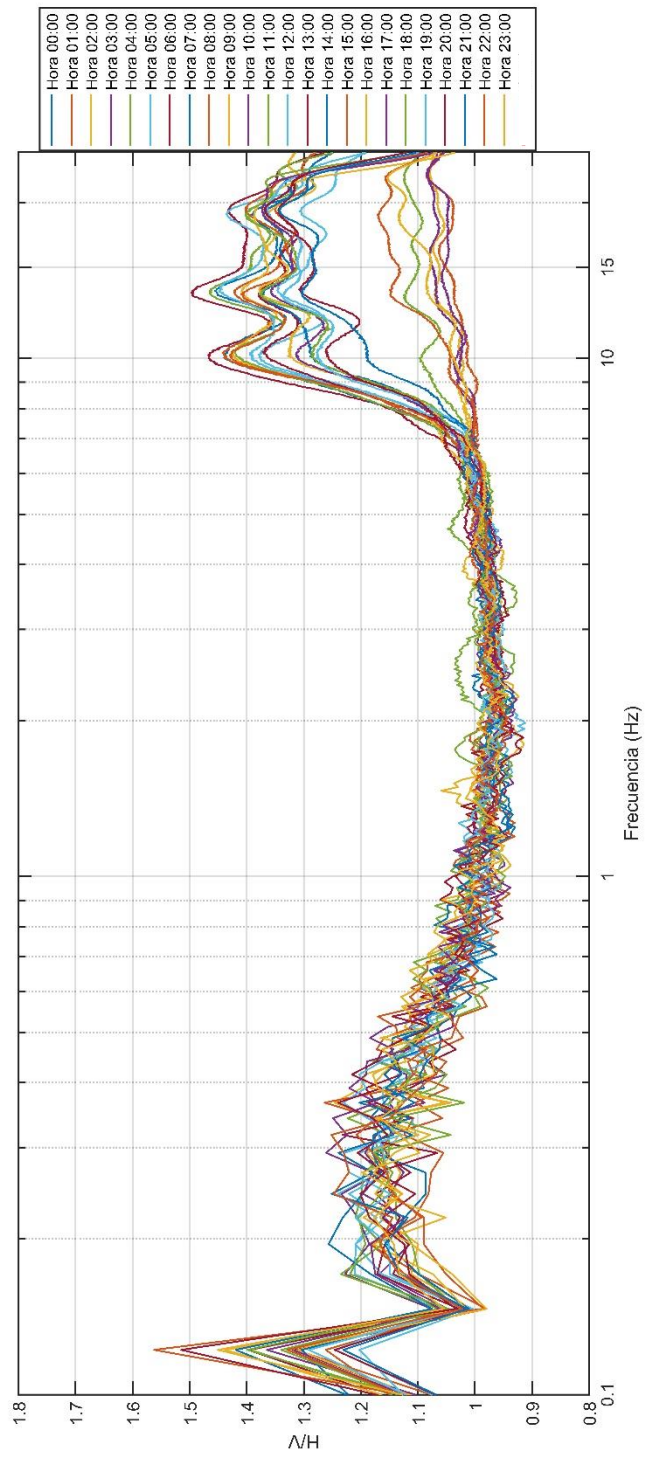
Fuente: Google Earth

FIGURA 43. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE VILLA HELENA CON GEOPSY



Fuente: Autor

FIGURA 44. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE VILLA HELENA CON OPENHVSr



Fuente: Autor

Los datos que se procesaron en esta estación corresponden al día 24 de agosto de 2018, se realizó el procesamiento de las 24 horas del día y en este caso el análisis de la frecuencia fundamental del suelo no fue muy claro, se puede observar en la gráfica de la figura 43 que conforme avanza las horas del día, hay un comportamiento diferente en la frecuencia y no hay un pico de frecuencia claro que demuestre la frecuencia fundamental, aunque en la figura 44 se puede observar una tendencia a frecuencias bajas también en el rango de frecuencias altas se observan picos que pueden ser parte de la frecuencia fundamental de este sitio de análisis.

Como ya se tiene en cuenta que el análisis de la frecuencia fundamental del suelo puede verse afectado por el sitio de análisis ya que fuentes externas pueden causar ruido en el registro de las vibraciones ambientales y puede no denotarse una claridad de los resultados.

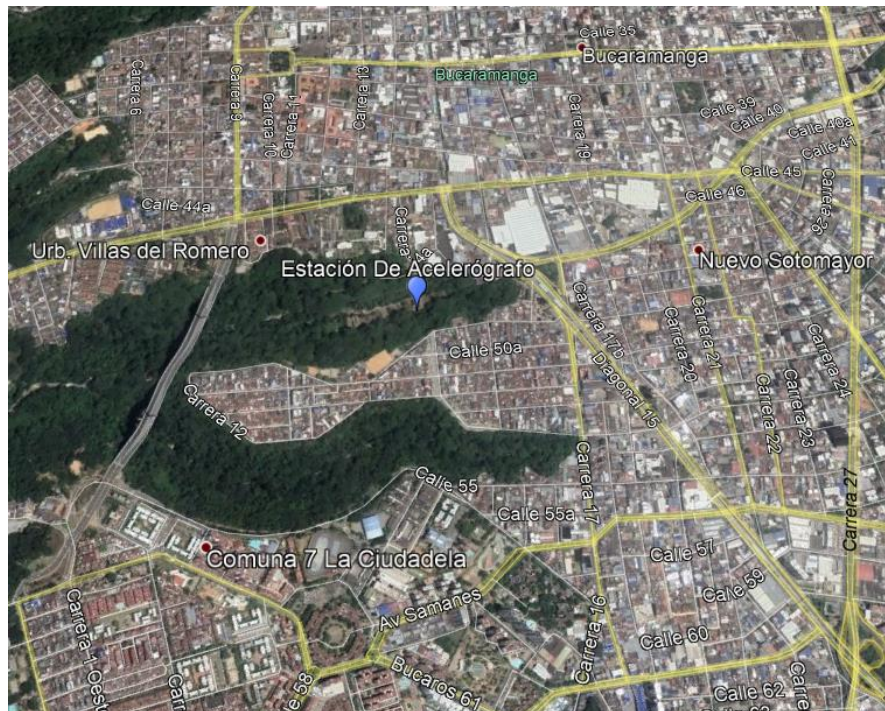
Las horas de menor influencia de ruido externo para hacer los registros de las vibraciones ambientales aplicadas para el cálculo de la frecuencia fundamental del suelo son las horas en donde se puede encontrar una quietud de la actividad humana o fuentes externas, esas horas están en el rango de las 2 y 3 de la mañana, para estas horas de análisis la frecuencia que predomina está en el rango de 0,4 Hz para periodos de vibración de 2,5 segundos, pero no se observa un solo pico representativo en la gráfica. Por otro lado, en horas en donde hay una actividad considerable como lo son las horas de medio día de 11 de la mañana a 1 de la tarde demuestra un pico de frecuencia en el rango de los 14 Hz para periodos de vibración bajos de 0,07 segundos.

Las condiciones sismogeotécnica del lugar indican que la zona de análisis se encuentra en la zona 1 relacionada con depósitos de roca o depósitos residuales competentes sobre el manto rocoso y la zonificación geotécnica del lugar está relacionada con zonas de deslizamiento activo, las zonas del norte de Bucaramanga son vulnerables a deslizamientos y tienen afectación por los procesos de erosión ya que se encuentran en zonas de ronda del río surata, el lugar presenta unas condiciones geológicas de gran importancia ya que se encuentra localizado en un sistema de fallas, las fallas de Bucaramanga-Santa Marta. [45], [46] y [47].

