

**COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE VIVIENDAS CON  
CUBIERTA VERDE EN EL MUNICIPIO DE SOACHA**

**Luisa Fernanda Olaya Rodríguez**

**Diego Alejandro Rubio Pulido**



**Director: Ing. Daniel Mauricio Ruiz Valencia**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diciembre 2013**

## TABLA DE CONTENIDO

p.

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
1.1	JUSTIFICACIÓN .....	9
1.2	OBJETIVOS .....	11
1.2.1	Objetivo general.....	11
1.2.2	Objetivos específicos .....	11
1.3	ALCANCE.....	11
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
2.1	MODELACION POR ELEMENTOS FINITOS .....	13
2.2	ANÁLISIS DE VIBRACIONES AMBIENTALES.....	16
2.2.1	Oscilador simple .....	17
2.2.2	Espectros de Fourier .....	21
2.2.3	Función de transferencia.....	22
2.2.4	Equipos de medición.....	23
2.3	VIVIENDA PREFABRICADA BAJO ESTUDIO. ....	24
2.3.1	Materiales.....	25
2.3.1.1	Paneles de concreto.....	25
2.3.1.2	Perfiles metálicos .....	26
2.3.1.3	Tejas en fibrocemento.....	26
2.3.2	Tipología estructural .....	26
2.4	TECHOS VERDES.....	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>30</b>

3.1	ASPECTOS GENERALES .....	30
3.1.1	Descripción de la vivienda.....	30
3.1.2	Ubicación geográfica. ....	34
3.1.3	Disposición del techo verde.....	35
3.1.4	Caracterización sísmica. ....	37
3.2	MEDICIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES.....	40
3.2.1	Análisis de vibraciones .....	40
3.2.2	Ubicación de acelerómetros.....	41
3.2.3	Obtención de la función de transferencia.....	43
3.3	MODELACIÓN ANALÍTICA DE LA VIVIENDA.....	56
3.3.1	Materiales.....	56
3.3.2	Elementos estructurales. ....	57
3.3.3	Aplicación de Cargas .....	59
3.3.4	Periodo Fundamental Teórico y Porcentajes de participación de masa.....	63
3.3.5	Calibración del modelo.....	66
3.3.6	Casos de análisis, .....	67
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
4.1	COMPARACION DE PERIODOS.....	69
4.2	COMPARACION DE DERIVAS.....	69
4.3	COMPARACION DE ESFUERZOS.....	72
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>79</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>82</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
	FIGURA 2.1: COORDENADAS Y DESPLAZAMIENTOS EN LOS NODOS (I, J, M) (ADAPTADO REFERENCIA [TOVAR Y HUERTAS, 2008]) .....	15
	FIGURA 2.2: ESQUEMA DE OSCILADOR SIMPLE (ADAPTADO REFERENCIA [GARCÍA, 1998]) .....	17
	FIGURA 2.3: SISTEMA MÚLTIPLES GRADOS DE LIBERTAD. (ADAPTADO REFERENCIA [CHOPRA, 2001]). .....	19
	FIGURA 2.4: REGISTRO DE VIBRACIONES EN 3 DIRECCIONES PERPENDICULARES (GARCÍA, 1998) .....	20
	FIGURA 2.5: ESQUEMA SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	23
	FIGURA 2.6: ACCELERÓMETROS SÍSMICOS PIEZOELÉCTRICOS Y TARJETA DE ADQUISICIÓN .....	24
	FIGURA 2.7: VISITA DE CAMPO EN LA LOCALIDAD DE SOACHA .....	25
	FIGURA 2.8: TALLER PRESENTACIÓN TECHOS VERDES EN SOACHA – PROSOFI.....	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>30</b>
	FIGURA 3.1: PLANO ARQUITECTÓNICO VIVIENDA. UNIDADES: CENTÍMETROS (CM) .....	31
	FIGURA 3.2: ILUSTRACIÓN TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL Y ELEMENTOS PRINCIPALES.....	32
	FIGURA 3.3: PLANO UBICACIÓN PERFILES ESTRUCTURALES. UNIDADES: CENTÍMETROS (CM)...	32
	FIGURA 3.4: PERFIL ESQUINERO (E). UNIDADES: CENTÍMETROS (CM) .....	33
	FIGURA 3.5: PERFIL UNIÓN SIMPLE (U). UNIDADES: CENTÍMETROS (CM).....	33
	FIGURA 3.6: PERFIL TIPO 1 (1). UNIDADES: CENTÍMETROS (CM) .....	33

FIGURA 3.7: PERFIL VIGA TECHO (U). UNIDADES: CENTÍMETROS (CM).....	33
FIGURA 3.8: ILUSTRACIÓN VIGAS DE MADERA Y CUBIERTA A DOS AGUAS.....	34
FIGURA 3.9: UBICACIÓN GEOGRÁFICA CASA DE ESTUDIO (TOMADA DE GOOGLE EARTH) .....	34
FIGURA 3.10: ILUSTRACIÓN PENDIENTES ELEVADAS Y TERRENO EROSIONADO .....	35
FIGURA 3.11: PROCESO ADECUACIÓN BOTELLAS PET .....	36
FIGURA 3.12: DISTRIBUCIÓN TECHO VERDE INSTALADO .....	36
FIGURA 3.13: SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO.....	37
FIGURA 3.14: ESPECTRO DE ACELERACIONES PARA EL MUNICIPIO DE SOACHA.....	40
FIGURA 3.15: UBICACIÓN ACELERÓMETROS. VIVIENDA SIN TECHO VERDE. VISTA: TOP.....	41
FIGURA 3.16: UBICACIÓN ACELERÓMETROS. VIVIENDA SIN TECHO VERDE. VISTA: PERFIL FACHADA NORTE.....	42
FIGURA 3.17: UBICACIÓN ACELERÓMETROS. VIVIENDA CON TECHO VERDE. VISTA: TOP .....	42
FIGURA 3.18: UBICACIÓN ACELERÓMETROS. VIVIENDA CON TECHO VERDE. VISTA: PERFIL FACHADA NORTE.....	43
FIGURA 3.19: COMPORTAMIENTO DE LA ACELERACIÓN EN EL TIEMPO. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 1. ACELERÓMETRO 0 .....	43
FIGURA 3.20: COMPORTAMIENTO DE LA ACELERACIÓN EN EL TIEMPO. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 1. ACELERÓMETRO 1 .....	44
FIGURA 3.21: COMPORTAMIENTO DE LA ACELERACIÓN EN EL TIEMPO. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 1. ACELERÓMETRO 2 .....	44
FIGURA 3.22: COMPORTAMIENTO DE LA ACELERACIÓN EN EL TIEMPO. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 1. ACELERÓMETRO 3 .....	45
FIGURA 3.23: ESPECTRO DE FOURIER. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 1.....	45

FIGURA 3.24: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA CON TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 1. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	46
FIGURA 3.25: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA CON TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 2. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	47
FIGURA 3.26: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA CON TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 3. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	47
FIGURA 3.27: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA CON TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 4. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	48
FIGURA 3.28: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA CON TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 5. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	48
FIGURA 3.29: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA CON TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 6. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	49
FIGURA 3.30: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA CON TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 7. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	49
FIGURA 3.31: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA SIN TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 1. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	50
FIGURA 3.32: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA SIN TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 2. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	50
FIGURA 3.33: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA SIN TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 3. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	51
FIGURA 3.34: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA SIN TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 4. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	51

FIGURA 3.35: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA SIN TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 5. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	52
FIGURA 3.36: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA SIN TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 6. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	52
FIGURA 3.37: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA SIN TECHO VERDE. SENTIDO ESTE-OESTE. MEDICIÓN 7. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	53
FIGURA 3.38: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA CON TECHO VERDE. SENTIDO NORTE-SUR. MEDICIÓN 1. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	55
FIGURA 3.39: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. VIVIENDA CON TECHO VERDE. SENTIDO NORTE-SUR. MEDICIÓN 2. UNIDADES EJE X: HERTZ .....	55
FIGURA 3.40: PERFIL VIGA DE MADERA INTRODUCIDO EN SAP2000 .....	57
FIGURA 3.41: PERFIL UNIÓN SIMPLE INTRODUCIDO EN SAP2000.....	57
FIGURA 3.42: PERFIL ESQUINERO INTRODUCIDO EN SAP2000 .....	58
FIGURA 3.43: PERFIL TIPO 1 INTRODUCIDO EN SAP2000.....	58
FIGURA 3.44: PERFIL VIGA TECHO INTRODUCIDO EN SAP2000.....	58
FIGURA 3.45: MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA EN SAP2000 .....	59
FIGURA 3.46: CATALOGO TEJAS DE FIBROCEMENTO COLOMBIT P7 TOMADO DE SKINCO. ....	61
FIGURA 3.47: PÓRTICO EJE B, ASIGNACIÓN CARGA POR TEJADO Y TECHO VERDE .....	62
FIGURA 3.48: PÓRTICO EJE C, ASIGNACIÓN CARGA POR TEJADO Y TECHO VERDE .....	62
FIGURA 3.49: PÓRTICO EJE E, ASIGNACIÓN CARGA POR TEJADO Y TECHO VERDE.....	62
FIGURA 3.50: PÓRTICO EJE F, ASIGNACIÓN CARGA POR TEJADO Y TECHO VERDE.....	62
FIGURA 3.51: CREACIÓN CARGA SÍSMICA POR ESPECTRO DE ACELERACIONES NSR-10 PARA SOACHA.....	63

FIGURA 3.52: PARTICIPACIÓN DE MASA PARA CADA MODO DE VIBRACIÓN. VIVIENDA CON TECHO VERDE .....	64
FIGURA 3.53: MODO DE VIBRACIÓN NÚMERO 3. VIVIENDA CON TECHO VERDE. ....	65
FIGURA 3.54: PARTICIPACIÓN DE MASA PARA CADA MODO DE VIBRACIÓN. VIVIENDA SIN TECHO VERDE.....	65
FIGURA 3.55: MODO DE VIBRACIÓN NÚMERO 1. VIVIENDA SIN TECHO VERDE. ....	66
FIGURA 3.56: GRAFICA MODULO DE ELASTICIDAD EN FUNCIÓN DE LA RAÍZ DEL F' C (RUIZ, VACCA Y LEÓN, 2007).....	67
FIGURA 3.57: RELACIÓN NEWMARK AND HALL. RELACIÓN DE COEFICIENTE DE DISIPACIÓN Y PERIODO. TOMADO DE LA ATC-19.....	68
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
FIGURA 4.1: DERIVAS EN LA CUBIERTA DE LA ESTRUCTURA CON Y SIN TECHO VERDE, ANTE LA COMBINACIÓN 1,2 D + 1,0 (100Sx-30Sy).....	71
FIGURA 4.2: DERIVAS EN LA CUBIERTA DE LA ESTRUCTURA CON Y SIN TECHO VERDE, ANTE LA COMBINACIÓN 1,2 D + 1,0 (30Sx-100Sy).....	71
FIGURA 4.3: ESFUERZOS ACTUANTES SOBRE VIVIENDA SIN TECHO VERDE.....	73
FIGURA 4.4: ESFUERZOS ACTUANTES SOBRE VIVIENDA CON TECHO VERDE. ....	73
FIGURA 4.5: ESFUERZOS ACTUANTES SOBRE PÓRTICO 6 DE LA VIVIENDA SIN TECHO VERDE. ....	73
FIGURA 4.6: ESFUERZOS ACTUANTES SOBRE PÓRTICO 6 DE LA VIVIENDA CON TECHO VERDE....	73
FIGURA 4.7: ENSAYO A FLEXIÓN. DIAGRAMA DE DIMENSIONES Y APLICACIÓN DE CARGA. VISTA PERFIL. (MOGOLLÓN, 2013) .....	74
FIGURA 4.8: ENSAYO A FLEXIÓN. DIAGRAMA DE DIMENSIONES Y APLICACIÓN DE CARGA. VISTA TOP. (MOGOLLÓN, 2013).....	74



FIGURA 4.9: GRAFICA CARGA VERSUS DEFORMACIÓN. ENSAYO FLEXIÓN 1. (MOGOLLÓN, 2013) .....	75
FIGURA 4.10: GRAFICA CARGA VERSUS DEFORMACIÓN. ENSAYO FLEXIÓN 2. (MOGOLLÓN, 2013) .....	75
FIGURA 4.11: COMPARACIÓN DE ESFUERZOS S11 ESTRUCTURA CON Y SIN TECHO VERDE. COMBINACIÓN 1,2 D + 1,0 (100EX + 30EY) .....	76
FIGURA 4.12: COMPARACIÓN DE ESFUERZOS S11 ESTRUCTURA CON Y SIN TECHO VERDE. COMBINACIÓN 1,2 D + 1,0 (300EX + 100EY) .....	77
<b>5 CONCLUSIONES.....</b>	<b>79</b>
<b>6 BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>82</b>

# **1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 JUSTIFICACIÓN**

En Colombia el desplazamiento forzado como consecuencia de desastres ambientales, conflictos armados y otros factores económicos, sociales y políticos ha dejado un total de 5'445.406 personas afectadas entre los años 1985 y 2012 (CODHES, 2012). Bogotá D.C al ser la capital y centro económico y político del país atrae gran parte de esta población vulnerable. Según CODHES cerca de 41.246 personas ingresaron al Distrito Capital en el año 2011 por causa del desplazamiento, lo cual significa que aproximadamente 114 personas ingresaron diariamente. Adicionalmente, la insuficiente política estatal en cuanto a ayudas económicas y suministro de viviendas dignas y seguras, ha fomentado urbanizaciones no autorizadas en lugares de alto riesgo y construidas sin cumplir ningún requisito técnico, con materiales como mampostería no confinada, prefabricados e incluso lata, que son de poca confiabilidad y finalmente generan viviendas sísmicamente vulnerables.

Por otro lado, ante la escasez de suelo cultivable y zonas verdes que permitan una mejor calidad de vida y sostenibilidad ambiental dentro de las ciudades, se han desarrollado alternativas tales como las cubiertas verdes en edificaciones alrededor de todo el mundo, que ha llevado a los 'Techos verdes' a ser un tema recurrente en la actualidad, a tal punto que el Concejo de Bogotá ha tratado de implementar, promover y estimular el uso de tecnologías como esta mediante acuerdos (No. 338 DE 2009, No. 418 DE 2009 y 'Guía Técnica de Techos Verdes' mediante resolución 6423 de 2011.). Una de las ventajas de las cubiertas verdes es que son auto-sostenibles y al ser bien implementadas pueden aportar entradas económicas a los propietarios de las viviendas, es por esto que empiezan a ser utilizadas dentro de las poblaciones más vulnerables como en el municipio de Soacha.

Un factor importante en la utilización de cubiertas verdes es que aportan un peso extra, el cual es asumido por la estructura. La carga adicional que implica este tipo de cubiertas cambia dependiendo de variables como la dimensión de la cubierta, el tipo de vegetación que será implementada, la profundidad del sustrato y la capacidad de retención de agua de la vegetación y de la tierra orgánica, la cual es la que más variabilidad tiene en las condiciones que se presentan en la cotidianidad de Bogotá. En el caso de viviendas de interés prioritario en Soacha se observa un efecto significativo de las cargas, la tipología de la construcción se basa en cubrir alrededor de 1.5 m<sup>2</sup> con vegetación potencialmente productiva (lechugas, rábanos y cebollas) dentro de recipientes reciclables (botellas de gaseosa) y pueden ser clasificados como techos verdes livianos, esta tipología es la misma utilizada en los estudios de retención hídrica realizados por el ingeniero Andrés Torres, con el apoyo de la Pontificia Universidad Javeriana y el grupo Prosofi. Las cargas al ser estáticas no superan la resistencia de la vivienda, pero no se ha investigado qué sucede si el comportamiento es dinámico, por ejemplo ante cargas de viento o movimientos del terreno. Es importante aclarar que una carga dinámica se reconoce en aquellas situaciones en que la relación de la frecuencia de vibración de la carga externa sobre la de los osciladores este entre 0.5-1.5 Hertz de acuerdo con loa análisis de amplificación dinámica (García, 1998).

Por la falta de conocimiento alrededor del tema se propone realizar modelos numéricos y evaluar el comportamiento sísmico de estas estructuras, con y sin cubiertas verdes, ya que los propietarios deben conocer su situación de riesgo ante esta nueva implementación de sistema constructivo con cubiertas vegetales productivas.

El sistema estructural de una vivienda prefabricada es sísmicamente vulnerable desde su diseño, consiste en encajar módulos de placas con la ayuda de perfiles metálicos. A pesar de que la

fabricación de sus materiales sigue un proceso estandarizado, el sistema constructivo deja muchos campos abiertos para la incertidumbre con respecto a su comportamiento estructural. Además al aplicarle una carga extra de cubiertas verdes a este tipo de estructuras se puede observar un aumento en la vulnerabilidad de la estructura.

Durante este trabajo se realizará un estudio dinámico a una estructura prefabricada de un piso ubicada en la localidad de Soacha, la cual ya ha sido terminada y habitada por una familia de bajos recursos económicos que ven en la implementación de cubiertas verdes productivas una buena opción para la economía familiar.

Con mediciones en campo de las estructuras en su estado inicial (sin cubiertas verdes) y luego con un estado de cargas extras (con cubiertas verdes) se realiza una comparación de la respuesta sísmica de las estructuras.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

Establecer el comportamiento del sistema estructural de viviendas sísmicamente vulnerables de un piso con y sin cubiertas verdes en el municipio de Soacha.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Establecer la variación del periodo para viviendas sísmicamente vulnerables de un piso con y sin cubiertas verdes en el municipio de Soacha.

Evaluar la influencia de las cubiertas verdes en la estabilidad, resistencia y masa del sistema estructural de viviendas sísmicamente vulnerables de un piso en el municipio de Soacha.

## **1.3 ALCANCE**

Se busca por medio de este trabajo reconocer la situación de riesgo que puede llegar a experimentar una estructura prefabricada al recibir peso extra debido a la implementación de

cubiertas verdes. Gracias a estudios de vulnerabilidad sísmica en viviendas prefabricadas de un piso, en las cuales se implementó cubiertas verdes, se puede identificar la afectación que llegará a sufrir una estructura en términos de periodo, derivas y esfuerzos.