5.6 ESTACIÓN DE LA ROSITA

La estación de la rosita se encuentra ubicada en el sector de la rosita, cercano a la urbanización villas de romero en Bucaramanga en las coordenadas $7^{\circ} 6'40.28''$ N, $73^{\circ} 7'29.24''$ O. En la figura 45 se puede observar la ubicación de la estación de acelerógrafo y el entorno a este.

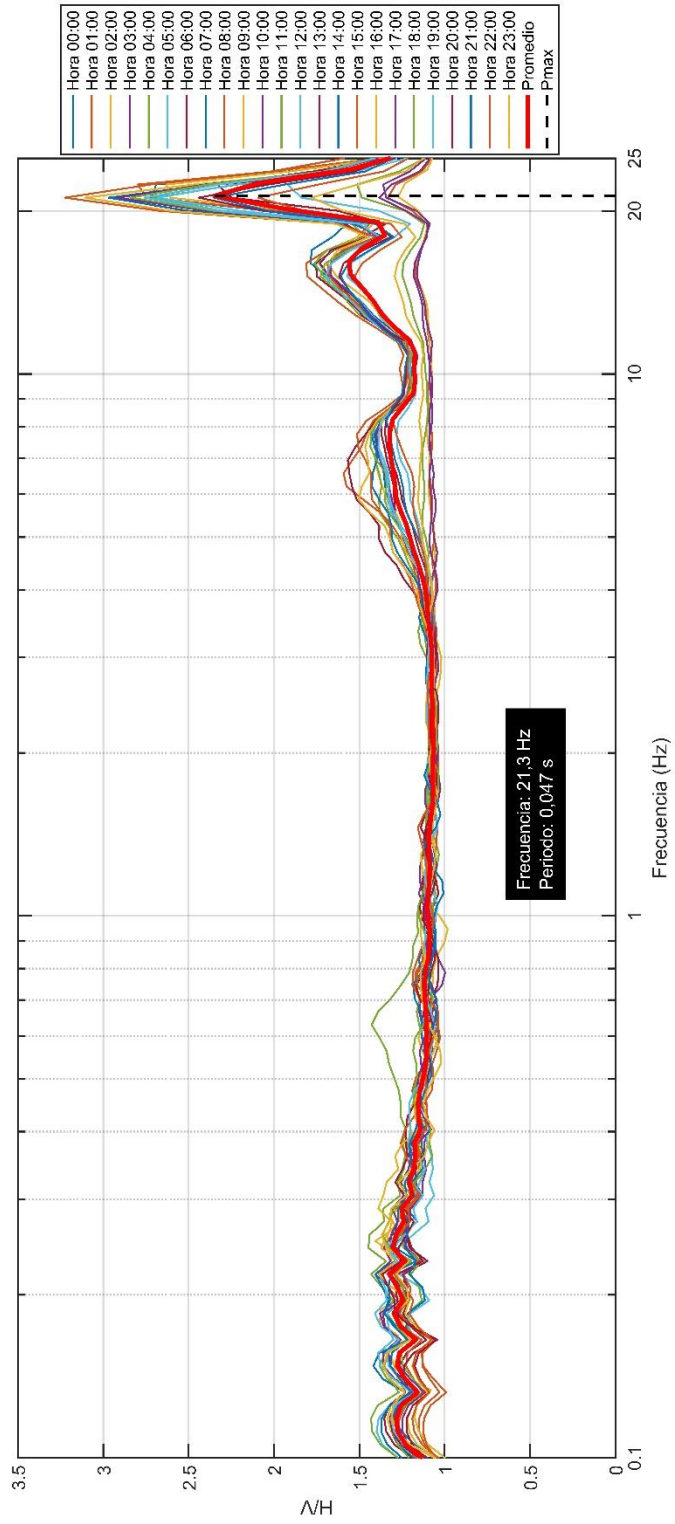
FIGURA 45. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE LA ROSITA



Fuente: Google Earth

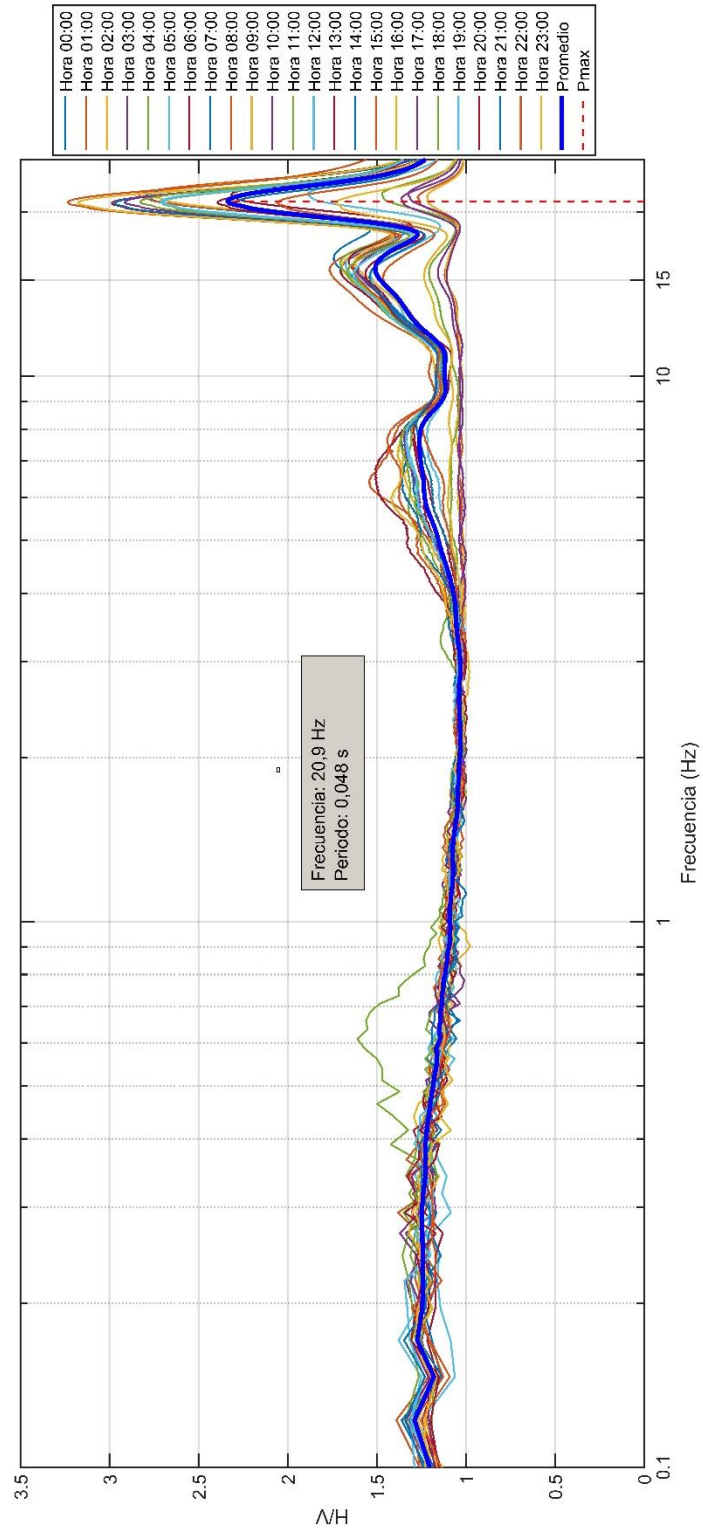
En esta estación se escogieron los datos respectivos a el día 24 de agosto de 2018 para su procesamiento y como un criterio de análisis se procesaron las 24 horas del día para determinar así una frecuencia predominante en las diferentes horas del día. En las figuras 46 y 47 se puede observar el procesamiento de la señal de la estación la rosita.