La comparación entre una situación con cargas normales en la vivienda prefabricada y la situación de cargas extras por la cubierta verde nos deja un punto de referencia importante para concluir la situación final de la estructura.

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 MODELACION POR ELEMENTOS FINITOS**

El método de elementos finitos (MEF) es utilizado en diversos problemas de ingeniería y física para la solución de ecuaciones diferenciales, es por esto que su aplicación ha tenido varias investigaciones por parte de diferentes autores, pero se deben reconocer como precursores a Turner, Topp, Martin y Clough, quienes publicaron un documento donde se profundizó el análisis numérico en 1956 (Celigüeta, 2011).

El MEF se basa en dividir en elementos finitos un medio continuo (estructura o cuerpo), los cuales son una serie de componentes individuales que no se interceptan entre sí, este procedimiento también se llama discretización. Por lo anterior la solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos, teniendo en cuenta que, como se menciona en el texto “Método de los Elementos finitos para el Análisis Estructural” de Juan Tomas Celigüeta, una estructura discreta se caracteriza porque su deformación se puede definir de manera exacta con la ayuda de un (1) número finito de parámetros.

El sistema completo se conforma por el ensamblaje de los elementos finitos y es una aproximación al medio continuo. El medio continuo tiene un comportamiento físico específico definido por ciertas ecuaciones integrales, al dividirse en elementos finitos estos parámetros se asocian a ciertos puntos característicos denominados “nodos” los cuales son los puntos de unión con los elementos adyacentes, “El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos.” (Tovar y Huertas, 2008). Para la solución del problema las incógnitas dejan de ser funciones matemáticas para ser valores de las funciones en los nodos, por lo cual el

comportamiento en el interior empieza a estar definido por el comportamiento en cada nodo utilizando funciones de interpolación o de forma.

Las funciones de interpolación o de forma son las que permiten la interrelación entre todos los nodos de la estructura para finalmente reducir el problema a la determinación de los desplazamientos de los nodos, los cuales sirven como punto de referencia para identificar los valores de desplazamiento en cualquier punto de la estructura.

Un medio continuo se puede deformar de infinitas formas sin que se relacionen unas con otras, por lo cual no se puede analizar únicamente con los parámetros finitos de una estructura discreta la configuración deformada de un medio continuo, se deben utilizar funciones vectoriales que indican las deformaciones de cualquier punto. En este punto es importante resaltar que este método no satisface algunas características del medio continuo; primero, puede que las funciones de interpolación elegidas no cumplan los requerimiento de continuidad de desplazamientos entre elementos adyacentes, por lo que no habría compatibilidad entre las fronteras entre unos y otros; segundo, al concentrar cargas equivalentes en los nodos, las condiciones de equilibrio solo se satisfacen en ellos y no se cumplirá en las fronteras de los elementos (Celigueta, 2011).

Entonces para el mejor entendimiento de MEF, se va a utilizar el sistema mostrado a continuación el cual se referencia en la tesis de grado de Edwin Tovar y Felipe Huertas. La deformada de un medio continuo en cualquier punto de la estructura se expresa con el vector  $u$ :

$$\bar{u} = \sum N_i a_i^e = \begin{bmatrix} N_i & N_j & \dots \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \bar{a}_i \\ \bar{a}_j \\ \dots \end{pmatrix} = N a^e \quad \text{E.C. 2.1.1}$$

Suponiendo un elemento finito que viene definido por líneas que definen su contorno y unen los nodos (i, j,...), para el caso de tensión plana, donde N son las funciones de posición dadas

(funciones de forma) y  $a^e$  es el vector formado por los desplazamientos nodales de los elementos considerados para tensión plana, como se muestra en la figura a continuación.

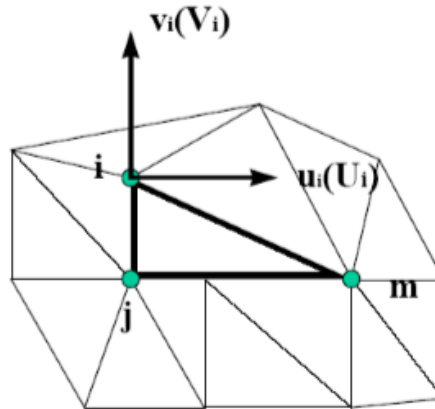


Figura 2.1: Coordenadas y desplazamientos en los nodos (i, j, m) (Adaptado referencia [Tovar y Huertas, 2008])

Debido a que un punto se puede mover de infinitas formas, las funciones  $N_i$ ,  $N_j$ ,  $N_k$  se deben escoger de tal forma que se obtengan las deformaciones  $\epsilon$  en cualquier punto del elemento, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\epsilon = Su \tag{EC 2.1.2.}$$

Donde  $S$  es el operador adecuado. Así mismo, si se reemplaza la ecuación 2.1.1 en la ecuación 2.1.2, se obtienen las siguientes expresiones:

$$\epsilon = Ba \tag{E.C. 2.1.3.}$$

$$B = SN \tag{E.C. 2.1.4.}$$

Suponiendo que el cuerpo al estar sometido a situaciones medioambientales como cambios térmicos tiene deformaciones iniciales, y que tiene esfuerzos internos residuales iniciales, la relación entre deformaciones y esfuerzos es:

$$\sigma = D(\epsilon - \epsilon_0) + \sigma_0 \tag{E.C. 2.1.5.}$$



Donde  $D$  es una matriz que contiene las propiedades del material. Solucionando la ecuación 2.1.5 se obtiene que los esfuerzos a tensión en cualquier parte del elemento se pueden calcular con:

$$\sigma = DBa^e - D\varepsilon_0 + \sigma_0 \quad \text{E.C. 2.1.6.}$$

## 2.2 ANÁLISIS DE VIBRACIONES AMBIENTALES

Uno de los factores de afectación constantes en edificaciones y construcciones son las vibraciones ambientales, las cuales a su vez afectan a los habitantes. Estas vibraciones pueden ser generadas por fenómenos naturales como viento, sismo o movimientos de la tierra causados por actividades antrópicas, como tráfico vehicular, actividad industrial o trabajos geotécnicos (Cifuentes, 2007).

Aprovechando estas vibraciones ambientales se pueden realizar estudios de respuesta sísmica a dichas estructuras o edificaciones ya construidas, las cuales están siendo estimuladas permanentemente, facilitando el registro de la respuesta dinámica. Debido a que el origen de las vibraciones es múltiple, pueden ser de procedencia cercana o lejana, y el recorrido atraviesa medios disímiles, estas son procesos aleatorios, por lo cual se deben tomar medidas en campo y llevar a cabo estudios detallados del movimiento de las partículas con la aceleración, velocidad y desplazamiento en la ubicación (Gutiérrez y Zabala, 2008)

Así mismo haciendo uso de un modelo previamente calibrado con los datos de la respuesta correspondiente a cada construcción se puede predecir el comportamiento de la estructura ante la presencia de cargas sísmicas. En este caso la calibración del modelo se realiza mediante el registro de la respuesta dinámica de la estructura ante señales de baja amplitud, debido a que las

vibraciones ambientales que la afectan son causadas por viento y algunas actividades de hogar, las cuales producen una baja excitación.

### 2.2.1 Oscilador simple

Un oscilador simple es un sistema mecánico que consta de un resorte y un amortiguador como se ve en la figura 2.2, los cuales caracterizan el movimiento de una masa, al trabajar simultáneamente en serie o en paralelo. Posee características fundamentales como masa ( $m$ ), rigidez ( $k$ ), amortiguamiento ( $c$ ) y frecuencia de vibración natural ( $\omega$ ).

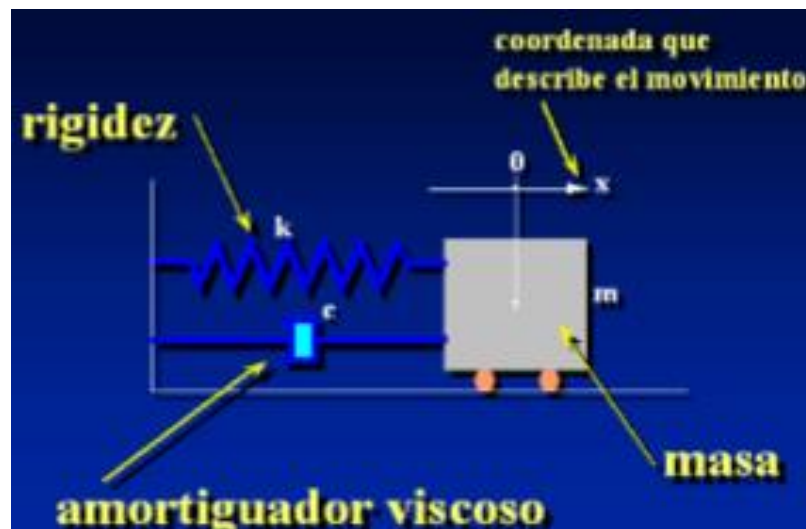


Figura 2.2: Esquema de oscilador simple (Adaptado referencia [García, 1998])

La ecuación de movimiento de un oscilador simple puede ser representada fácilmente con la ecuación diferencial

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad \text{E.C. 2.2.1}$$

Donde  $\ddot{x}$  corresponde a la aceleración,  $\dot{x}$  corresponde a la velocidad y  $x$  corresponde a posición. Si se observa a una edificación como un sistema con masa y rigidez se puede asimilar a un oscilador simple para su estudio. Se debe asumir que esta masa es causada por el peso muerto de la estructura, es decir el peso propio y las cargas permanentes, y la rigidez por el sistema de soporte de la estructura.

La solución a esta ecuación 2.2.1 en el tiempo es la siguiente:

$$x(t) = e^{-\xi\omega t} \left[ x_0 \cos(\omega_d t) + \left( \frac{v_0 + \xi x_0 \omega}{\omega_d} \right) \text{sen}(\omega_d t) \right] \quad \text{E.C. 2.2.2}$$

donde  $\omega_d = \sqrt{1 - \xi^2} \omega$  ,  $c = 2\xi m \omega$  ,  $v_0$  es la velocidad inicial,  $x_0$  es la posición inicial y  $\xi$  es el coeficiente de amortiguamiento con respecto al crítico que tiene valores entre 2% y 10% dependiendo de la estructura.

A partir de lo anterior, una estructura está representada por un periodo de vibración, medido en segundos, que caracteriza el modo fundamental de la estructuras y se representa con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad \text{E.C. 2.2.3}$$

Se debe tener en cuenta, que desde el punto de vista de dinámica estructural, una estructura define su movimiento a partir de una serie de modos de vibración y periodos asociados a cada modo, y cuando se refiere al modo fundamental es el modo en el cual participa mayor porcentaje de masa es decir que la estructura está en mayor excitación, el periodo en este modo es el periodo estructural y es el que mejor describe el movimiento de la estructura (García, 1998).

A pesar que las anteriores expresiones son una aproximación adecuada para el periodo estructural, al igual que las expresiones dadas en normas internacionales, en algunas ocasiones no se ajustan a las edificaciones ya construidas por diferentes factores, por lo cual es necesario medir los periodos estructurales en campo. Para llevar a cabo el análisis de una edificación se debe tomar en cuenta el análisis de sistemas de varios grados de libertad, debido a que esta estructura se puede mover de diferentes formas y en diferentes direcciones. Un grado de libertad es el número de desplazamientos requeridos para describir el desplazamiento relativo de las

masas, por lo cual un sistema de varios grados es el que presenta varios sitios de concentración de masas (Gutiérrez y Zabala, 2008), como se ve en la figura a continuación:

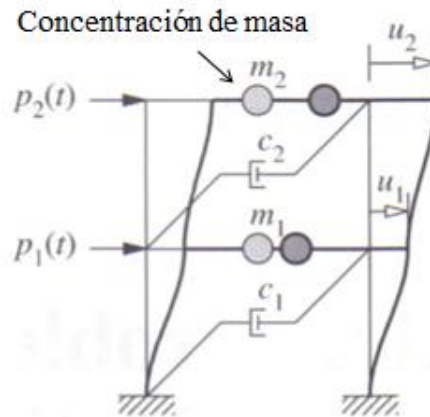


Figura 2.3: Sistema múltiples grados de libertad. (Adaptado Referencia [Chopra, 2001]).

Las condiciones del sistema constructivo de una edificación dejan varias incertidumbres con respecto a su comportamiento estructural, si las condiciones no son adecuadas tiene gran dificultad la predicción del periodo y otras propiedades dinámicas de la estructura. También es importante resaltar que la anterior expresión se desarrolla para tipologías constructivas específicas, por lo cual es importante medir los periodos para estructuras atípicas o de sistemas constructos mixtos. Para el análisis de vibraciones ambientales se parte de la suposición que la estructura va a responder en su modo fundamental de vibración pero para la modelación de la estructura se realiza un análisis modal.

Para la realización de este trabajo, el sistema estructural se puede clasificar dentro de los sistemas prefabricados, los cuales se caracterizan por no utilizar ningún tipo de refuerzo entre los elementos que lo componen, por ejemplo los paneles de concreto solo se acomodan entre los perfiles metálicos y la única funcionalidad del mortero entre ellos es aislamiento, por lo cual el movimiento de un panel es independiente del movimiento de los paneles contiguos. También se puede observar que los perfiles metálicos se mantienen en su posición debido al ensamblaje de la

estructura y gracias a la presión en ella, pero no hay ningún otro tipo de refuerzo, además la cimentación es muy simple y tiene la única función de nivelar la vivienda de un piso y evitar asentamientos diferenciales, estas características podrían hacer que este tipo de edificaciones sean vulnerables ante eventos sísmicos.

Este sistema constructivo no ha sido investigado ampliamente, y debido a su tipología estructural no se puede caracterizar dentro de los sistemas estudiados por la normas, por lo cual no es viable utilizar modelos matemáticos existentes para caracterizar su respuesta dinámica y se deben tomar mediciones en campo, en el caso de este estudio con acelerómetros.

Para la medición de vibraciones ambientales, se debe registrar la señal completa en un punto específico, para esto se requiere el registro de tres (3) componentes perpendiculares entre sí, como se ve en la figura 2.4, los cuales se caracterizan por la duración de la señal, la amplitud máxima y la frecuencia o rango de frecuencias dominantes.

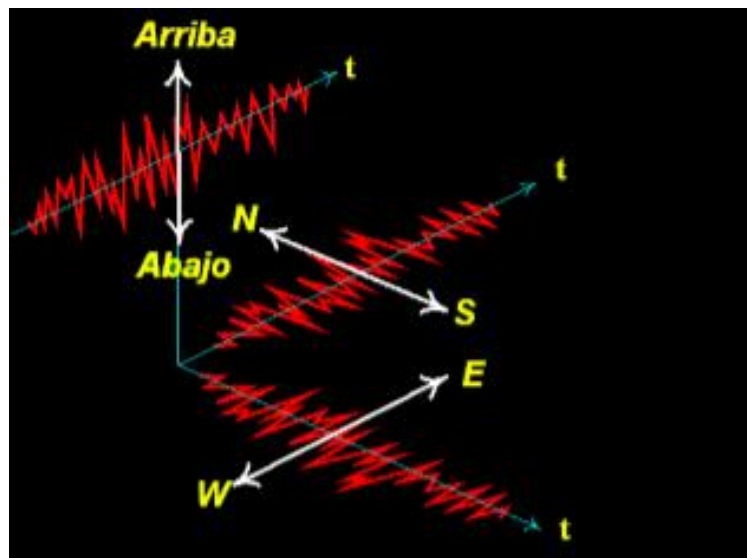


Figura 2.4: Registro de vibraciones en 3 direcciones perpendiculares (García, 1998)

La duración de la señal es el tiempo en segundos en el que comienza y deja de ser mayor a un umbral asociado con el ruido base de vibración. La amplitud máxima de la señal es el valor de aceleración con mayor amplitud en el registro.

La frecuencia dominante de vibración es el número de ciclos por segundos que se asocian con los pulsos de mayor amplitud de la señal, la estructura se puede excitar con diferentes frecuencias presentándose resonancia, que es cuando coincide la frecuencia de excitación con la frecuencia natural de vibración, y como la respuesta de vibración tiene aportes de diferentes modos se pueden detectar las frecuencias de más de un modo, por lo cual para poder establecer la frecuencia dominante se deben utilizar técnicas matemáticas como el espectro de Fourier, ya que es difícil reconocer los periodos de movimientos de algunas señales (Cifuentes, 2007).

### 2.2.2 Espectros de Fourier

Para el análisis de frecuencias de los movimientos sísmicos que afectan una estructura se debe convertir el dominio de tiempo en dominio de frecuencia para su identificación, utilizando series de Fourier. La transformada de Fourier de una función es:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt, \text{ donde } i = \sqrt{-1} \quad \text{E.C. 2.2.4}$$

Al aplicar la transformada de Fourier a un acelerograma integrado para todo el tiempo de duración de la señal encontramos en la ecuación 2.2.5 y luego la transformada de Euler en la ecuación 2.2.6.

$$F(\omega) = \int_0^{t_{dur}} \ddot{x}_0(t)e^{-i\omega t} dt \quad \text{E.C. 2.2.5}$$

$$F(\omega) = \int_0^{t_{dur}} \ddot{x}_0(t)(\cos \omega t - i \text{sen} \omega t) dt \quad \text{E.C. 2.2.6}$$

Entonces el Espectro de Amplitudes de Fourier FS ( $\omega$ ) abarca la parte real e imaginara de F ( $\omega$ ) como se ve en la ecuación 2.2.7 y para su expresión se debe emplear la transformada discreta de Fourier en la ecuación 2.2.8 a continuación:

$$FS(\omega) = \sqrt{\left[ \int_0^{t_{dur}} \ddot{x}_0(t) i \operatorname{sen}(\omega t) dt \right]^2 + \left[ \int_0^{t_{dur}} \ddot{x}_0(t) \operatorname{cos}(\omega t) dt \right]^2} \quad \text{E.C. 2.2.7}$$

$$F(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \ddot{x}_0(t_j) e^{-i2\pi(nj/N)} \quad n = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad \text{E.C. 2.2.8}$$

Donde N es el número de puntos del acelerograma, generando N-1 amplitudes y la frecuencia asociada en rad/s:

$$\omega = \frac{\frac{j}{2} - 1}{2\pi N \Delta t} \quad \text{E.C. 2.2.9}$$

$\Delta t$  = el intervalo de acelerograma.

Se debe tener en cuenta que este análisis de los valores para el diseño de una estructura no es de gran relevancia ni utilidad, pero si es una herramienta útil para identificar los periodos de vibración dominantes en una estructura a partir de un acelerograma, que podrá ser utilizado en estudios de efectos de amplificación de ondas sísmicas o estudios de vulnerabilidad sísmica en una estructura (García, 1998).

Actualmente se pueden encontrar distintos programas computacionales, como DEGTRA, el cual puede realizar este proceso, a partir de los datos de aceleración de una estructura en el tiempo y arrojan el espectro de Fourier.

### 2.2.3 Función de transferencia

Una función de transferencia es utilizada para relacionar la respuesta de un sistema con respecto a una señal inicial o base por medio de un cociente, se utilizan ecuaciones lineales e invariantes en el tiempo para la solución por este método. Mediante una división se busca comparar un

modelo de salida con uno de entrada que sirve de referencia para identificar la respuesta de un sistema. Por medio de comparación de las frecuencias dominantes de dos registros se puede observar las frecuencias que más se amplifican cuando las ondas se transmiten desde un lugar a otro, así se reconocen los periodos dominantes de vibración (Cifuentes, 2207).

Para la realización de este trabajo se divide el espectro de Fourier de las señales registradas en diferentes puntos entre el espectro de un punto fijo para encontrar un nuevo espectro y así poder identificar el periodo fundamental de la estructura.

#### 2.2.4 Equipos de medición

Para la adquisición de datos se utilizó un sistema basado en acelerómetros que recolectaron los datos dinámicos de la estructura excitada con vibraciones ambientales, este sistema de adquisición de datos de aceleración consiste en cuatro (4) canales o sensores, cada canal tiene una precisión de 24 bits y están configurados para tomar 200 datos por segundo. La tarjeta de los canales va conectada por puerto USB a un computador, alimentando los acelerómetros como se ve en la figura a continuación:

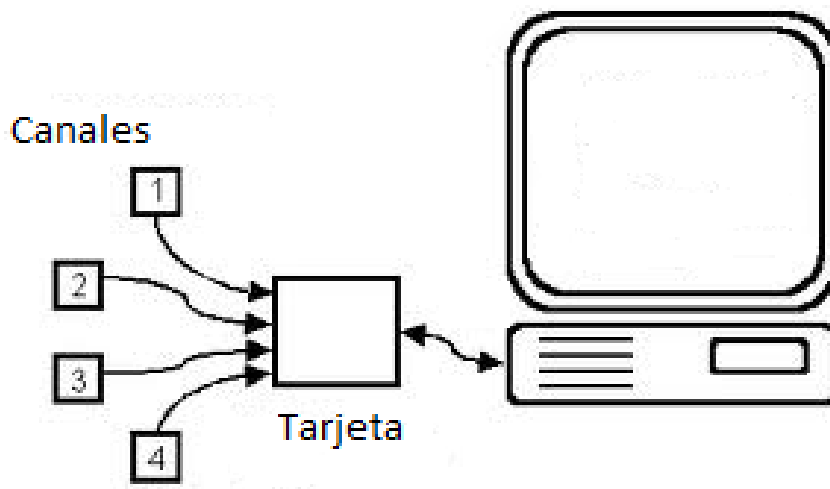


Figura 2.5: Esquema sistema de adquisición de datos



Los acelerómetros sísmicos piezoeléctricos como se ve en la figura 2.6, funcionan gracias a una señal eléctrica que se genera debido a la vibración entre dos placas de cuarzo, esta señal es proporcional a la magnitud de la aceleración. La constante para transformar la señal eléctrica que viene en mVolts a unidades físicas de aceleración en g es dada por el fabricante, además su capacidad máxima es de 0.485 g y la mínima -0.485 g.



Figura 2.6: Acelerómetros sísmicos piezoeléctricos y tarjeta de adquisición

### **2.3 VIVIENDA PREFABRICADA BAJO ESTUDIO.**

Una casa prefabricada o vivienda prefabricada es una construcción hecha a partir de secciones estandarizadas que no son fabricadas in-situ sino que llegan fabricadas a la ubicación y allí son ensambladas. Las viviendas prefabricadas, al igual que las viviendas convencionales, deben apoyarse sobre cimientos y conectarse a redes de saneamiento, agua y electricidad.



Figura 2.7: Visita de campo en la localidad de Soacha

Los materiales en que se pueden encontrar este tipo de casa son concreto, metal y madera, dependiendo del uso que se le dará y las especificaciones del propietario. Debido a la tipología estructural de las viviendas, los materiales que son utilizados, y el sistema constructivo, son viviendas con costos mucho menores a las casas convencionales además casi no generan desperdicios y son más eficientes.

Gracias a todos estos beneficios, en Colombia este tipo de vivienda es utilizada recurrentemente por las entidades de caridad para las familias de bajos recursos, así mismo este será el tipo de vivienda analizada en esta investigación.

### **2.3.1 Materiales**

#### **2.3.1.1 Paneles de concreto**

La prefabricación en concreto es un sistema constructivo que consiste en la producción previa de paneles de muros o placas que se ensamblan entre ellas. Son fabricadas en plantas bajo condiciones controladas y siguiendo un procedimiento estandarizado, donde se estudian cuidadosamente todos los aspectos involucrados con el ensamblaje posterior.

### **2.3.1.2 Perfiles metálicos**

Los perfiles metálicos son productos laminados fabricados para la utilización en estructuras de edificación. Están hechos de acero y tienen secciones estandarizadas prismáticas, sus formas en T o C entre otras, tienen propiedades mecánicas similares a secciones macizas rectangulares, pero se busca el ahorro de material con resultados similares.

### **2.3.1.3 Tejas en fibrocemento**

Las tejas en fibrocemento son el resultado de la unión entre cemento y fibras mineralizadas formando láminas con una alta resistencia, además se caracterizan por tener poco peso. Las láminas son impermeables y fáciles de cortar y perforar lo cual las hacen ideales para las cubiertas de las viviendas prefabricadas y en este caso en particular para la implementación de un sistema de techo verde productivo.

## **2.3.2 Tipología estructural**

El sistema estructural de las viviendas prefabricadas consiste en una placa de cimentación sobre un terreno inclinado que ayuda a nivelar, sobre esta se levantan una serie de paneles de concreto los cuales se encajan entre diferentes tipo de perfiles metálicos configurando una vivienda de planta rectangular. Es importante resaltar que estos paneles no se encuentran adheridos entre sí, solo están conectados por los perfiles metálicos, es decir que ante algún movimiento cada panel se mueve de manera independiente sin afectar al panel contiguo.

Para la cubierta se encuentran 2 aguas las cuales tienen tejas de fibrocemento ubicadas sobre vigas de madera que se encuentran apoyadas sobre los perfiles metálicos para transmitir las cargas hacia el suelo.

## **2.4 TECHOS VERDES**

Según la Guía de Techos Verdes en Bogotá realizada por la secretaria del medio ambiente el término adecuado que se debe utilizar es “techos bióticos” debido a que es la expresión más acertada para el tipo de tecnología y el funcionamiento de las cubiertas verdes, aun así durante este escrito se utilizara el término “techos verdes” por la familiaridad que ha recibido durante los últimos años. Así mismo esta guía brinda una clara definición de “techos verdes” y es la referencia principal para la información que más adelante se encontrará.

El término “techos verdes” viene de la traducción desde el inglés de “Green roofs” el cual ha sido un término comercial mundialmente reconocido; se refiere a la implementación de hábitat natural o material vivo en las cubiertas de las edificaciones de manera que se pueda mantener sosteniblemente un paisaje vegetal. Se considera como “techo verde” cualquier plano horizontal o inclinado de las estructuras que la cubra y tenga vegetación sobre ella.

Las partes que componen un sistema de cubierta verde son los componentes activos, los estables y los elementos auxiliares, estos componentes son comunes para todos los tipos de tecnologías utilizadas para implementar la cubierta.

Los componentes activos son los elementos biológicos que soportan la vida en el sistema, la cobertura vegetal o el medio de crecimiento, y depende de la capacidad de adaptarse a diferentes condiciones medioambientales de estos componentes el éxito de la cubierta verde. La cobertura vegetal es el conjunto de especie vegetales que conforman la capa superior del sistema, el medio de crecimiento es el suelo que emula las condiciones naturales para satisfacer las necesidades de la cobertura vegetal.

Los componentes estables son los componentes inertes del sistema que lo deben estabilizar química y físicamente durante toda la vida útil. Son aquellos elementos fabricados como

membranas de impermeabilización, barreras filtrantes o elementos de irrigación los cuales deben resistir adecuadamente las condiciones del ambiente.

Los elementos auxiliares son también elementos inertes tienen funciones específicas para adaptar o sostener una sección típica de techo verde, como los separadores, protectores, confiadores y sistemas de riego.

Los techos verdes traen mayores beneficios a la estructura, como el aislamiento acústico, aumento de espacio utilizable, alivio visual y educación ambiental, además si son productivos pueden beneficiar a la economía del hogar.

También se pueden encontrar diferentes tipos de techo verdes dependiendo de la tecnología que sea utilizada para su construcción. Los sistemas tipo multicapa monolíticos son los más difundidos a nivel mundial y más sencillos, consiste en apoyar sobre el techo impermeabilizado capas de componentes especializados con una continuidad horizontal. Los sistemas tipo multicapa elevados se diferencian del anterior sistema en que utiliza pedestales para elevar la estructura de las cubiertas impermeabilizada. Los sistemas tipo monocapa son los tapetes presembrados que incorporan en una sola capa los diferentes componentes del techo y se deben fijar sobre el techo. Los sistemas aeropónicos no tiene medio de crecimiento por lo que requiere de mecanismo de soporte para la vegetación. El sistema tipo receptáculo consiste en apoyar sobre el techo recipientes individuales que alojan el medio de crecimiento y la vegetación. Este último sistema es el más parecido a la descripción del sistema que se utilizará para este análisis.



Figura 2.8: Taller presentación techos verdes en Soacha – Prosofi

También se puede encontrar una clasificación secundaria del sistema teniendo el peso total saturado que puede llegar a tener el sistema. Se pueden encontrar techos verdes livianos que tienen pesos dentro del rango de 80 a 200 kg/m<sup>2</sup>, los techos verde moderados tienen una robustez intermedia con pesos de 80 a 250 kg/m<sup>2</sup>, y los techos verde robustos que presentan un peso mayor de 120 a 350 kg/m<sup>2</sup> (Secretaria Distrital del medio ambiente, 2011).

### **3 METODOLOGÍA**

#### **3.1 ASPECTOS GENERALES**

La vivienda objeto de estudio se caracteriza por estar ubicada en una zona marginada de la ciudad y por ser construida mediante procesos no estandarizados, lo cual aumenta la probabilidad de ser vulnerable ante eventos sísmicos.

La cimentación implementada durante la construcción permite que la pendiente en la base de la casa sea aproximadamente cero (0), y de esta forma poder minimizar el efecto de la inclinación en el comportamiento dinámico de la estructura.

##### **3.1.1 Descripción de la vivienda**

La fundación ‘Catalina Muñoz’ es la promotora y principal responsable de la construcción de este tipo de viviendas prefabricadas destinadas a comunidades de estratos económicos y sociales bajos. Estas casas tienen un (1) piso de altura con 25.39 m<sup>2</sup> de área construida y tienen espacio disponible para dos (2) habitaciones, cocina, sala y comedor.

La distribución arquitectónica se muestra en el siguiente plano (figura 3.1).

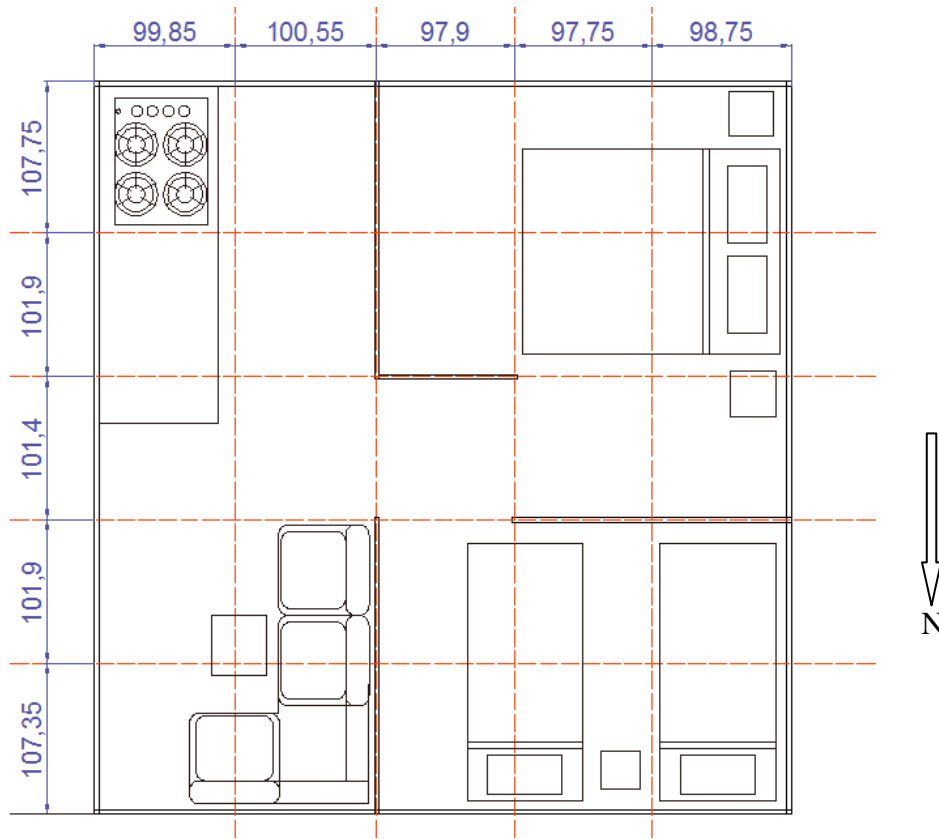


Figura 3.1: Plano Arquitectónico vivienda. Unidades: Centímetros (cm)

La cimentación está constituida por una placa de concreto pobre que brinda nivelación y estabilidad a la estructura.

En cuanto a la tipología estructural, estas casas son construidas con paneles modulares de concreto, refuerzos verticales en acero, adicionalmente se ubican en las intersecciones de los ejes principales perfiles de láminas de acero, que facilitan el ensamblaje de todas las partes y dan rigidez.



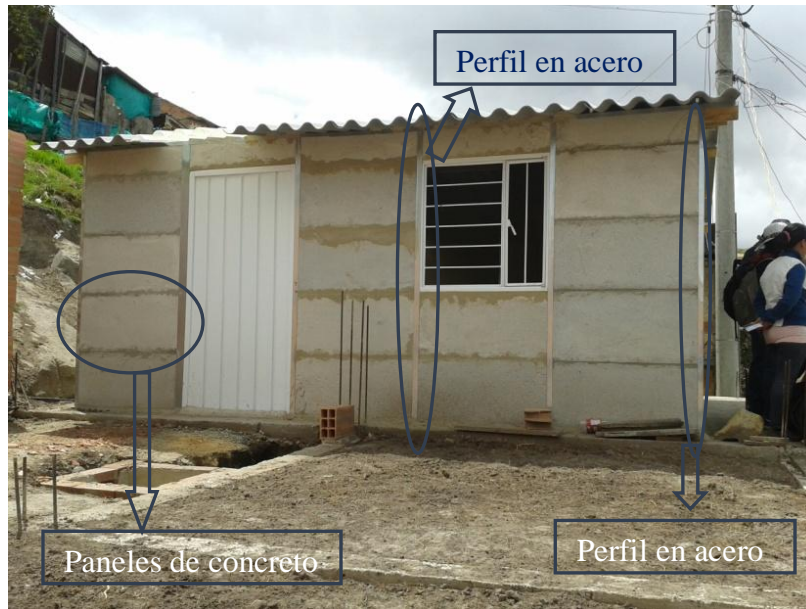


Figura 3.2: Ilustración tipología estructural y elementos principales

Para comprender fácilmente la tipología estructural y distribución de perfiles en la vivienda se elaboraron las Figuras 3.3 a Figuras 3.7, en donde se exponen las características geométricas de los elementos estructurales y su disposición en la vivienda.