FIGURA 46. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE LA ROSITA CON GEOPSY



Fuente: Autor

FIGURA 47. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE LA ROSITA CON OPENHVSr



Fuente: Autor

Los resultados del procesamiento de esta estación muestran una frecuencia fundamental en el rango de los 21 Hz para un periodo fundamental de 0,047 segundos, la tendencia de la curva en cada hora del día se mantiene, pero en las horas en donde hay mayor actividad y fuentes externas que puedan generar ruido cercano a la estación de acelerógrafo se puede observar mayor factor de amplitud pero la frecuencia predominante está ajustada a los rangos de las horas propicias para la determinación de una frecuencia fundamental clara.

Se puede observar en la curva que hay dos picos cercanos a la frecuencia fundamental que en el caso de las horas con mayor actividad se pronuncian más, en el caso de las horas de las 2 de la mañana a las 3 de la mañana los picos de frecuencia no se encuentran tan pronunciados.

Según la clasificación de la zonificación sismogeotécnica, el sitio en donde se encuentra ubicado la estación de la rosita corresponde a la zona 1 relacionada con suelos residuales competentes sobre el manto rocoso o cualquier depósito que se pueda considerar como roca pura, la clasificación geotécnica del lugar está relacionada con la formación Bucaramanga del miembro órganos afectados por los procesos de erosión y comprendido por los escarpes de la meseta de Bucaramanga. [45], [46] y [47].

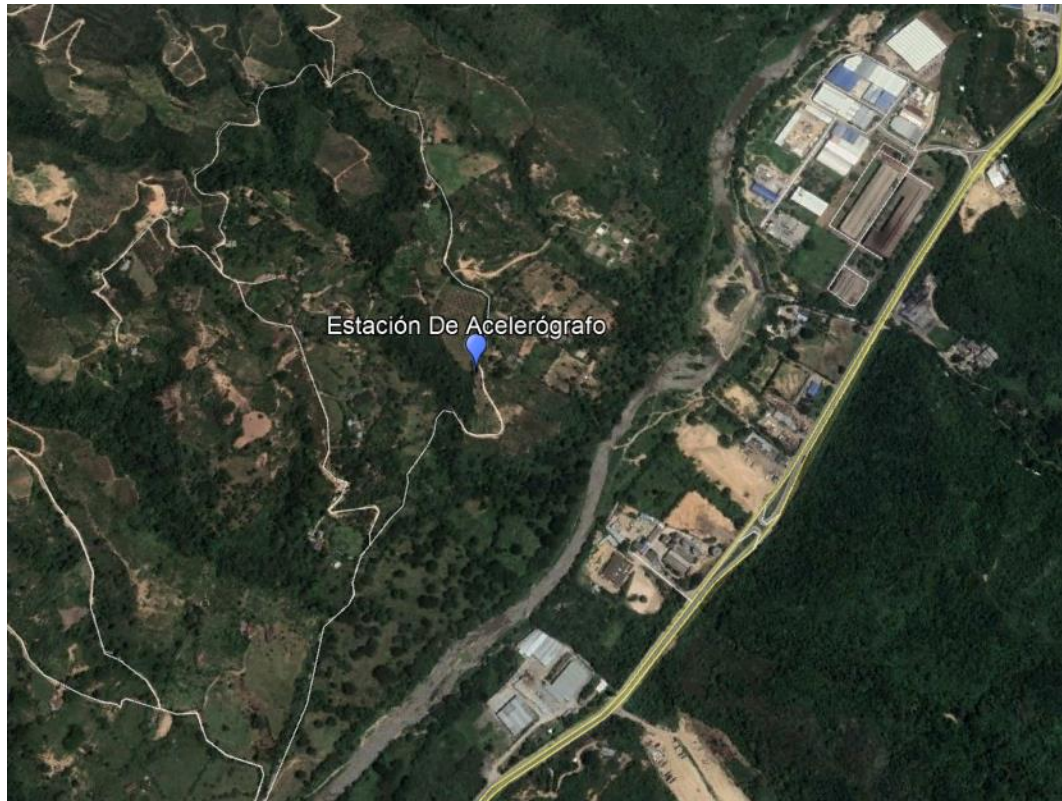
Un dato curioso del resultado del procesamiento de las estaciones Provenza, La rosita y Campohermoso es que si nos fijamos en las gráficas de las figuras correspondientes a cada una de estas estaciones que son las (figuras 40 y 41), las (figuras 46 y 47) y las (figuras 31 y 32) podemos observar que a la hora 4:00 que viene siendo las 4 de la mañana hora local Colombia hay un pico de frecuencia cercano a los 0,7 Hz, resulta que el procesamiento que se le realizó a estas tres estaciones corresponde a el mismo día, 24 de agosto de 2018 y en ese preciso instante de tiempo ocurrió un terremoto de magnitud 7,1 en la frontera de Perú con Brasil, registrado por el servicio geológico de Estados Unidos [48].

El evento sísmico ocurrió a las 9:04 hora UTC que corresponde a las 4:04 am hora local de Perú y Colombia a las 4:04 am hora local colombiana a 630 km de profundidad, el pico de frecuencia que observamos en las tres gráficas corresponde al movimiento telúrico que alcanzó a ser registrado por las estaciones de acelerógrafos.

5.7 ESTACIÓN DE CARRIZAL

La estación de carrizal se encuentra ubicada en la localidad de carrizal en Girón, Santander en las coordenadas $7^{\circ} 8'3.59''$ N, $73^{\circ} 9'36.68''$ O. La ubicación de la estación de acelerógrafo se puede observar en la figura 48.

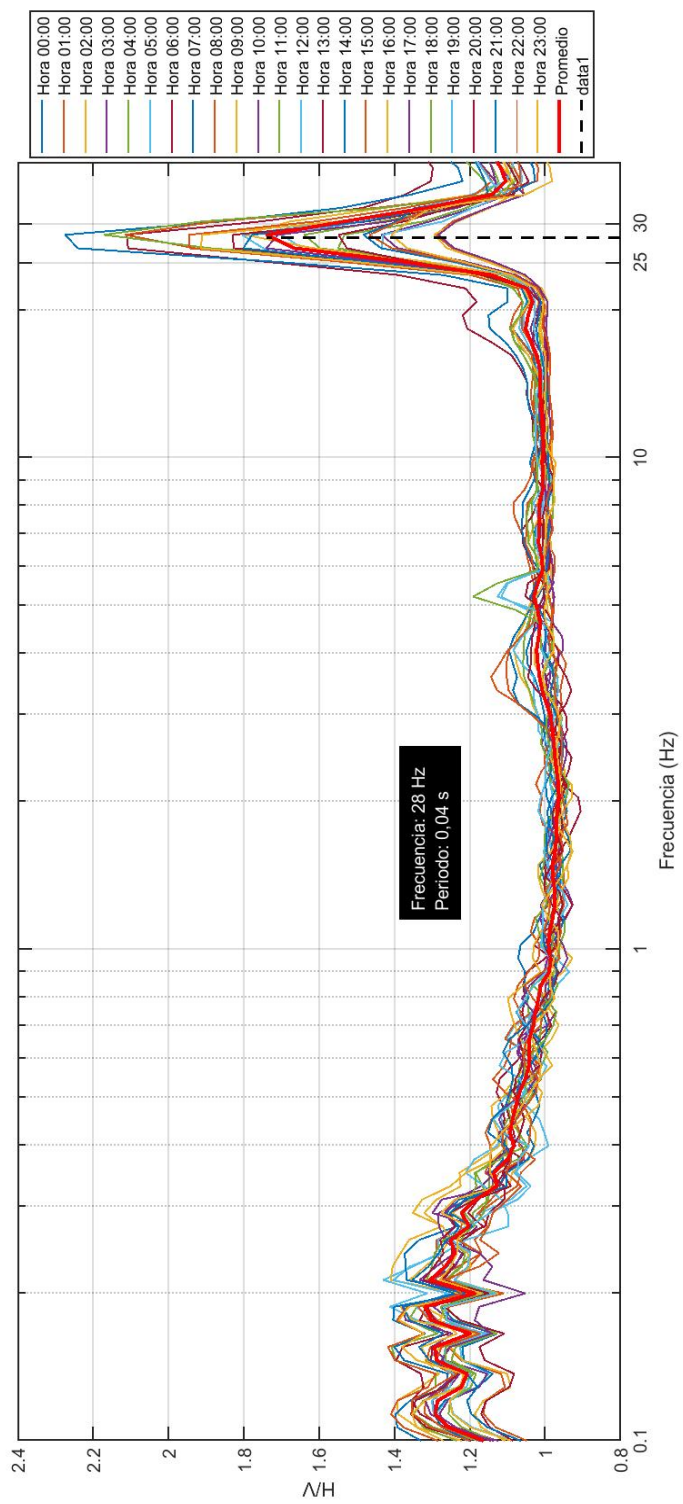
FIGURA 48. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE CARRIZAL.



Fuente: Google Earth

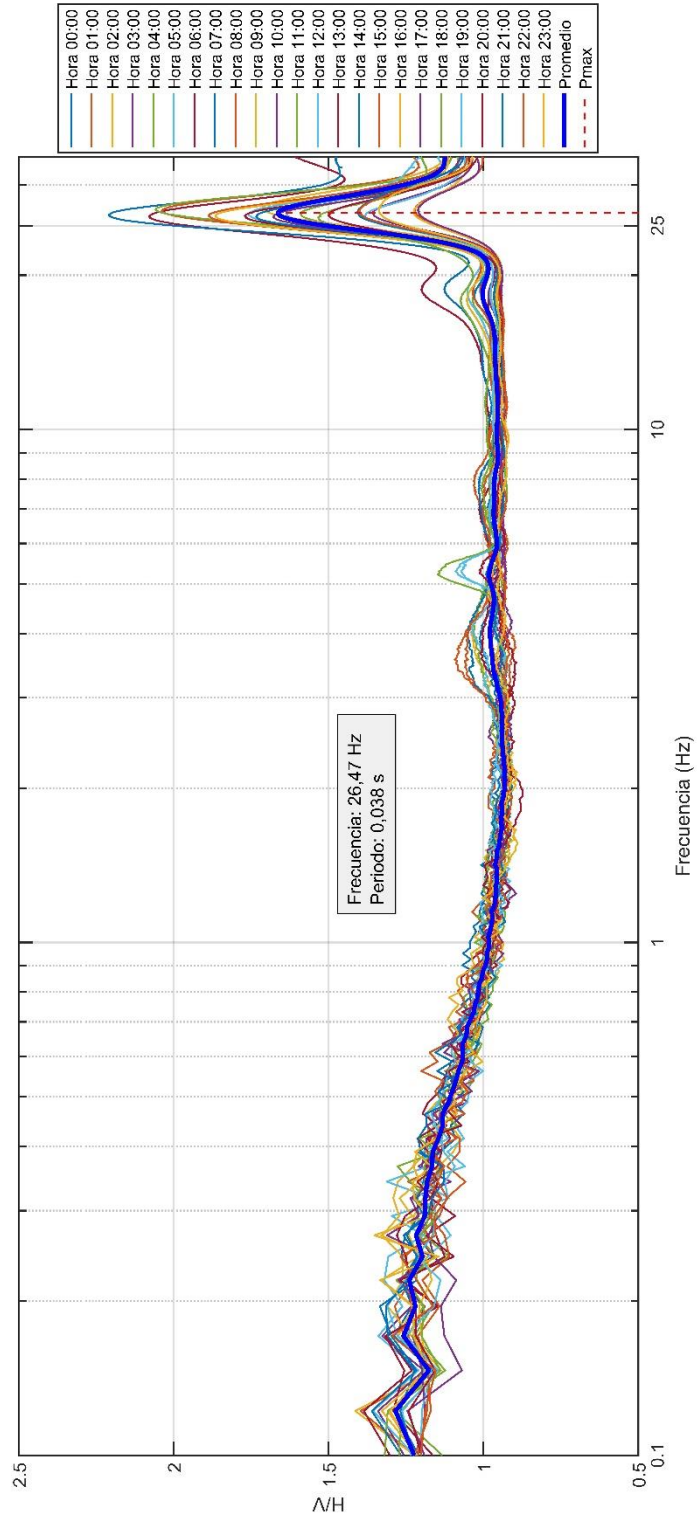
El procesamiento en esta estación se realizó con el registro que corresponde a el día 24 de julio de 2015 y continuando con la misma metodología de análisis se procesaron las 24 horas del día. En las figuras 49 y 50 se encuentra la gráfica del procesamiento de las vibraciones ambientales del sitio en donde se encuentra ubicada la estación de carrizal. Los resultados del procesamiento en esta estación indican que la frecuencia predominante está en el rango de los 27 a 28 Hz para un periodo fundamental de aproximadamente 0,04 segundos.

FIGURA 49. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE CARRIZAL CON GEOPSY



Fuente: Autor

FIGURA 50. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE CARRIZAL CON OPENHVS