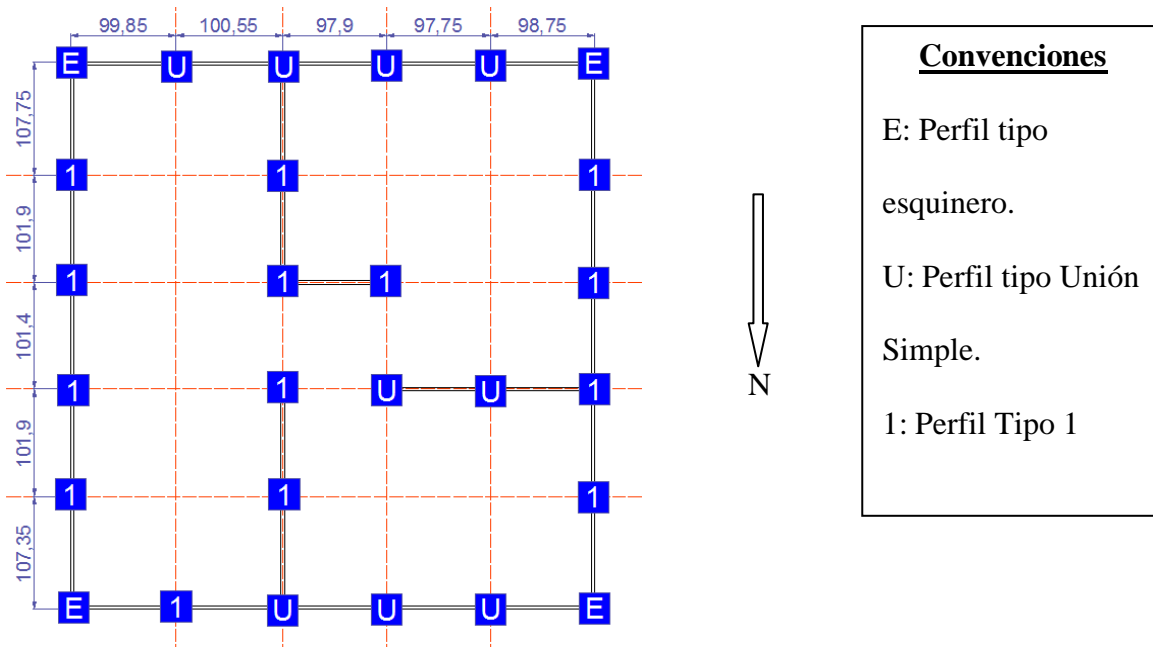


Figura 3.3: Plano ubicación Perfiles estructurales. Unidades: Centímetros (cm)

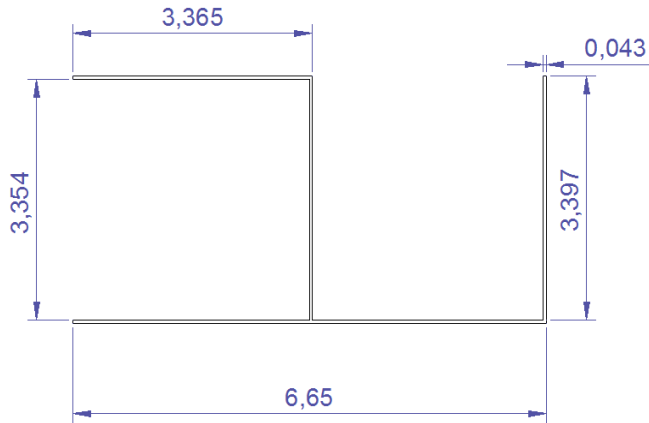


Figura 3.4: Perfil esquinero (E). Unidades: Centímetros (cm)

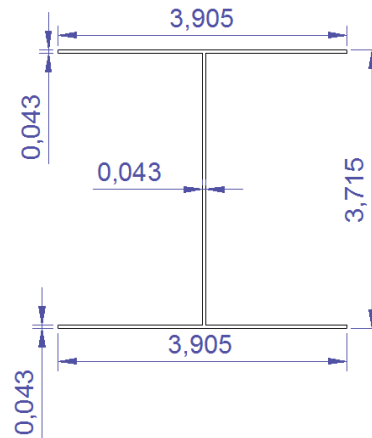


Figura 3.5: Perfil Unión Simple (U). Unidades: Centímetros (cm)

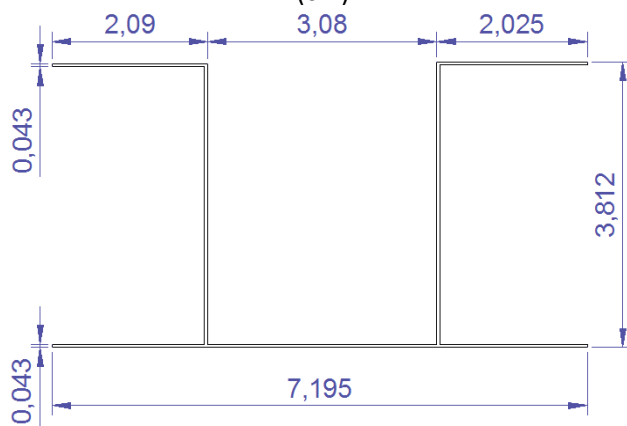


Figura 3.6: Perfil Tipo 1 (1). Unidades: Centímetros (cm)

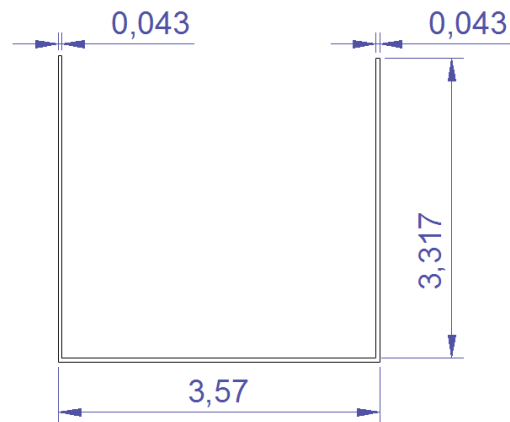


Figura 3.7: Perfil Viga Techo (U). Unidades: Centímetros (cm)

Entre tanto, la cubierta es a dos aguas con pendiente aproximada de  $18^\circ$  (33%) y con teja de fibrocemento. Para finalizar, en la zona superior de los muros se disponen cuatro (4) vigas de madera, de 11.96 cm alto y 3.17 cm de ancho en promedio, que sirven como soporte o unión de la cubierta con el resto de la estructura.



Figura 3.8: Ilustración vigas de madera y cubierta a dos aguas

### 3.1.2 Ubicación geográfica.

La vivienda se ubica en el municipio de Soacha, Cundinamarca, barrio 'La Isla', sector conocido como 'Altos de Casuca'. Esta área pertenece a la cuenca alta del río Bogotá y subcuenca del río Soacha (Forero & Devia, 2012). En la figura 3.9 se ubica la zona de estudio a nivel Cundinamarca y a nivel de Bogotá D.C.

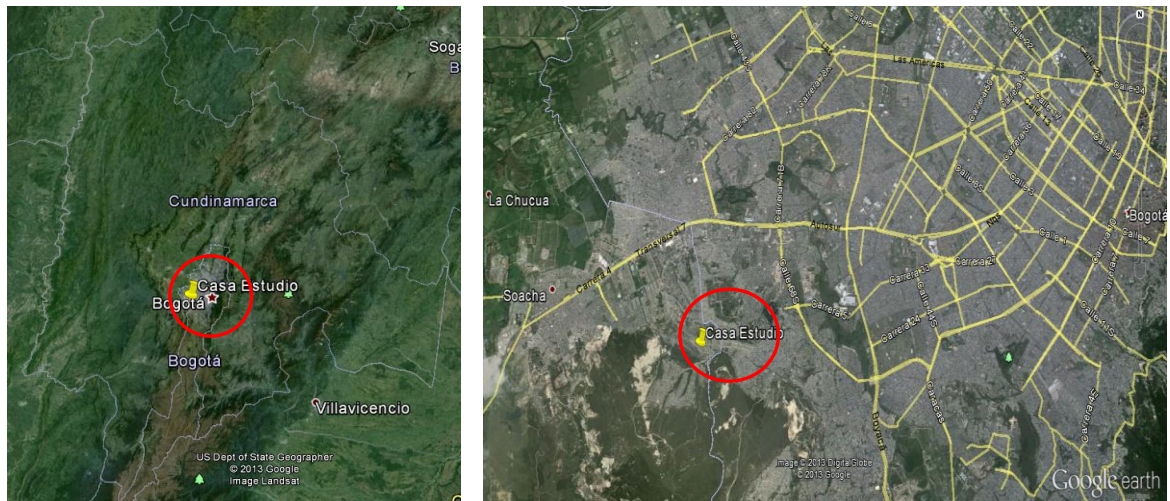


Figura 3.9: Ubicación geográfica casa de estudio (Tomada de Google earth)

Las coordenadas del lugar de estudio son Latitud 4°34'18.72"N y Longitud 74°10'50.73"O, el terreno se caracteriza por altas pendientes y en el suelo se identifican altos procesos de erosión. En la figura 3.10 se observa la existencia de cauces de agua que generan erosión, además de las grandes inclinaciones del terreno.



Figura 3.10: Ilustración pendientes elevadas y terreno erosionado

### 3.1.3 Disposición del techo verde.

El techo verde utilizado es un sistema productivo que permite a los habitantes de las viviendas obtener ganancias económicas y suplir algunas necesidades alimentarias y nutricionales mediante el cultivo y venta de hortalizas.

Este sistema se fundamenta en la utilización de recipientes individuales, como las botellas PET (Tereftalato de polietileno) de 3 litros, para el cultivo de diversas plantas.

Para la adecuación de estas botellas se deben realizar transversalmente tres (3) orificios de 7 x 10 cm y al menos dos (2) perforaciones que permitan el drenaje del sustrato. Un ejemplo de este proceso es la figura 3.11. Con respecto al sustrato, este se preparó con una mezcla entre tierra negra y cascarilla de arroz (relación 2:1) (Forero & Devia, 2012), de tal forma que sea capaz de proveer los minerales y nutrientes que requieren las plantas que allí se cultiven, en este caso

fueron la lechuga crespa (*Lactuca sativa*) y el rábano (*Rhaphanus sativus*), hortalizas de rápido crecimiento y raíces poco profundas (Forero & Devia, 2012)



Figura 3.11: Proceso adecuación botellas PET

Una vez las botellas fueron alistadas, estas se encajaban en los surcos u ondas de las tejas de fibrocemento. En total se colocaron 162 botellas, estas se ubicaron en las dos aguas de la cubierta y en tres líneas por agua, así pues en cada línea se instalaron 27 botellas, cada una con dos (2) plantas sembradas.

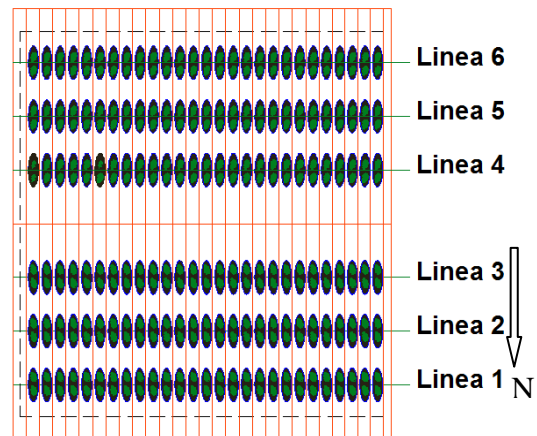


Figura 3.12: Distribución techo verde instalado

Para lograr la sostenibilidad de las plantas se instaló una fuente permanente de agua o sistema de riego; de acuerdo a las recomendaciones hechas por el estudio de Carolina Forero el sistema más

eficiente es por goteo con recolección y recirculación del agua lluvia. Para el proceso de riego se utilizó una caneca reciclada de 15 litros, ubicada en la cumbrera del tejado, en donde se almacena el agua, posteriormente por medio del uso de tubos de PVC de ½ pulgada y microtubos se distribuyó el agua para cada uno de los contenedores de PET. Teniendo en cuenta que el sistema de riego estaba ubicado en una pendiente inclinada mayor del 30%, se utilizaron llaves de paso para regular la presión y garantizar el suministro homogéneo de agua en todos los recipientes. La figura 3.13 muestra características generales del sistema de riego.



Figura 3.13: Sistema de riego por goteo

#### **3.1.4 Caracterización sísmica.**

La caracterización sísmica y espectro de microzonificación se realizó conforme a lo estipulado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente del año 2010 (NSR-10) en el capítulo A.2.

El municipio de Soacha está clasificado como una zona de amenaza sísmica intermedia, debido a esto el coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva ( $A_a$ ) se estableció igual a 0.15, mientras que el coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva ( $A_v$ ) fue tomado como 0.20. (Apéndice A-4 NSR-10).

Con relación al comportamiento del suelo, el coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos ( $F_a$ ) y el coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios ( $F_v$ ) se determinó según los valores correspondientes al suelo tipo Roca de Rigidez Media catalogado en la NSR-10 como suelo Tipo B. de tal modo que  $F_a = 1.0$  y  $F_v = 1.0$ .

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Nota: Para el perfil tipo F debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.

Tabla 3.1: Valores del coeficiente  $F_a$ , para la zona de periodos cortos del espectro. Tabla A.2.4-3 NSR-10

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_v \leq 0.1$	$A_v = 0.2$	$A_v = 0.3$	$A_v = 0.4$	$A_v \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Nota: Para el perfil tipo F debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.

Tabla 3.2: Valores del coeficiente  $F_v$ , para la zona de periodos intermedios del espectro. Tabla A.2.4-3 NSR-10

El tipo de suelo se escogió basándose en las visitas técnicas que se realizaron. En estas se observaron que en la zona predomina el terreno montañoso con pendientes superiores al 30%, igualmente el tipo de suelo escogido no será un factor diferencial, cuando tenga presente el techo verde y cuando no lo tenga, que afecte el comportamiento dinámico y vulnerabilidad sísmica de la vivienda.

Para trazar el Espectro de aceleraciones se debe clasificar la estructura según su Importancia (Capítulo A.2.5 NSR-10), en este caso la vivienda no es una edificación indispensable, ni para atención de la comunidad y tampoco cabe dentro de la denominación de ocupación especial, como consecuencia de esto se clasifico como una estructura de ocupación normal y el coeficiente de Importancia (I) es de 1,0

Una vez calculados todos los coeficientes se procedió a calcular:

El Período de vibración al cual inicia la zona de aceleraciones constantes ( $T_0$ ) (Capítulo A.2.6-6, NSR-10)

$$T_0 = 0.1 \frac{A_v F_v}{A_a F_a} \quad \text{E.C.3.1.1}$$

El Período de vibración correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño, para períodos cortos, y la parte descendiente del mismo ( $T_C$ ) (Capítulo A.2.6-2, NSR-10)

$$T_C = 0.48 \frac{A_v F_v}{A_a F_a} \quad \text{E.C.3.1.2}$$

El Período de vibración propio al inicio de la zona de desplazamiento aproximadamente constante del espectro de diseño, para períodos largos. ( $T_L$ ) (Capítulo A.2.6-4, NSR-10)

$$T_L = 2.4 F_v \quad \text{E.C.3.1.3}$$

De lo anterior se arrojaron los siguientes resultados.

Período inicial, $T_0$	=	0.133
Período corto, $T_C$	=	0.64
Período largo, $T_L$	=	2.4
Máx. Acel. en el espectro	=	0.375

Tabla 3.3: Valores de los periodos inicial, corto y largo del espectro.

Para concluir este capítulo se dibujó el espectro de aceleraciones definido para un coeficiente de amortiguamiento del 5 por ciento del crítico, este será incluido más adelante en los casos de carga y análisis dinámico de la estructura.



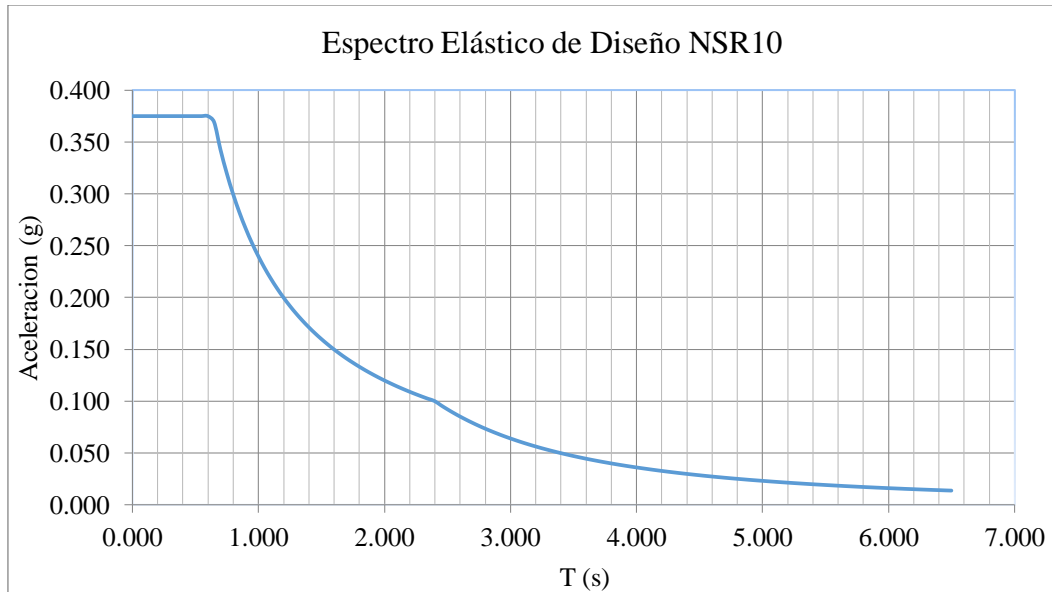


Figura 3.14: Espectro de aceleraciones para el municipio de Soacha

## 3.2 MEDICIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES

### 3.2.1 Análisis de vibraciones

El objetivo principal de la medición de las vibraciones ambientales es determinar el periodo fundamental de la vivienda, tanto con techo verde como sin techo verde, para esto se planeó inicialmente estudiar la oscilación de la estructura en dirección Norte-Sur y Este-Oeste, sin embargo, de acuerdo al levantamiento geométrico de la casa prefabricada, se decidió estudiar con mayor profundidad la dirección Este-Oeste, esto debido a que en esta orientación se encuentra un menor número de pórticos y muros, además estos contienen vacíos que reducen la rigidez de los mismos, por lo que ante un evento sísmico la estructura tendría principalmente desplazamientos en dicha dirección. Con el objetivo de corroborar la anterior afirmación, para la dirección Norte-Sur se realizaron dos (2) mediciones durante un lapso de un (1) minuto cada una, mientras que para la dirección de mayor interés se realizaron siete (7) mediciones, cada una con duración de un (1) minuto.

Esta medición consiste en registrar el valor de aceleración que captan los acelerómetros con intervalos de doscientos (200) datos por segundo. Cabe recordar que este procedimiento se realizara exactamente igual para cuando la vivienda estudiada tenga presente el techo verde y para cuando no lo tenga.

### 3.2.2 Ubicación de acelerómetros.

Durante la medición de las vibraciones ambientales de la vivienda sin techo verde el equipo de medición disponía de tres (3) acelerómetros, dos (2) de ellos se ubicaron en el techo de la casa y el restante se ubicó en el piso de la vivienda.