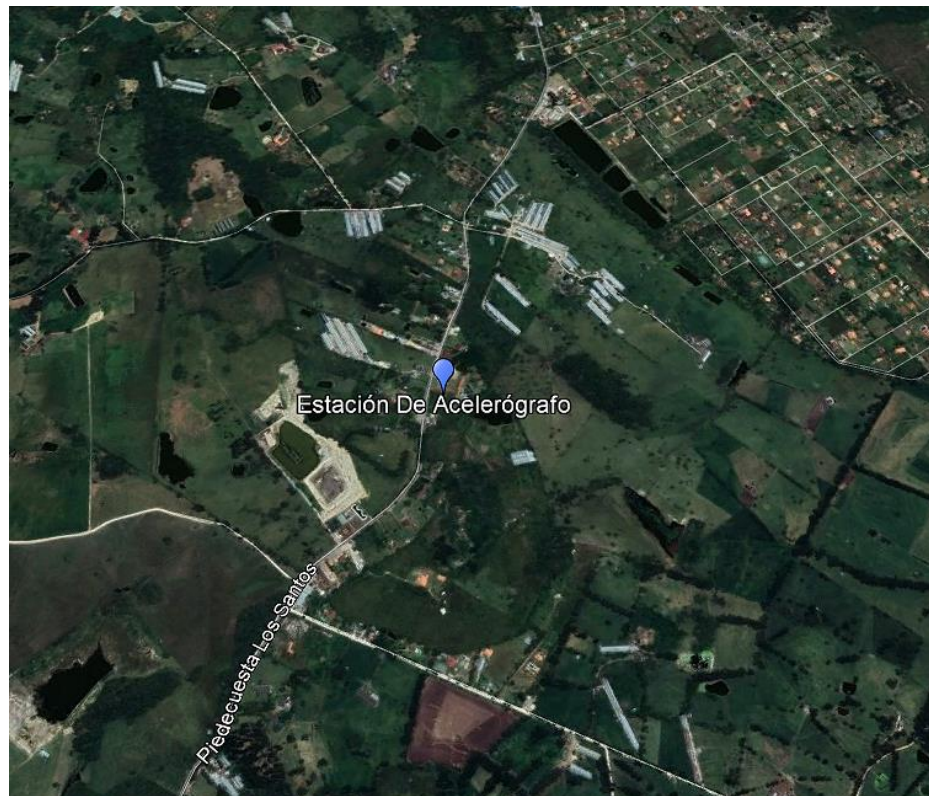
Fuente: Autor

Según la clasificación sismogeotécnica, la ubicación del acelerógrafo corresponde a la zona 1 a los depósitos de roca correspondientes a la formación girón, el lugar se encuentra conformado por rocas sedimentarias fracturadas por el fallamiento geológico ya que se encuentra en un sistema de fallas activas, el sistema de fallas de Suarez. [45], [46] y [47]. La frecuencia fundamental de los resultados del procesamiento se puede relacionar con la información geológica y sismogeotécnica del lugar.

5.8 ESTACIÓN DE LOS SANTOS

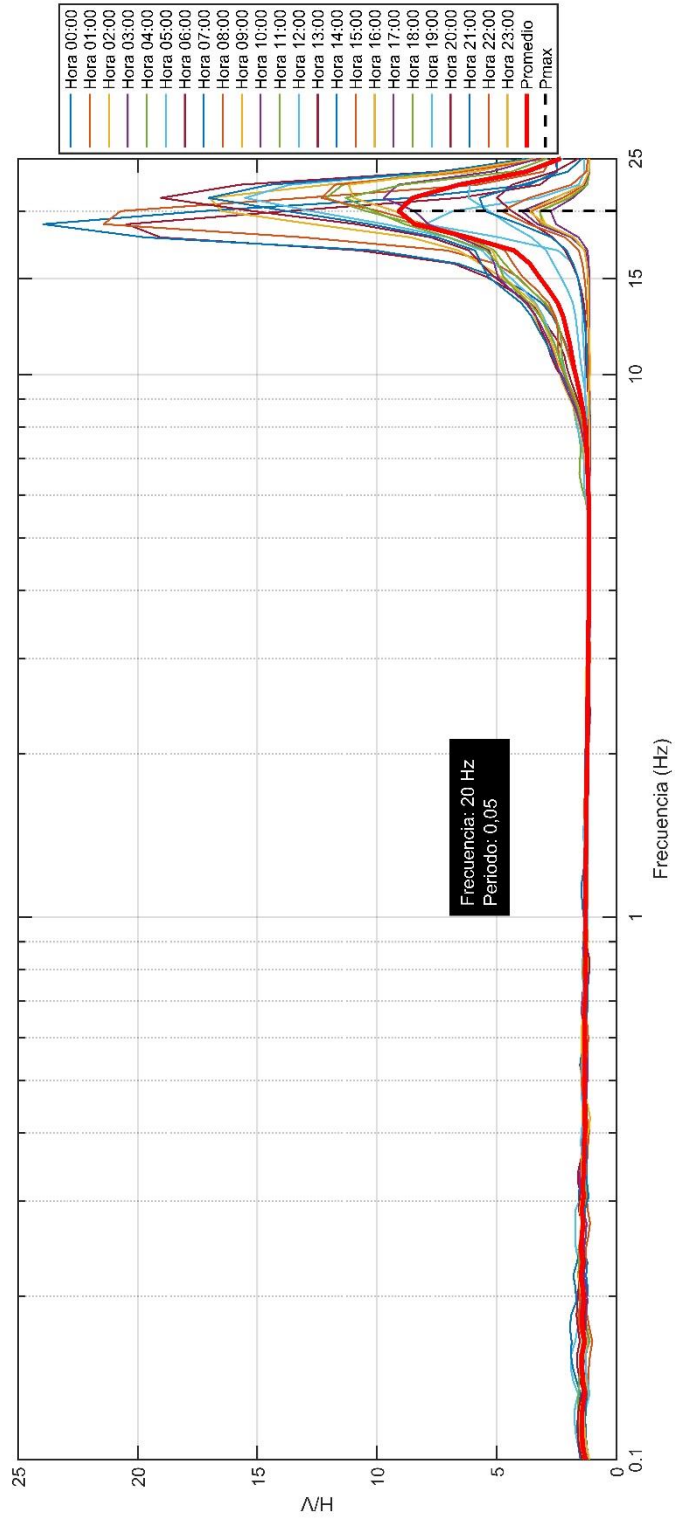
La estación de los santos se encuentra ubicada en un sitio específico cerca al municipio de los santos, Santander en las coordenadas $6^{\circ}53'50.71''$ N, $73^{\circ} 2'9.64''$ O. La ubicación más detallada de la estación de acelerógrafo se puede observar en el mapa de la figura 51 y el procesamiento se puede observar en las figuras 52 y 53.