Estos se ubicaron de tal forma que se obtuvo información de los principales ejes de la estructura y así determinar con mayor exactitud el periodo fundamental de la vivienda. A continuación se muestran la figura 3.15 y 3.16, en donde se ilustran más claramente la ubicación de los acelerómetros.

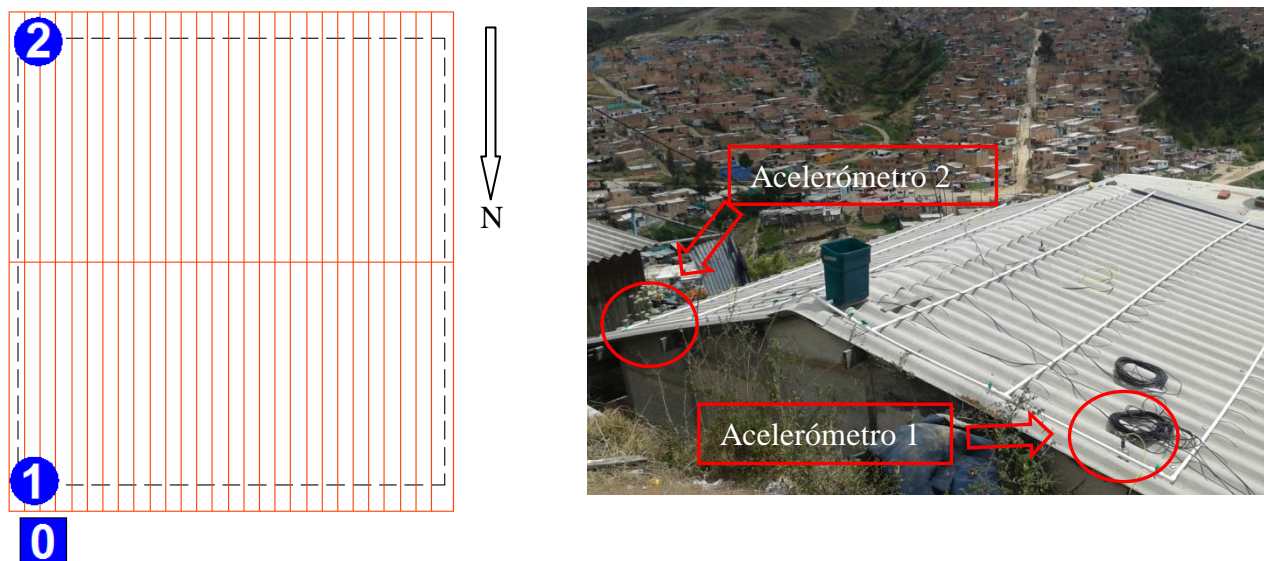


Figura 3.15: Ubicación acelerómetros. Vivienda sin Techo Verde. Vista: Top

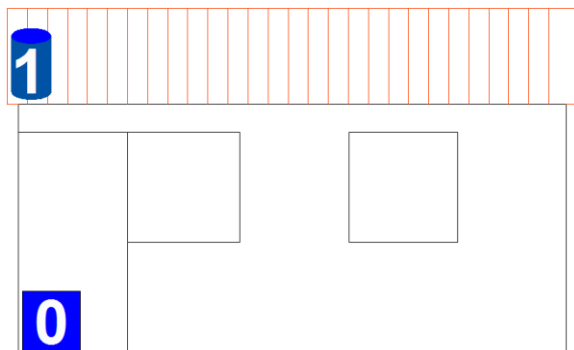


Figura 3.16: Ubicación acelerómetros. Vivienda sin Techo Verde. Vista: Perfil Fachada Norte

El día que se realizó el análisis de vibraciones de la vivienda con techo verde se disponía con un acelerómetro adicional, por lo cual se situaron tres (3) en el techo y uno (1) en el piso. La disposición de los acelerómetros se muestra en las figuras 3.17 y 3.18.

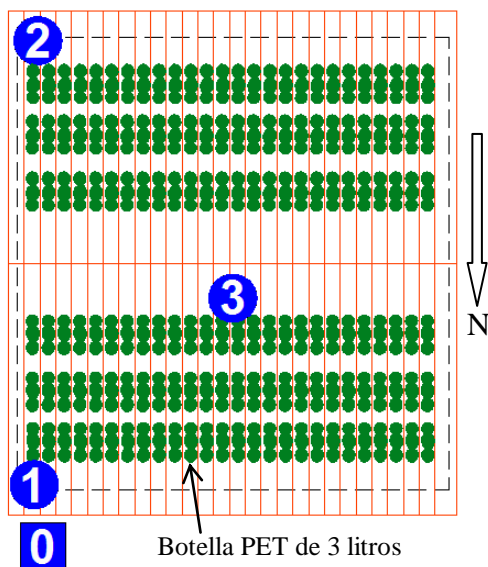


Figura 3.17: Ubicación acelerómetros. Vivienda Con Techo Verde. Vista: Top

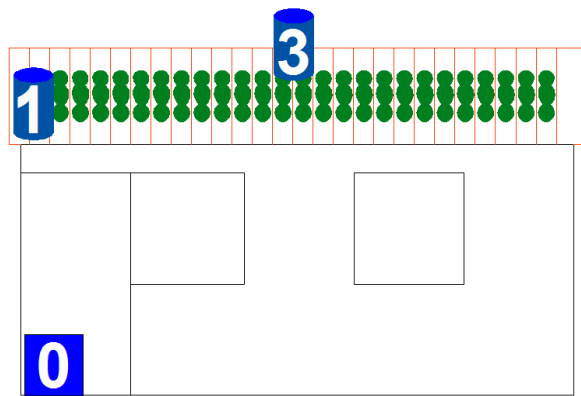


Figura 3.18: Ubicación acelerómetros. Vivienda Con Techo Verde. Vista: Perfil Fachada Norte

### 3.2.3 Obtención de la función de transferencia.

Una vez ejecutadas las mediciones de aceleración en el tiempo, se transfirió esta información al computador por medio de la tarjeta de adquisición de datos y en seguida se generaron archivos compatibles con Excel mediante el software denominado LabView, de dichos archivos se obtuvo las gráficas de aceleración versus tiempo. Un ejemplo representativo de estas graficas puede observarse en las figuras 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22.

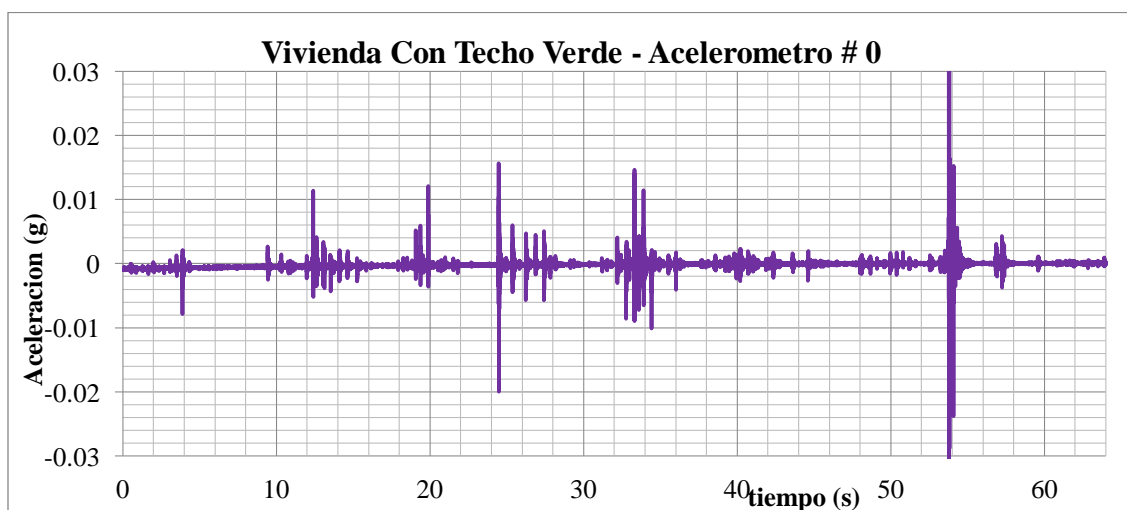


Figura 3.19: Comportamiento de la aceleración en el tiempo. Sentido Este-Oeste. Medición 1. Acelerómetro 0

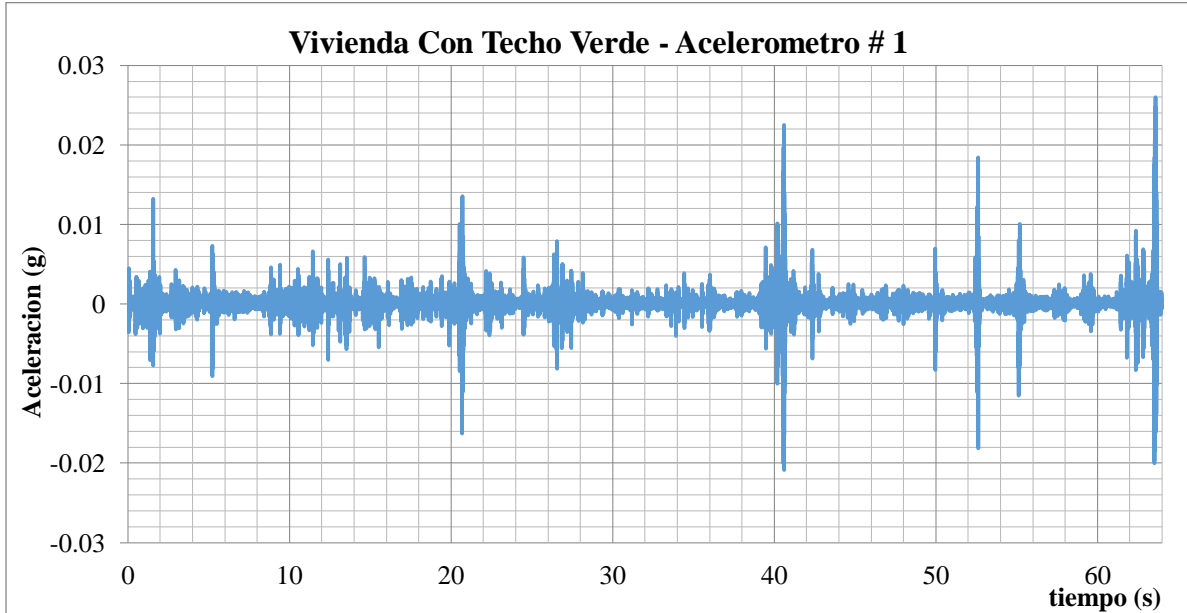


Figura 3.20: Comportamiento de la aceleración en el tiempo. Sentido Este-Oeste. Medición 1. Acelerómetro 1

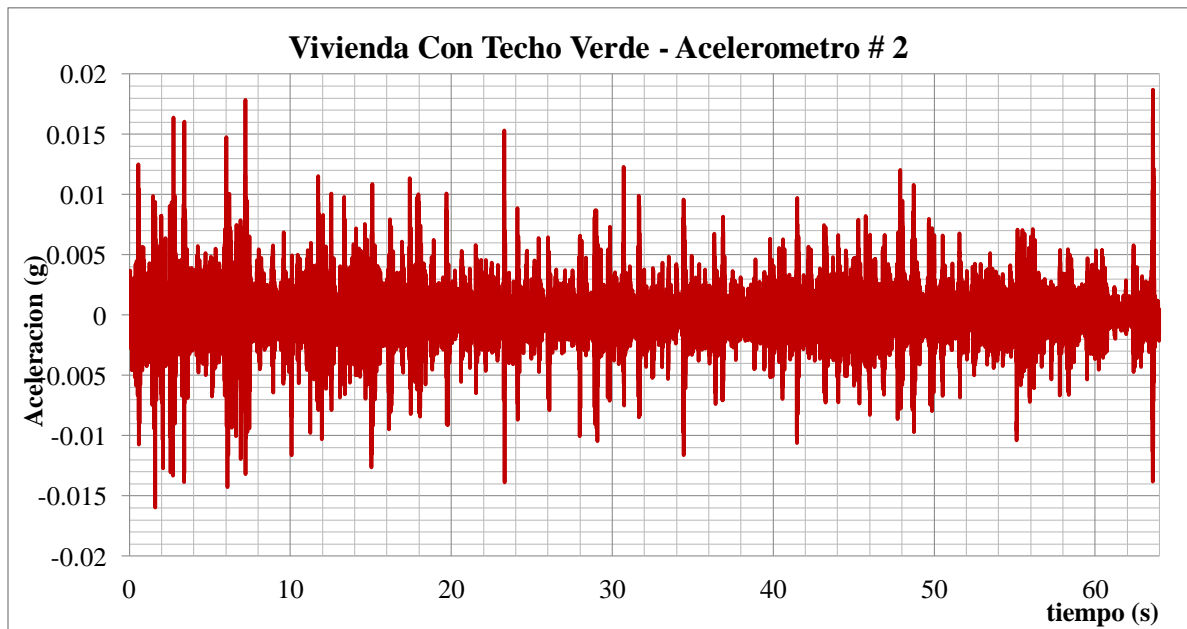


Figura 3.21: Comportamiento de la aceleración en el tiempo. Sentido Este-Oeste. Medición 1. Acelerómetro 2

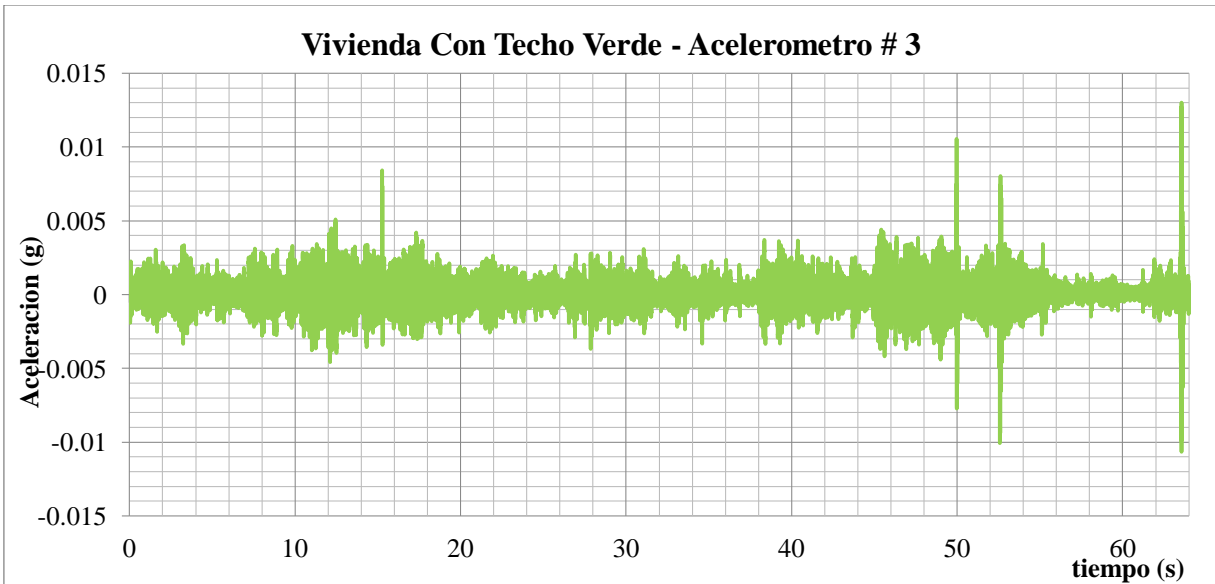


Figura 3.22: Comportamiento de la aceleración en el tiempo. Sentido Este-Oeste. Medición 1. Acelerómetro 3

Prosiguiendo con el análisis, se empleó el programa Degtra2000 para calcular el espectro de Fourier de cada acelerómetro en cada una de las mediciones. Para los ejemplos anteriores se muestra el respectivo espectro de Fourier.

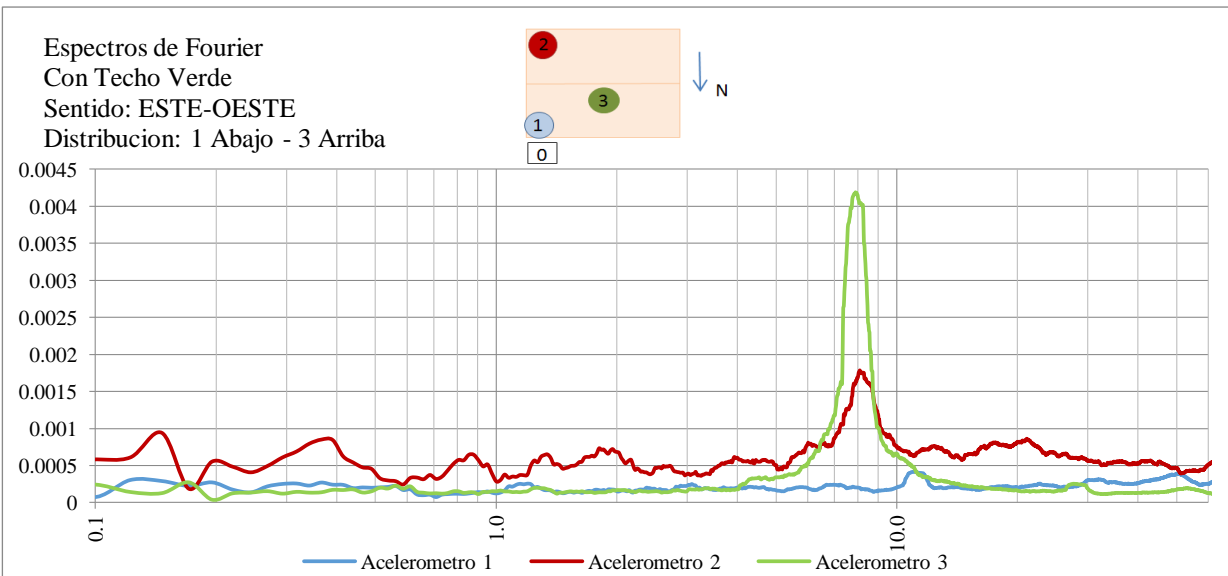


Figura 3.23: Espectro de Fourier. Sentido Este-Oeste. Medición 1

Al obtener los espectros de Fourier se procedió a dividir el valor del eje Y del espectro de Fourier de los acelerómetros ubicados en el techo entre los valores del eje Y del espectro de Fourier del acelerómetro ubicado en el piso. Esto se realizó para cada valor de frecuencia del Eje x. La función de transferencia permite identificar la frecuencia y por consiguiente el Periodo predominante con que oscila la estructura estudiada.

En seguida, desde la Figura 3.24 hasta la figura 3.37 se muestra la función de transferencia calculada para las siete (7) mediciones con techo verde (Figuras 3.24 a Figura 3.30) y las siete (7) mediciones sin techo verde (Figuras 3.31 a Figura 3.37).

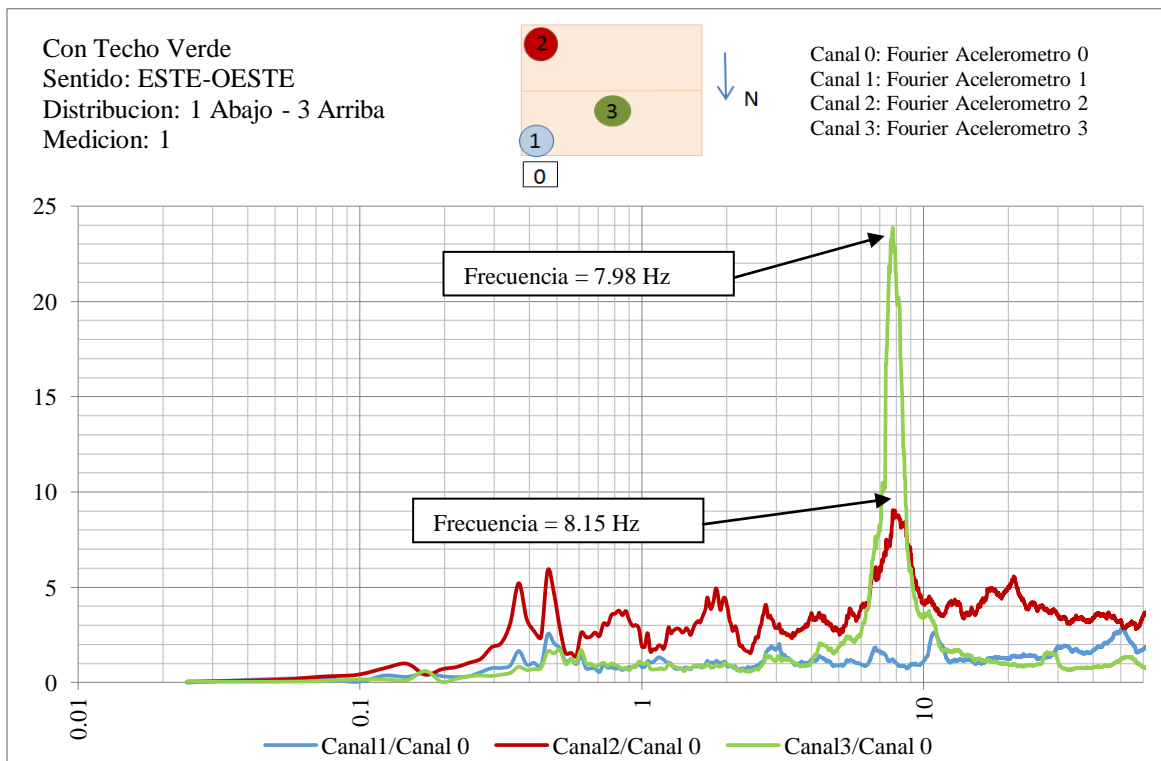


Figura 3.24: Función de transferencia. Vivienda con techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 1.  
Unidades eje X: Hertz

En la figura anterior es notoria la existencia de un pico cuando la frecuencia es igual a 7.98 Hz en el acelerómetro 3 y de 8.15 Hz en el acelerómetro 2, por lo cual se deduce que el periodo fundamental de la estructura, con presencia de techo verde, en dirección Este-Oeste es

aproximadamente 0.12 segundos durante la Medición 1. Este análisis se realizó para las restantes trece (13) graficas.

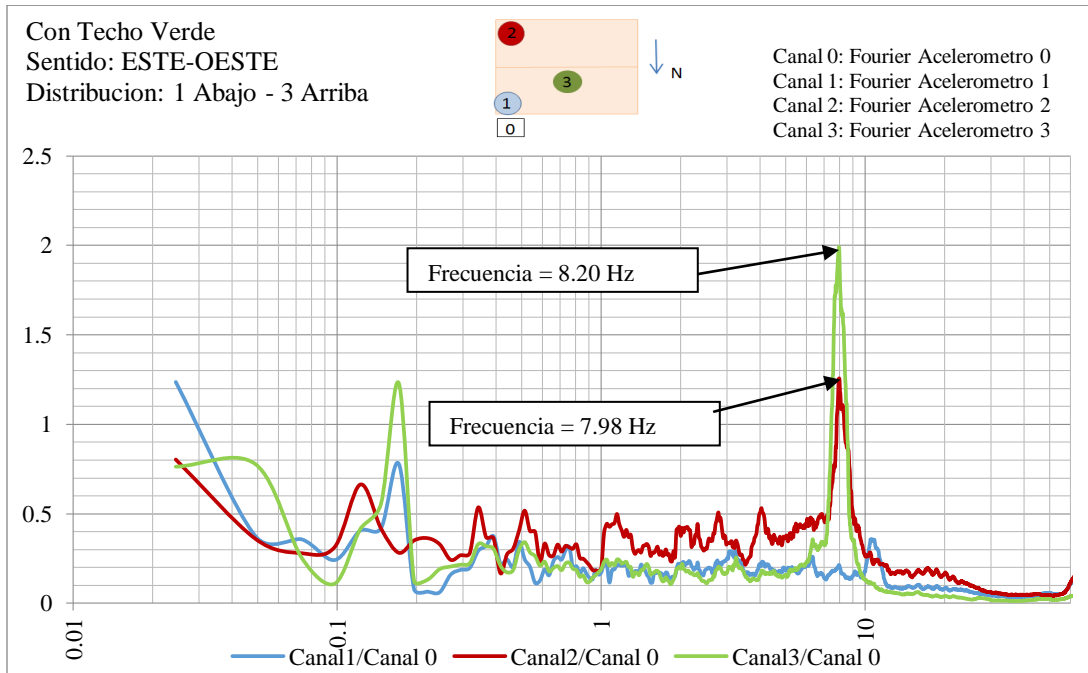


Figura 3.25: Función de transferencia. Vivienda con techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 2. Unidades eje X: Hertz

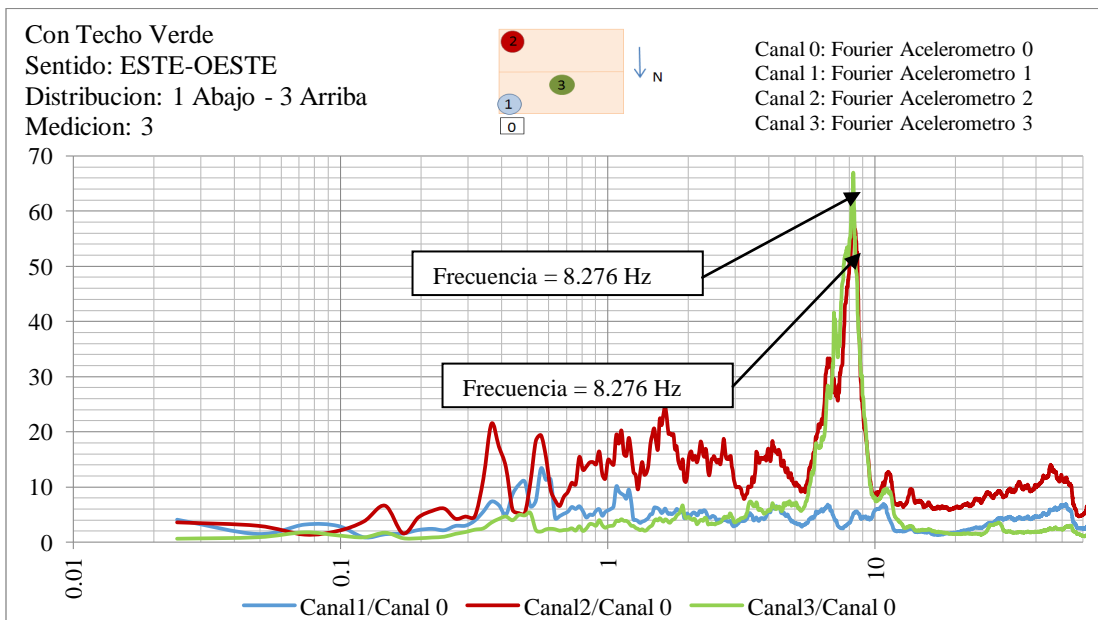


Figura 3.26: Función de transferencia. Vivienda con techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 3. Unidades eje X: Hertz



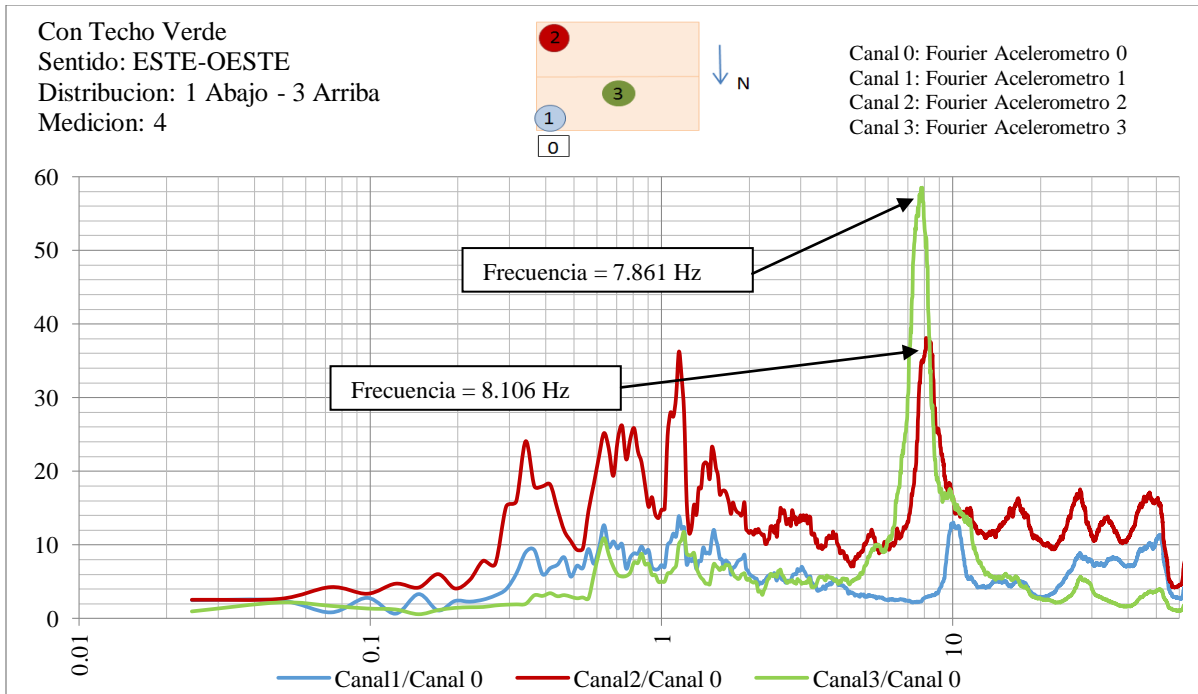


Figura 3.27: Función de transferencia. Vivienda con techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 4.  
 Unidades eje X: Hertz

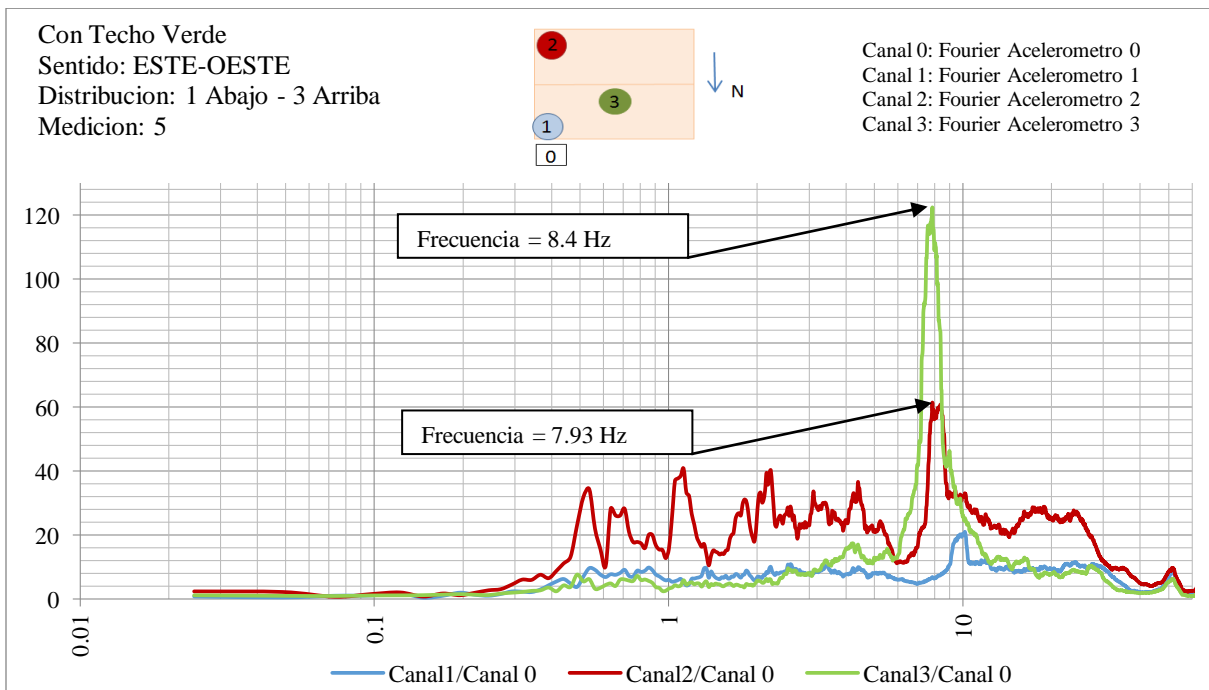


Figura 3.28: Función de transferencia. Vivienda con techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 5.  
 Unidades eje X: Hertz

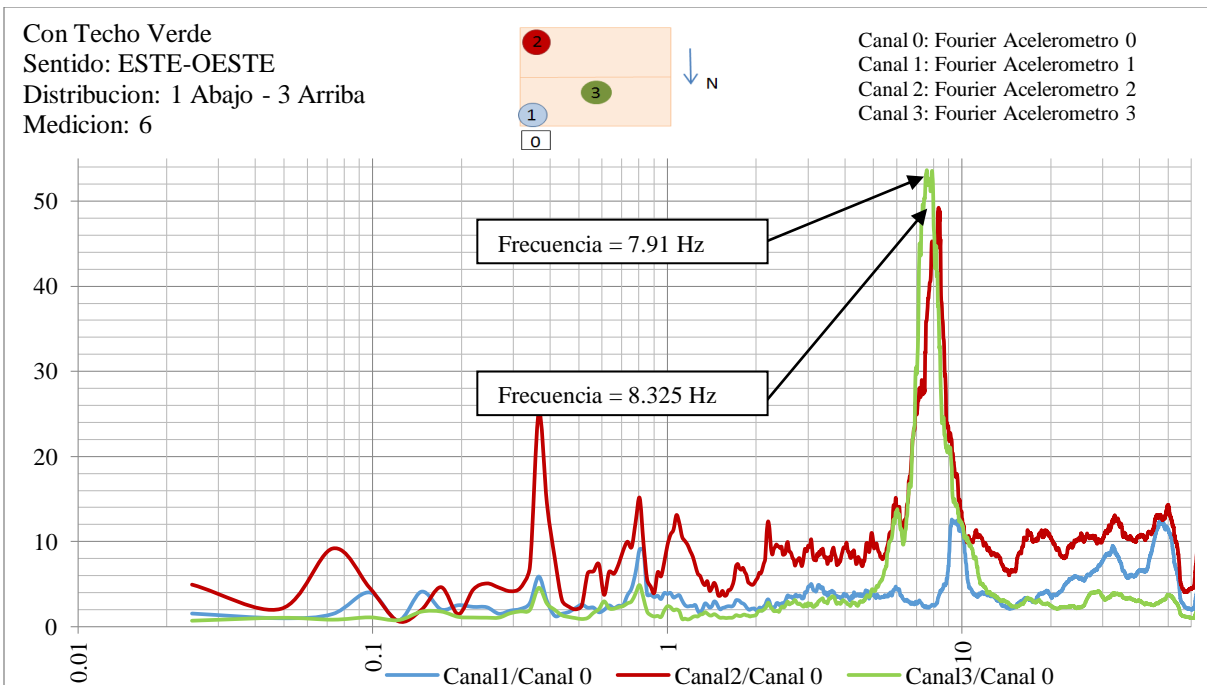


Figura 3.29: Función de transferencia. Vivienda con techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 6.  
Unidades eje X: Hertz