FIGURA 51. ESTACIÓN DE ACELERÓGRAFO DE LOS SANTOS



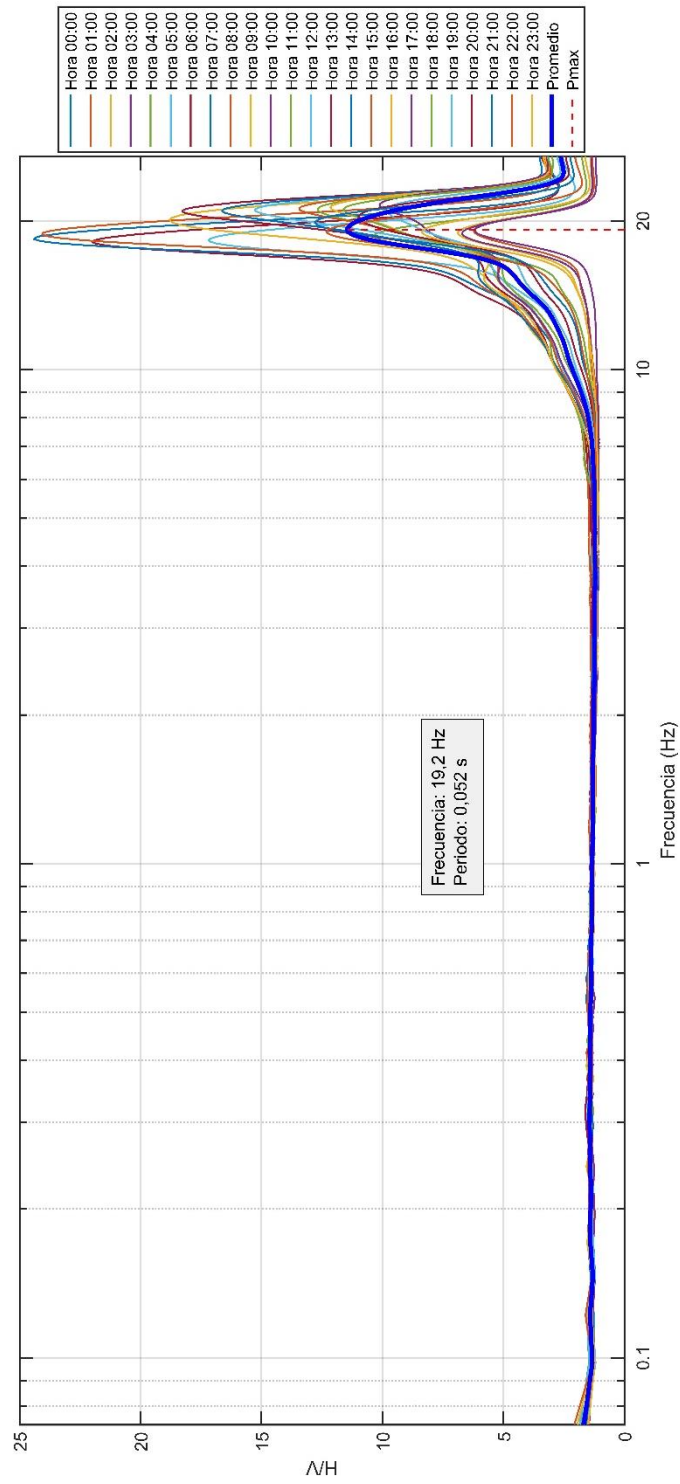
Fuente: Google Earth

FIGURA 52. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE LOS SANTOS CON GEOPSY



Fuente: Autor

FIGURA 53. PROCESAMIENTO DE LA ESTACION DE LOS SANTOS CON OPENHVSR



Fuente: Autor

El procesamiento de esta estación corresponde al día 24 de agosto de 2018, para efectos de análisis se procesó las 24 horas del día para determinar la frecuencia que predomina a las diferentes horas del día.

Analizando la gráfica podemos observar un factor de amplificación que aumenta a medida que transcurre el día esto por las condiciones de fuentes externas que pueden generar ruido. La frecuencia fundamental está en el rango de los 20 Hz para un periodo fundamental de 0,05 segundos en el sitio de análisis que es donde se encuentra ubicado el acelerógrafo.

En las áreas comprendidas por la mesa de los santos se pueden encontrar diferentes unidades geológicas relacionadas a formaciones de rocas sedimentarias y rocas ígneas como las formaciones de los santos, formación Jordán, formación silgara, formación paja, formación tablazo. [49]

Los picos de frecuencia presentados en el transcurso del día demuestran una amplificación del suelo esto sumado a las condiciones topográficas en las que se presenta el lugar de análisis y las conformaciones geológicas que encontramos en el sitio. Con respecto a la vulnerabilidad sísmica puede verse afectadas las poblaciones con estructuras de bajo periodo de vibración ya que los rangos de periodo fundamental son bajos y puede haber una amplificación de ondas sísmicas al momento de un evento sísmico de magnitud considerable.

En el estudio de zonificación Sismogeotécnica del área metropolitana de Bucaramanga realizado en el año 2001 se realizaron análisis de sitios específicos alrededor de las diferentes localidades de Bucaramanga, se determinaron periodos fundamentales que comprendían los rangos de 0,05 a 0,3 segundos, estos periodos corresponden a periodos bajos de vibración y están relacionados con las características de los sitios analizados, asimismo con los parámetros de procesamiento que se emplearon para el cálculo de los periodos fundamentales. [50] y [51]

6. CONCLUSIONES

- Se realizó la revisión exhaustiva del estado del arte relacionado con la temática de la determinación de los periodos fundamentales del suelo también respecto al empleo de la técnica Nakamura o método del cociente espectral resulto ser una técnica muy útil para la determinación de la frecuencia fundamental del suelo y es una de las técnicas que se pueden realizar sin la necesidad de esperar registros de eventos sísmicos, solamente con el procesamiento de las vibraciones ambientales del suelo en lugares donde haya un control del sitio de medición.
- De acuerdo con el registro constante de cada una de las estaciones de acelerógrafos se realizó la selección de los datos de vibraciones ambientales de días específicos que cumplieran con el tiempo de grabación de las 24 horas del día para dar paso a la manipulación y procesamiento de las señales de vibración ambiental.
- Para el procesamiento de las vibraciones ambientales se emplearon los softwares de procesamiento de señales GEOPSY y Matlab con un programa de análisis de señales OPENHVSF, las dos herramientas están soportadas por dos proyectos de investigación de alta importancia a nivel mundial que colabora con los temas de procesamiento de señales de vibración ambiental para la aplicación del método del cociente espectral. Se pudo observar que los dos programas trabajan siguiendo una misma mecánica ya que se emplean parámetros de procesamiento similares y los resultados que arrojan tiene una similitud, con esto se puede esperar resultados confiables en ambas herramientas.
- Se calcularon los periodos fundamentales del suelo en cada una de las estaciones de la red de acelerógrafos de Bucaramanga siguiendo una metodología planteada para el procesamiento de las señales de vibración ambiental. Los periodos fundamentales del suelo de las estaciones varían en el rango de los 0,035 segundos a los 0,07 segundos. En el procesamiento de la estación de villa helena no hubo claridad de la frecuencia fundamental del suelo ya que como resultado se obtuvieron datos aleatorios en cada hora de procesamiento y no hubo un pico claro de frecuencia, puede ser por las condiciones del entorno al que se ve afectado la estación de acelerógrafo, puede ser por las condiciones sismogeotécnica y

geológicas del lugar ya que en ese sitio es propenso a que ocurran deslizamientos y está conformado por un sistema de fallas geológicas, las fallas de santa marta-Bucaramanga.

- Según los resultados del procesamiento de las vibraciones ambientales en cada uno de los sitios que conforman la red de acelerógrafos de Bucaramanga, el suelo presenta periodos bajos de vibración (Ver Tabla 8). En los lugares con condiciones topográficas más elevadas como en el caso de las estaciones Morrórico y Carrizal, presentaron periodos de vibración bajos en el rango de 0,035 y 0,04 segundos respectivamente, comparado con las otras estaciones. Las condiciones geológicas para esos dos lugares están relacionadas con la formación neis para Morrórico y la formación girón para carrizal.