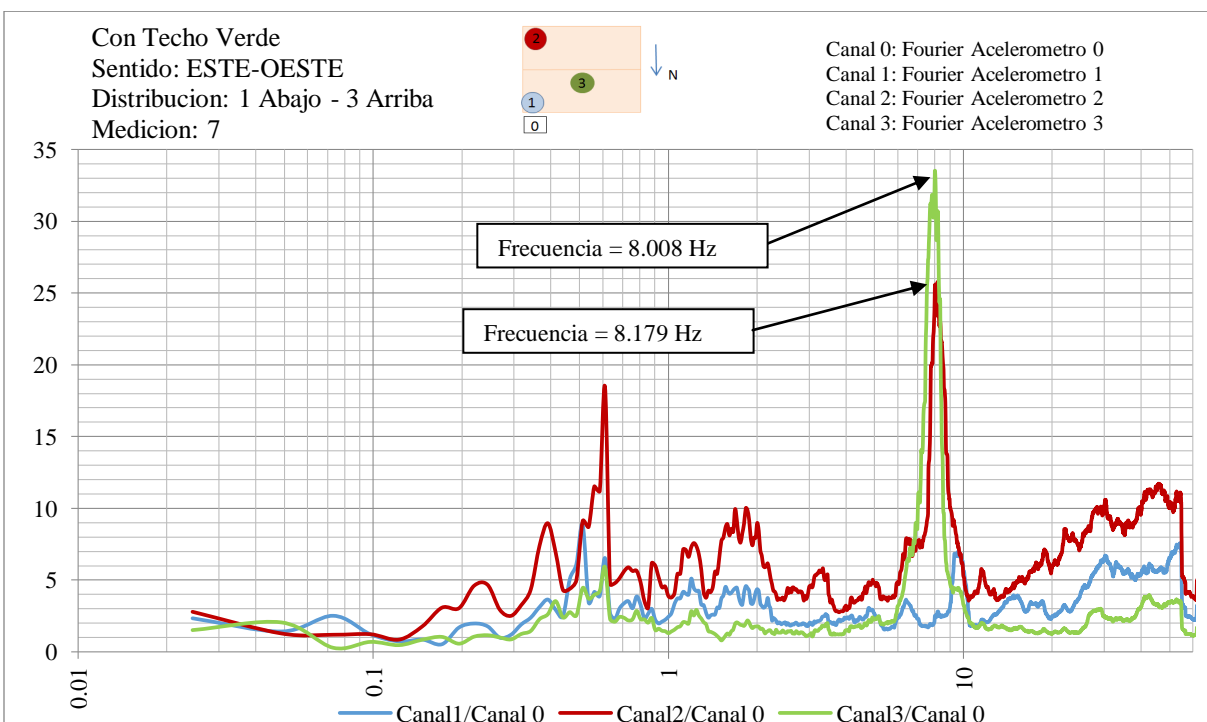


Figura 3.30: Función de transferencia. Vivienda con techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 7.  
Unidades eje X: Hertz

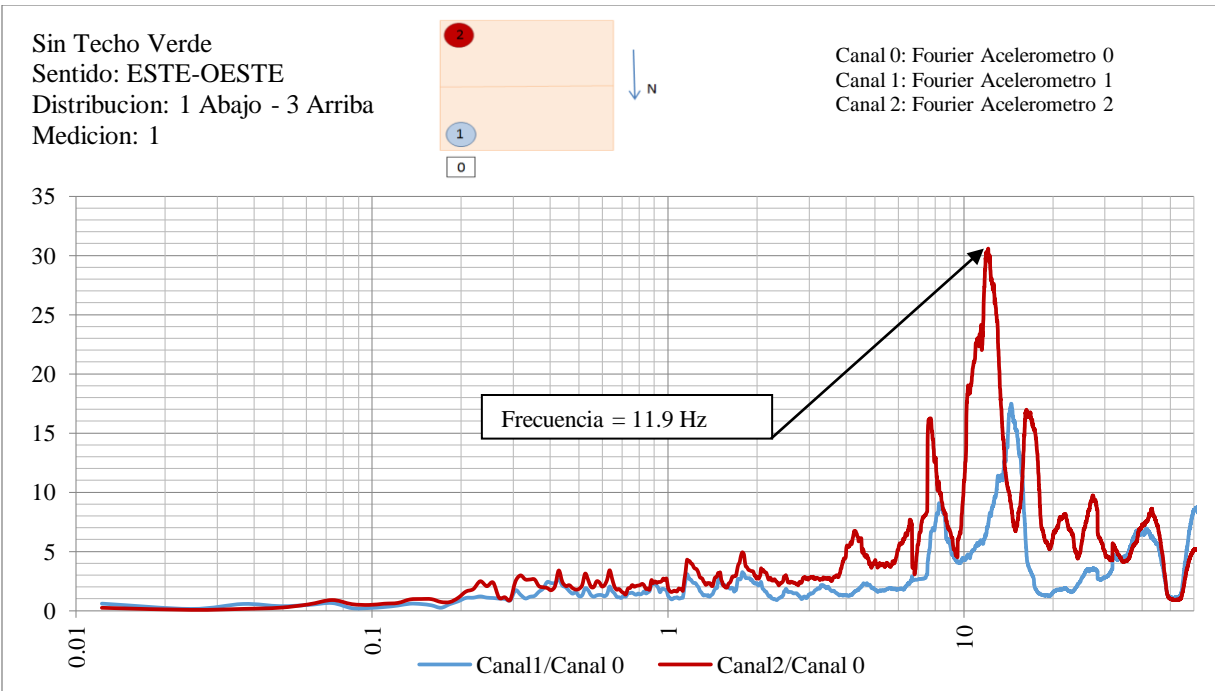


Figura 3.31: Función de transferencia. Vivienda sin techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 1.  
Unidades eje X: Hertz

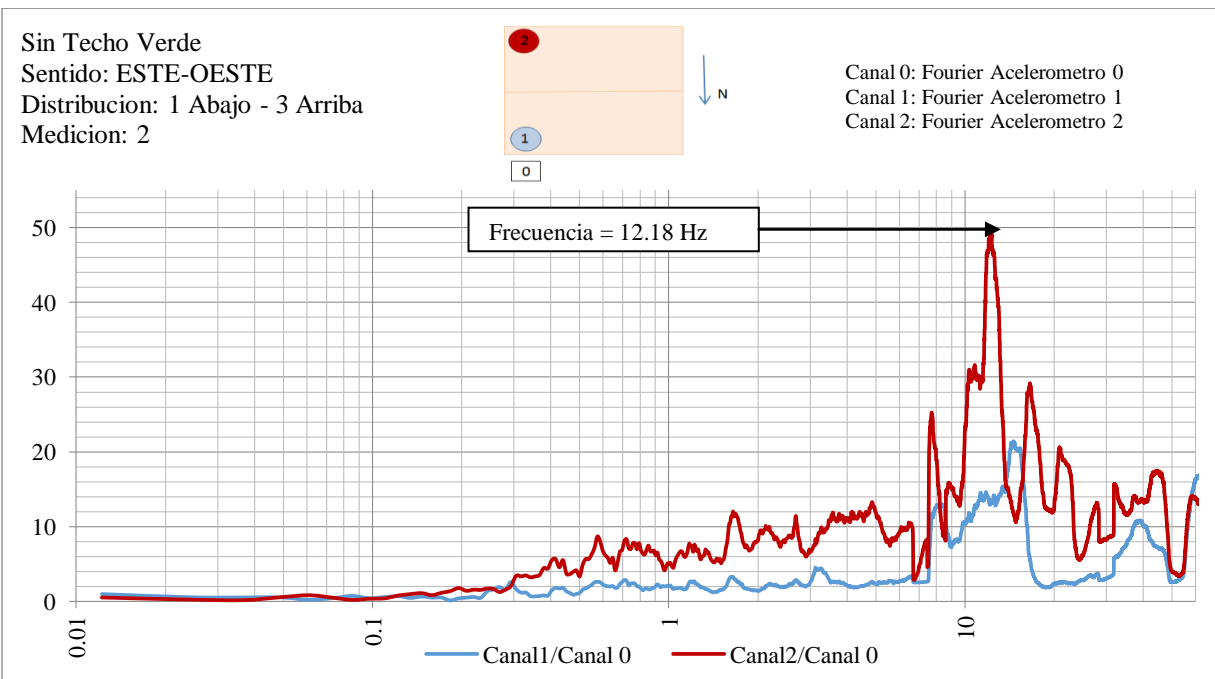


Figura 3.32: Función de transferencia. Vivienda sin techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 2.  
Unidades eje X: Hertz

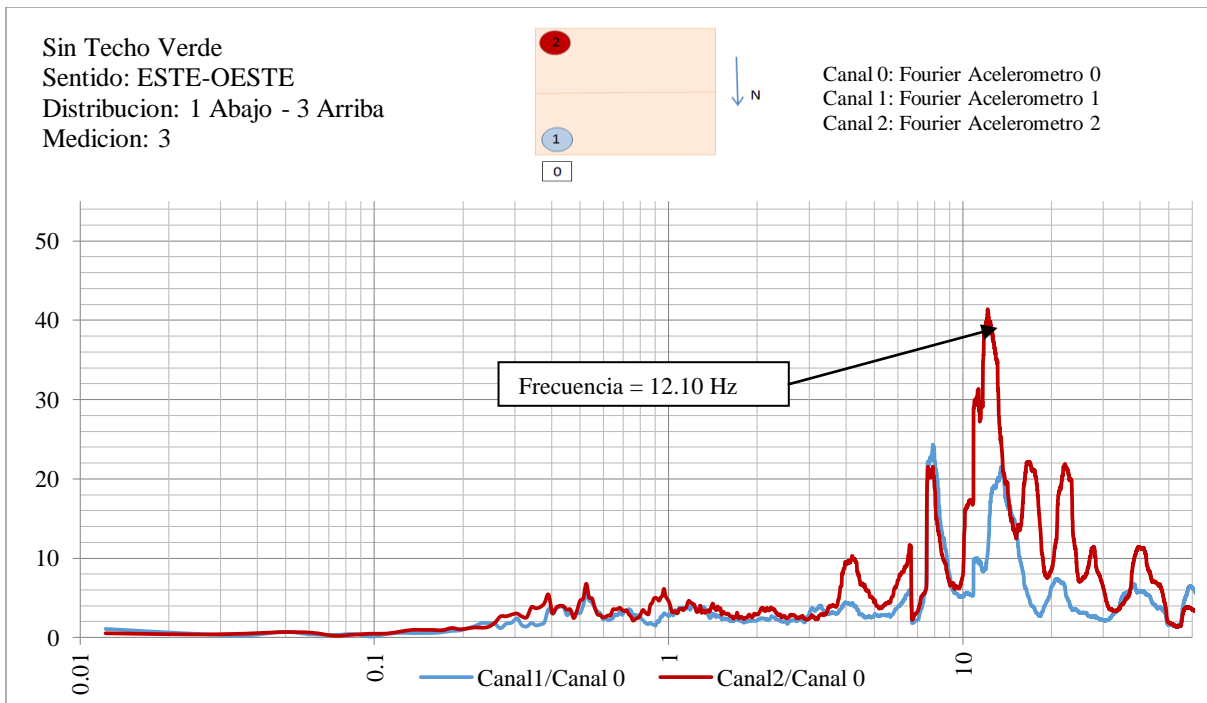


Figura 3.33: Función de transferencia. Vivienda sin techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 3.  
 Unidades eje X: Hertz

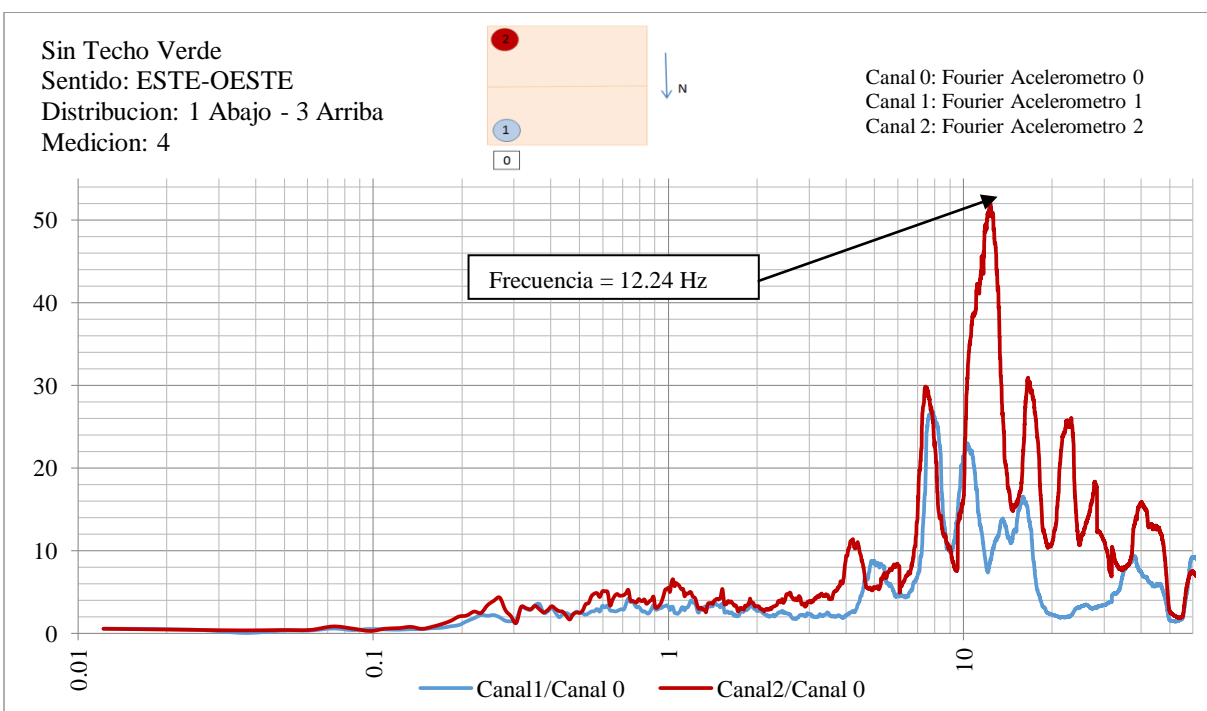


Figura 3.34: Función de transferencia. Vivienda sin techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 4.  
 Unidades eje X: Hertz

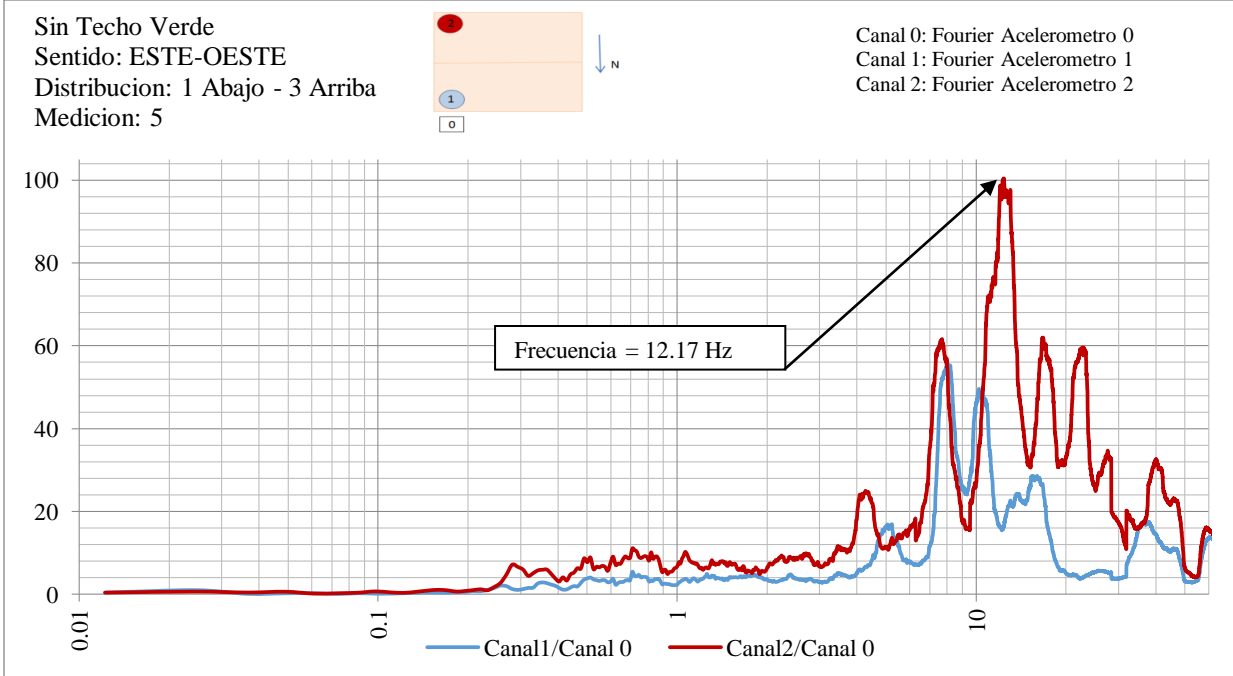


Figura 3.35: Función de transferencia. Vivienda sin techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 5.  
Unidades eje X: Hertz

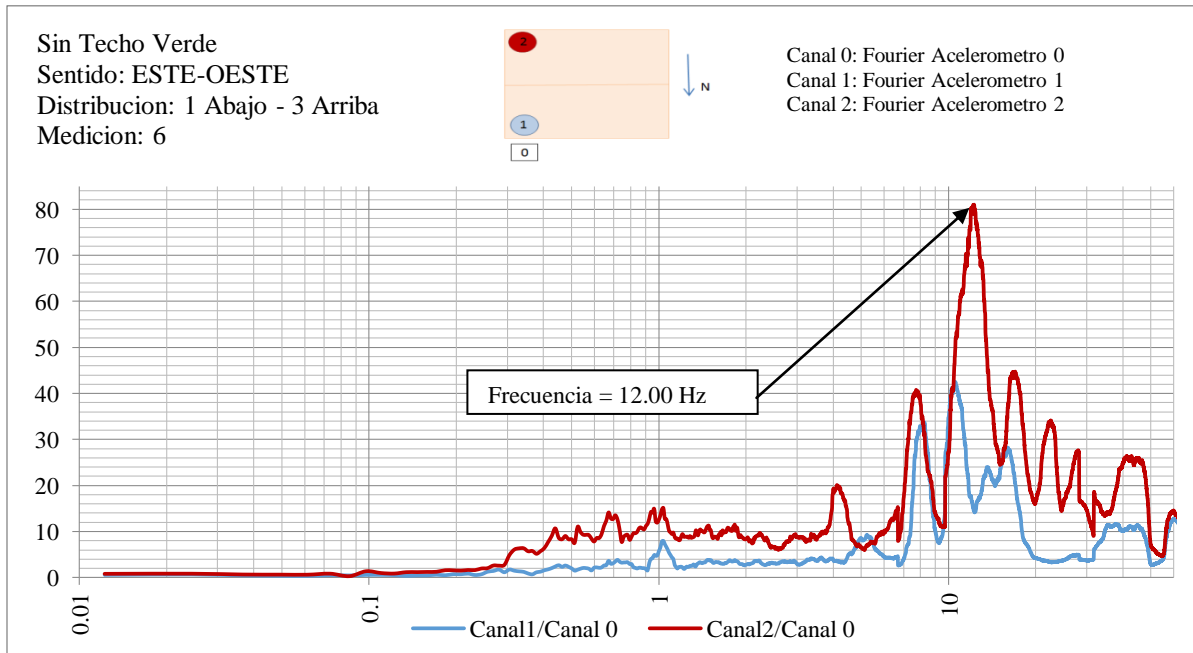


Figura 3.36: Función de transferencia. Vivienda sin techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 6.  
Unidades eje X: Hertz