TABLA 8. PERIODOS FUNDAMENTALES ESTACIONES DE ACELEROGRAFO

N°	Estación	Ubicación	Frecuencia	Periodo Fundamental
1	Campohermoso	7° 6'2.70"N 73° 8'26.52"O	16 Hz	0,06 s
2	Nazareth	7° 8'4.24"N 73° 7'57.72"O	15 Hz	0,066 s
3	Morrórico	7° 7'59.74"N 73° 6'24.91"O	28 Hz	0,035 s
4	Provenza	7° 4'56.06"N 73° 6'45.61"O	16 Hz	0,06 s
5	Villa Helena	7° 9'16.34"N 73° 7'35.80"O	No claro	No Claro
6	La Rosita	7° 6'40.28"N 73° 7'29.24"O	21 Hz	0,047 s
7	Carrizal	7° 8'3.59"N 73° 9'36.68"O	28 Hz	0,04 s
8	Los Santos	6°53'50.71"N 73° 2'9.64"O	20 Hz	0,05 s

Fuente: Autor

- Los suelos de las estaciones de Campo Hermoso, Provenza, La rosita y Nazareth están relacionadas con sitios de condiciones geológicas correspondientes a la formación Bucaramanga los periodos de vibración tienden a rangos de 0,047 a 0,07 segundos.
- El suelo en la estación Mesa de Los santos muestra un periodo fundamental en el rango de los 0,05 segundos, en el procesamiento se pudo observar que fue una de las estaciones con un factor de amplificación más alto.
- Aunque los periodos fundamentales calculados en cada una de las estaciones no se encuentran en los rangos de esa zonificación de periodos realizada en el 2001, los periodos calculados no se encuentran en un rango alejado que contraría los resultados de esa zonificación ya que las características de los periodos calculados se pueden relacionar con las condiciones de los sitios de cada una de las estaciones ya que se encuentran en bases de suelo tipo roca o suelos competentes que presentan periodos bajos de vibración.

7. RECOMENDACIONES

- El estudio de la frecuencia fundamental del suelo trae consigo diferentes aplicaciones que sirven como planeación para diversos proyectos de investigación que la universidad de Santander UDES puede ir vinculando en los diferentes programas de ingenierías y programas relacionados con tema.
- Hay que tener en cuenta que la frecuencia fundamental del suelo depende de las características geológicas, topográficas y morfológicas del suelo asimismo de su composición mineralógica, ya que estos factores importantes determinan la caracterización dinámica del suelo.
- También se debe tener en cuenta que el registro de las vibraciones ambientales se realizan en puntos específicos de algún lugar y los resultados que pueden darse en esos sitios también están determinados por las condiciones en las cuales se realizó el registro de las vibraciones ambientales, ya que en sitios con condiciones de alto ruido externo o de condiciones geológicas importantes como lo puede ser sistemas de fallas o composiciones de suelo singulares puede afectar en cierto grado el resultado o puede ser confuso la determinación de una frecuencia fundamental del suelo como tal.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ESPÍNDOLA CASTRO. Víctor, PÉREZ CAMPOS. Xyoli, ¿Qué son los SISMOS, ¿dónde ocurren y cómo se miden?, Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- [2] GUTIÉRREZ MARTÍNEZ. Carlos, QUAAS WEPPEN. Roberto, ORDAZ SCHROEDER. Mario, GUEVARA ORTÍZ. Enrique, MURIÁ VILÁ. David, KRISHNA SINGH. Shri. SISMOS-SERIE FASICULOS, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- [3] ¿Porque ocurren los terremotos?, Education & Outreach Series. [Online]. Available: https://www.iris.edu/hq/files/publications/brochures_onepagers/doc/SpOnePager2.pdf [Accessed: 03-Mar-2019]
- [4] RODRÍGUEZ. Miroslav Biología marina y oceanografía: conceptos y procesos GEOMORFOLOGÍA Y TECTÓNICA DE PLACAS, Capitulo 6 Tectónica de Placas, 2004
- [5] Teoría de las Placas Tectónicas (Origen del Relieve). [Online] Available: http://www.mardechile.cl/index.php?Itemid=66&id=41&option=com_content&task=view [Accessed: 04-Mar-2019]
- [6] ¿POR QUÉ HAY TANTOS TERREMOTOS EN CHILE?, 2015 [Online]. Available: <https://mas100cia.blogspot.com/2015/10/por-que-hay-tantos-terremotos-en-chile.html> [Accessed: 04-Mar-2019]
- [7] M. Pagani, J. Garcia-Pelaez, R. Gee, K. Johnson, V. Poggi, R. Styron, G. Weatherill, M. Simionato, D. Viganò, L. Danciu, D. Monelli (2018). Global Earthquake Model (GEM) Seismic Hazard Map (version 2018.1 - December 2018), DOI: 10.13117/GEM-GLOBAL-SEISMIC-HAZARD-MAP-2018.1
- [8] Earthquakes: the 10 biggest in history, 2011 [Online]. Available: <https://www.australiangeographic.com.au/topics/science-environment/2011/03/earthquakes-the-10-biggest-in-history> [Accessed: 05-Mar-2019]
- [9] Earthquake Hazards Program, 20 Largest Earthquakes in the world, USGS, Science for changing world, [Online]. Available: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/largest-world.php>, [Accessed: 07-Mar-2019]

- [10] PRIETO. German, BEROZA. Gregory, BARRETT. Sarah, LÓPEZ. Gabriel, FLOREZ. Manuel. Earthquake nests as natural laboratories for the study of intermediate-depth earthquake mechanics. *Tectonophysics*. s 570–571. 42–56. 10.1016/j.tecto.2012.07.019. (2012).
- [11] ZARIFI. Zoya, HAVSKOV. Jens. Characteristics of dense nests of deep and intermediate-depth seismicity. *Advances in Geophysics*. 46. 237-278. 10.1016/S0065-2687(03)46004-4, (2003).
- [12] SGC, Servicio Geológico Colombiano, Portal Web. [Online]. Available: <https://www.sgc.gov.co> [Accessed: 10-Mar-2019]
- [13] A 143 años del Terremoto de Cúcuta, la ciudad sigue sin resguardos, COLOMBIA INFORMA,2018. [Online]. Available: <http://www.colombiainforma.info/a-143-anos-del-terremoto-de-cucuta-la-ciudad-sigue-sin-resguardos/> [Accessed: 12-Mar-2019]
- [14] Terremoto de Popayán, 35 años de una tragedia que no se olvida, Noticiero 90 Minutos, 2018. [Online]. Available: <https://90minutos.co/terremoto-de-popayan-35-anos-de-una-tragedia-que-no-se-olvida/> [Accessed: 12-Mar-2019]
- [15] 20 años del terremoto que tumbó al 75% de Armenia, EL PAIS. (2019). [Online]. Available: <https://www.elpais.com.co/colombia/20-anos-del-terremoto-que-tumbo-al-75-de-armenia.html> [Accessed: 12-Mar-2019]
- [16] “marzo 2015 - Sismo en Los Santos, Departamento de Santander, Colombia en el 2015”. OPS. Organización Panamericana de la salud, 2015. [Online]. Available: https://www.paho.org/disasters/index.php?option=com_content&view=article&id=2342:earthquake-hit-los-santos-department-of-santander-colombia&Itemid=1057&lang=es [Accessed: 12-Mar-2019]
- [17] “Viviendas averiadas por el sismo en Santander ascienden a 1.863” VANGUARDIA,2015. [Online]. Available: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/viviendas-averiadas-por-el-sismo-en-santander-ascienden-a-1863-NAVL303781> [Accessed: 12-Mar-2019]
- [18] ZAFRA OTERO. Diego. ONDAS SÍSMICAS, su importancia para la geofísica y la humanidad, Escuela de física, Universidad Industrial de Santander, 2017

- [19] Biblioteca Digital del Instituto Latinoamericano de la comunicación Educativa, Organismo Internacional. [Online]. Available: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/34/html/sec_8.html [Accessed: 27-Feb-2018].
- [20] SÁEZ. Miguel. Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago. Santiago de Chile, 2016, 96p, Tesis para optar al grado de magister en ingeniería sísmica, Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Departamento de ingeniería civil
- [21] Compendio de Trabajos de Investigación CNDG – Biblioteca Instituto Geofísico del Perú. V. 7 p. 81 – 88. (2006)
- [22] BOLT. Bruce Encyclopedia Britannica Inc. Earthquake, 2018. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/earthquake-geology/Shallow-intermediate-and-deep-foci>. [Accessed: 05-Mar-2018]
- [23] BOORE. David The Richter scale: its development and use for determining earthquake source parameters Tectonophysics, 166 1-14 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam - Printed in The Netherlands, 1989
- [24] DENTON. Paul. Earthquake magnitude British geological survey, natural environment research council. [Online]. Available: <https://www.bgs.ac.uk/downloads/directDownload.cfm?id=661&noexcl=true&t=Earthquake%20magnitude> [Accessed: 22-Mar-2019]
- [25] BARUAH. Santanu, BARUAH. Saurabh, BORA. P, DUARAH. R, KALITA, BISWAS. Rajib, GOGOI. N, KAYAL. J. Moment Magnitude (M_W) and Local Magnitude (M_L) Relationship for Earthquakes in Northeast India. Pure and Applied Geophysics. 169. 10.1007/s00024-012-0465-9. 2012
- [26] ESCALA DE RICHTER Y DE MERCALLI, BIO Y GEO. [Online]. Available: <https://bioygeologia.weebly.com/escala-de-richter-y-de-mercalli.html> [Accessed: 22-Mar-2019]
- [27] Las escalas de Richter y Mercalli. EL PORTAL DE LOS EXPERTOS EN PREVENCIÓN DE RIESGOS DE CHILE, SIGWEB. [online]. Available: <http://www.sigweb.cl/wp-content/uploads/biblioteca/RichterMercalli.pdf> [Accessed: 22-Mar-2019]

- [28] NEUMANN. Frank, WOOD. Harry, Modified Mercalli Intensity Scale of 1931, National Emergency Training Center, page 277
- [29] LAS CATÁSTROFES NATURALES [online]. Available: http://www.joaquinrodriguezpiaya.es/2_Bachillerato_Ciencias_Tierra/Las_catastrofes_naturales/Las_catastrofes_naturales.html [Accessed: 22-Mar-2019]
- [30] Escala Macrosísmica europea 1998, EMS – 98, Comisión Sismológica Europea, Editor: G. Grünthal, Edición Española: F. Lorenzo Martín. HAMBURGO, 2008.
- [31] Escala macrosísmica europea, WIKIPEDIA La Enciclopedia Libre. [online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Escala_macros%C3%ADsmica_europea [Accessed: 22-Mar-2019]
- [32] ACEVEDO. Beatriz. Criterios sismológicos para seleccionar acelerogramas reales de la red nacional de acelerógrafos de Colombia para su uso en análisis dinámicos, Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 17, p. 57-70. Colombia, 2012
- [33] SALAS. Alejandra INFLUENCIA DE LA AMPLIFICACIÓN LOCAL DE LAS ONDAS SÍSMICAS Y LA INTERACCIÓN SUELO-FUNDACIÓN EN EL PUENTE MARGA-MARGA. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Santiago, Chile. 2007
- [34] RITTA. Raúl, SUAREZ. Luis, PANDO. Miguel DETERMINACIÓN DEL PERÍODO FUNDAMENTAL DEL SUELO USANDO VIBRACIÓN AMBIENTAL Y EL COCIENTE ESPECTRAL HORIZONTAL/VERTICAL. Mecánica Computacional Vol. XXXI, págs. 1399-1419. Salta, Argentina, 2012.
- [35] NAKAMURA. Yutaka. A method for dynamic characteristics estimation of Subsurface using microtremor on the ground surface. Geotechnical Eng. and Disaster Prevention Laboratory QR of RTRI, Vol 30, No 1, 25-33.1989.
- [36] JIMÉNEZ. Cesar. PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES SÍSMICAS CON MATLAB, Revista de Investigación de Física. Vol. 10 N° 2 45-50, Sismología, Instituto Geofísico del Perú. 2007
- [37] VALLIANATOS. Filippos, HLOUPIS. George HVSR Technique Improvement Using Redundant Wavelet Transform Department of Natural Resources and Environment, Technological Educational Institute of Crete, Grecia. 2009

- [38] NAKAMURA. Yutaka. CLEAR IDENTIFICATION OF FUNDAMENTAL IDEA OF NAKAMURA'S TECHNIQUE AND ITS APPLICATIONS. System and Data Research Co. Ltd., 3-25-3 Fujimidai, Kunitachi-shi, Tokyo. 2000
- [39] MOKHBERI. Mokhberi. Vulnerability Evaluation of the Urban Area Using the H/V spectral Ratio of Microtremors. Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Estahban Branch, Estahban, Iran, 2015
- [40] STANKO. Davor, MARKUŠIĆ. Snježana, STELEC. Stjepan, GAZDEK. Mario. HVSR analysis of seismic site effects and soil-structure resonance in Varaždin city (North Croatia), Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Varaždin(North Croatia),2017
- [41] BARD, Pierre & SESAME team. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibration measurements, processing and interpretation. 62p. SESAME European research project, 2005
- [42] BIGNARDI. Samuel, MANTOVANI. Ambra, ABU ZEID. Nasser. OpenHVSR: imaging the subsurface 2D/3D elastic properties through multiple HVSR modeling and inversion. Computers & Geosciences, 2016
- [43] BIGNARDI. Samuel, YEZZI. Anthony, FIUSSELLO. Simone, COMELLI. Albert. OpenHVSR -Processing Toolkit: Enhanced HVSR processing of distributed microtremor measurements and spatial variation of their informative content. Computers & Geosciences. 2018
- [44] KONNO. Katsuaki, OHMACHI. Tatsuo. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998
- [45] RUBIANO. Diana, ALVARADO. Carlos, MARTINEZ. Alejandro. Mapa de Zonificación Sismogeotécnica Indicativa, Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Amenazas Geoambientales, Escala 1:25000. Plano 5.1, 2001.
- [46] CARRILLO. Edgar, CASTRO. Eduardo, IBAÑEZ. Diego, VERGARA. Heyley. Mapa Geológico. Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Amenazas Geoambientales, Escala 1:25000. Plano 1.1, 2001.
- [47] CARRILLO. Edgar, CASTRO. Eduardo, IBAÑEZ. Diego, GARCIA. Jesús, SUAREZ. Jaime. Mapa de zonificación Geotécnica. Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del área

metropolitana de Bucaramanga. Amenazas Geoambientales, Escala 1:25000. Plano 3.5, 2001.

[48] Earthquake Hazards Program, M 7.1 - 140km WNW of Iberia, Peru, USGS, Science for changing world, [Online]. Available: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000ggj4/executive>, [Accessed: 30-Mar-2019]

[49] DÍAZ. Eliana, CONTRERAS. Nathalia, PINTO. Jorge, VELANDIA. Francisco, MORALES. Julio, HINCAPIE. Gloria. Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de Los Santos, Santander. Boletín de geología. 2009

[50] MARTINEZ, Samuel. OJEDA, Anibal. Mapa de Isoperíodos. Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Amenazas Geoambientales, Escala 1:25000. Plano 4.1, 2001.

[51] ZONIFICACIÓN SISMOGEOECNICA INDICATIVA DEL AREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA, Subdirección de Amenazas Geoambientales, Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear- INGEOMINAS, 2001