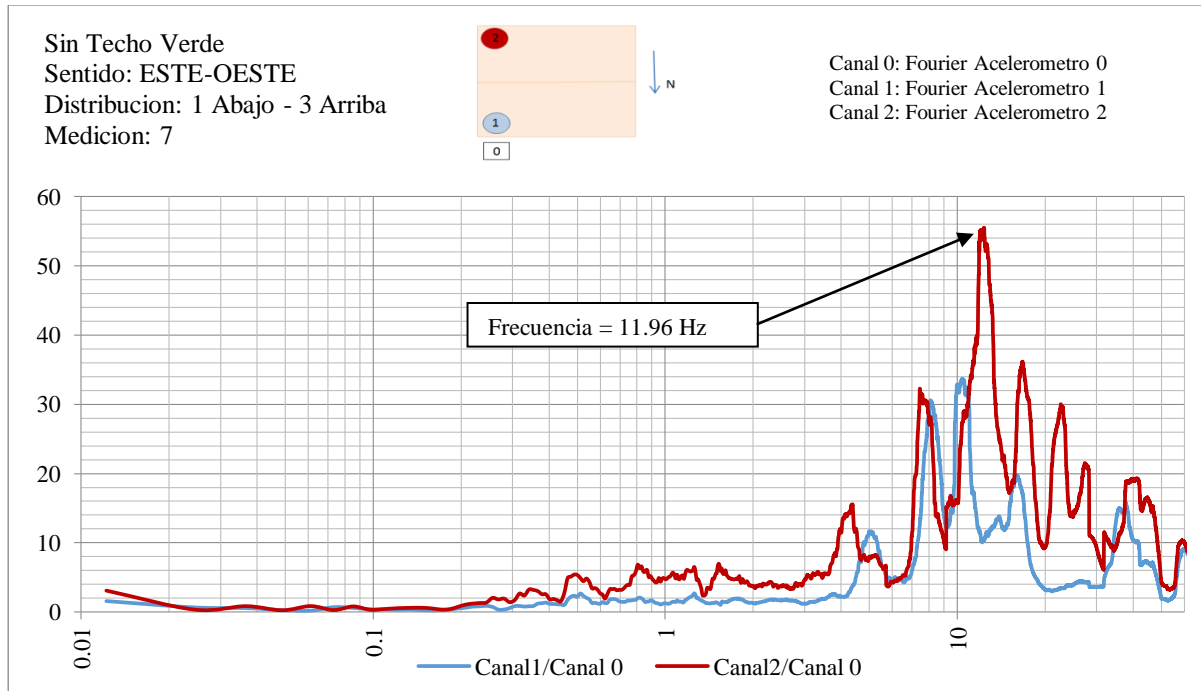


Figura 3.37: Función de transferencia. Vivienda sin techo verde. Sentido Este-Oeste. Medición 7. Unidades eje X: Hertz

Consolidando el análisis de las anteriores graficas se definieron las frecuencias experimentales de la estructura y de allí se calculó el periodo fundamental de la estructura.

En la tabla 3.3 se muestra el cálculo del periodo experimental de la estructura sin techo verde y

en la tabla 3.4 se muestra el periodo estructural de la vivienda con techo verde.

Medición	Frecuencia (Hertz)	Periodo (seg)
1	11.902	0.084
2	12.180	0.082
3	12.100	0.083
4	12.240	0.082
5	12.170	0.082
6	12.000	0.083
7	11.960	0.084
Promedio	12.080	0.083

Tabla 3.4: Frecuencias y Periodos derivados de la Función de transferencia. Vivienda sin techo verde

Medición	Frecuencia - Canal 2 (Hertz)	Frecuencia - Canal 3 (Hertz)	Frecuencia promedio (Hertz)	Periodo (seg)
1	7.980	8.150	8.065	0.124
2	7.983	8.200	8.092	0.124
3	8.276	8.276	8.276	0.121
4	8.106	7.861	7.983	0.125
5	7.930	8.400	8.165	0.122
6	8.325	7.910	8.118	0.123
7	8.179	8.008	8.093	0.124
Promedio	8.111	8.115	8.113	0.123

Tabla 3.5: Frecuencias y Periodos derivados de la Función de transferencia. Vivienda con techo verde.

A primera vista se ve un aumento significativo del periodo cuando la casa prefabricada debe soportar la carga extra del techo verde, esto es razonable sabiendo que el aumento de masa incrementa el periodo de un sistema estructural. Las mediciones de frecuencia tienen un error aproximado del 0.05% de acuerdo con la precisión de los aparatos. En el capítulo 4 de resultados se profundizará sobre el efecto de esta variación de periodo y se evaluará la vulnerabilidad sísmica de la vivienda.

Para terminar este Capítulo se deben mostrar las gráficas de Función de Transferencia obtenidas en el sentido Norte-Sur. En la Figura 3.38 y Figura 3.39 se identifican gran cantidad de picos a diferentes frecuencias, esto da como desenlace que los datos medidos en dirección Norte-Sur no son concluyentes y seleccionar alguno de estos periodos como el periodo fundamental no es lo más indicado. Esto ratifica lo nombrado en el Capítulo 3.2.1, en donde se menciona que la vivienda tendrá desplazamientos horizontales en dirección Este-Oeste principalmente y legitima la decisión de realizar solo dos (2) mediciones en la dirección Norte-Este.

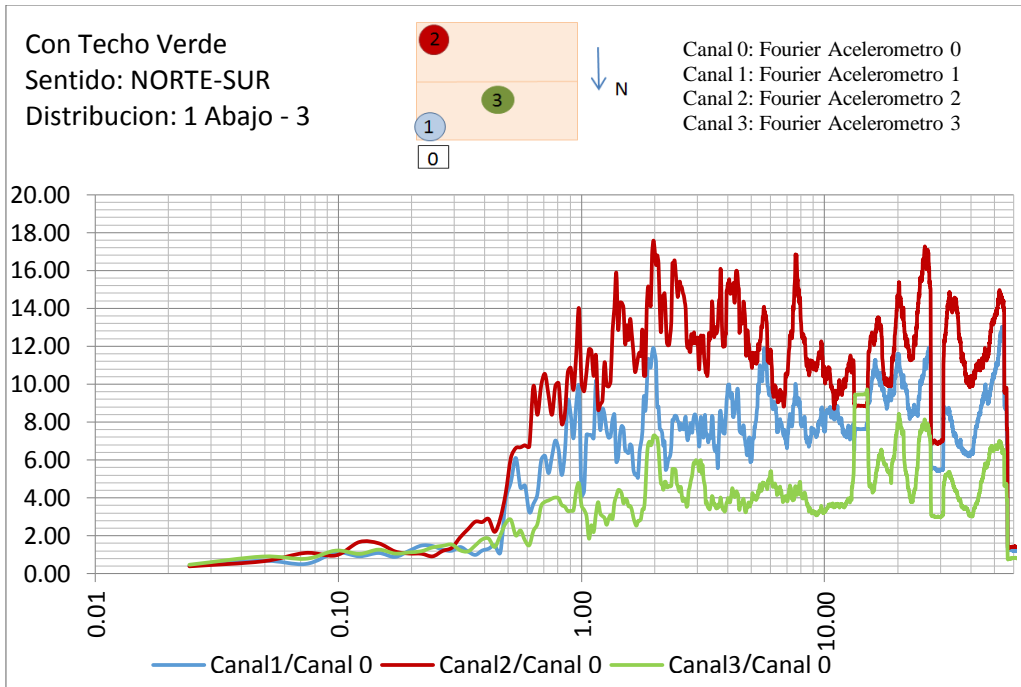


Figura 3.38: Función de transferencia. Vivienda con techo verde. Sentido Norte-Sur. Medición 1.  
Unidades eje X: Hertz

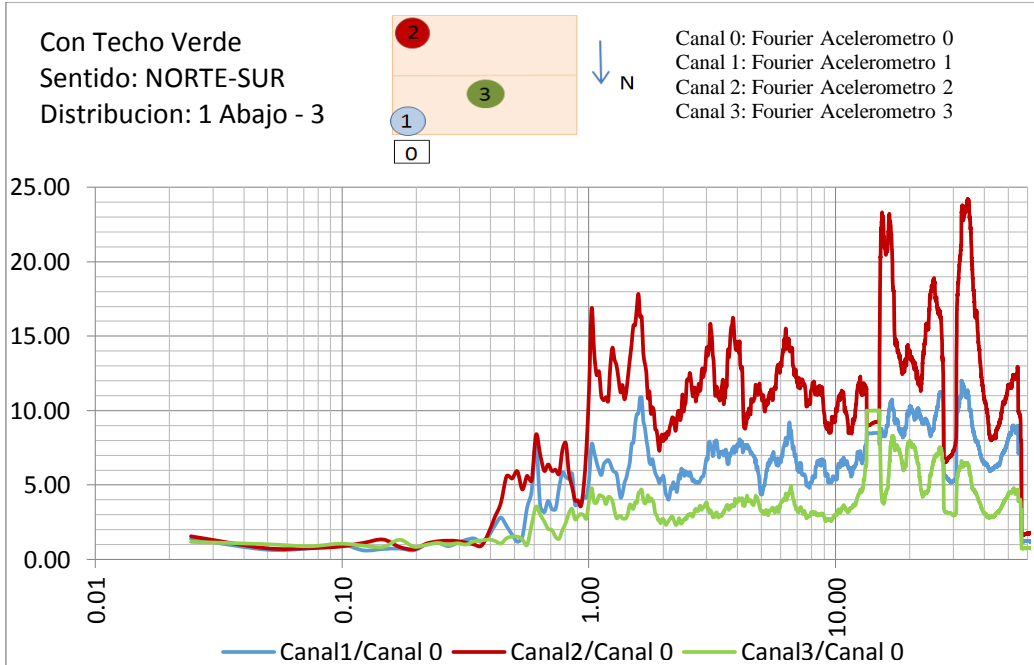


Figura 3.39: Función de transferencia. Vivienda con techo verde. Sentido Norte-Sur. Medición 2.  
Unidades eje X: Hertz



### **3.3 MODELACIÓN ANALÍTICA DE LA VIVIENDA**

Con ayuda de la herramienta computacional SAP2000 V15<sup>1</sup> se desarrollaron dos modelos numéricos en paralelo, en ambos modelos se mantuvieron idénticas características geométricas y mecánicas de los materiales, sin embargo solo a uno de los dos modelos se le aplicó la carga correspondiente al Techo Verde inducido por las botellas PET y otros accesorios como el sistema de riego. Para acercarse un poco más al comportamiento independiente de cada panel, en el modelo computacional cada panel de concreto se realizó con elementos finitos del tamaño real, de manera que solo los vértices van a tener una restricción para moverse de la misma forma que el panel contiguo y las aristas se mueven libremente.

#### **3.3.1 Materiales**

Durante la modelación de la vivienda fue necesaria la creación de tres (3) tipos de materiales, el concreto, el acero y la madera.

Las características iniciales del concreto como el peso unitario y el módulo de elasticidad se determinaron según valores típicos del material y según lo recomendado en la NSR-10 Capítulo C.8.5.1, así pues los valores introducidos en el programa computacional fueron, Peso Unitario igual a 2100 Kg/m<sup>3</sup> y el Módulo de Elasticidad ( $E_c$ ) correspondiente a un concreto de 21 MPa (210 Kg/cm<sup>2</sup>) es igual a 21.538,0 MPa (  $2,196 \times 10^{-9}$  Kg/m<sup>2</sup>), el concreto se asignó para todos los paneles modulares de concreto.

De forma similar el acero se destinó para los perfiles de acero galvanizado, incluyendo Esquineros, Tipo 1, Uniones simples y Vigas del Techo, mientras que las propiedades mecánicas se especificaron como, Peso Unitario ( $U$ ) = 7800 Kg/m<sup>3</sup> y Módulo de Elasticidad ( $E$ ) = 200.000 MPa (NSR-10 C.8.5.2).

---

<sup>1</sup> SAP 2000 Three Dimensional Static and Dynamic Finite Element Analysis and Design of Structures, Nonlinear 15.1.0. Computers and Structures Inc. Berkeley, California, 2003.

Referente a la madera los valores escogidos como Peso Unitario (U) y Modulo de Elasticidad (E) fueron 900 Kg/m<sup>3</sup> y 49.000 MPa, respectivamente, precisa advertir que la madera es un material heterogéneo, compuesto y anisotrópico, por lo que sus propiedades mecánicas varían de acuerdo a factores como la humedad, el sentido de las fibras y defectos e imperfecciones, por lo que predecir su comportamiento estructural es mucho más complejo y se aumenta el margen de error. No obstante este material no tiene influencia significativa en el sistema estructural, debido a que no hace importante del sistema de resistencia sísmica.

### 3.3.2 Elementos estructurales.

Los perfiles de acero y las vigas de madera se modelaron como elementos ‘frame’, y se crearon cinco tipos de secciones ‘frames’ para los distintos tipos de perfiles en acero y para la viga de madera. El Perfil tipo “Unión Simple” y las vigas de madera se diseñaron por medio de figuras conocidas y ya preestablecidas en el programa SAP2000, como los son el rectángulo y la T.

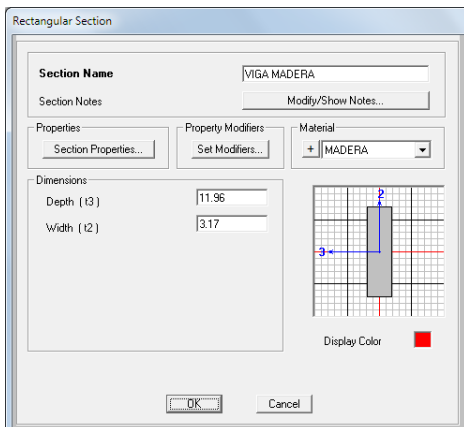


Figura 3.40: Perfil Viga de madera introducido en SAP2000

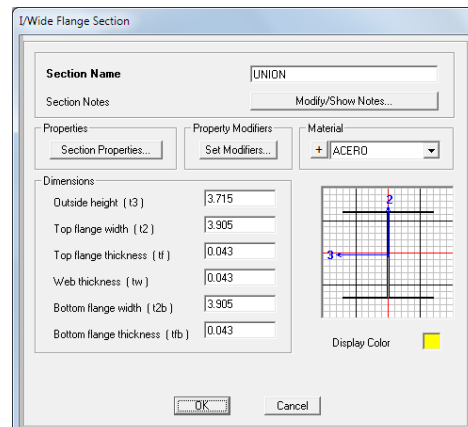


Figura 3.41: Perfil Unión Simple introducido en SAP2000

En distinta forma las secciones, Esquinero, Tipo 1 y viga techo, por ser figuras geométricas no convencionales fue necesario calcular propiedades como área, constante torsional y momento de inercia alrededor del eje mayor y menor, manualmente e introducirlas como Secciones Generales en el modelo numérico.

Property Data

Section Name: ESQUINERA

Properties:

Cross-section (axial) area	0.7209	Section modulus about 3 axis	1.394
Torsional constant	0.4439	Section modulus about 2 axis	0.4183
Moment of Inertia about 3 axis	1.4417	Plastic modulus about 3 axis	1.6396
Moment of Inertia about 2 axis	3.0899	Plastic modulus about 2 axis	0.6891
Shear area in 2 direction	0.	Radius of Gyration about 3 axis	1.6063
Shear area in 3 direction	0.	Radius of Gyration about 2 axis	0.8679

OK Cancel

Figura 3.42: Perfil Esquinero introducido en SAP2000

Property Data

Section Name: TIP01

Properties:

Cross-section (axial) area	0.8058	Section modulus about 3 axis	1.394
Torsional constant	3.958E-04	Section modulus about 2 axis	0.4183
Moment of Inertia about 3 axis	2.008	Plastic modulus about 3 axis	1.6396
Moment of Inertia about 2 axis	3.344	Plastic modulus about 2 axis	0.6891
Shear area in 2 direction	0.	Radius of Gyration about 3 axis	1.6063
Shear area in 3 direction	0.	Radius of Gyration about 2 axis	0.8679

OK Cancel

Figura 3.43: Perfil Tipo 1 introducido en SAP2000

Property Data

Section Name: VIGA TECHO

Properties:

Cross-section (axial) area	0.4401	Section modulus about 3 axis	1.394
Torsional constant	2.710E-04	Section modulus about 2 axis	0.4183
Moment of Inertia about 3 axis	0.55	Plastic modulus about 3 axis	1.6396
Moment of Inertia about 2 axis	1.055	Plastic modulus about 2 axis	0.6891
Shear area in 2 direction	0.	Radius of Gyration about 3 axis	1.6063
Shear area in 3 direction	0.	Radius of Gyration about 2 axis	0.8679

OK Cancel

Figura 3.44: Perfil Viga Techo introducido en SAP2000

Para concluir esta actividad de modelación, se trazaron los ejes de la estructura y se dibujaron las columnas y vigas de la casa, tal cual y como se mostró en el plano arquitectónico de la vivienda. Igualmente la asignación de cada sección se ejecutó de acuerdo a lo estipulado en la Figura 3.3 (Plano de la ubicación de los Perfiles estructurales). Posteriormente se delinearon los paneles de concreto como Secciones de área o 'Shell' con un espesor promedio de 3.2 cm. Así pues el resultado de la modelación es el siguiente (Figura 3.45):

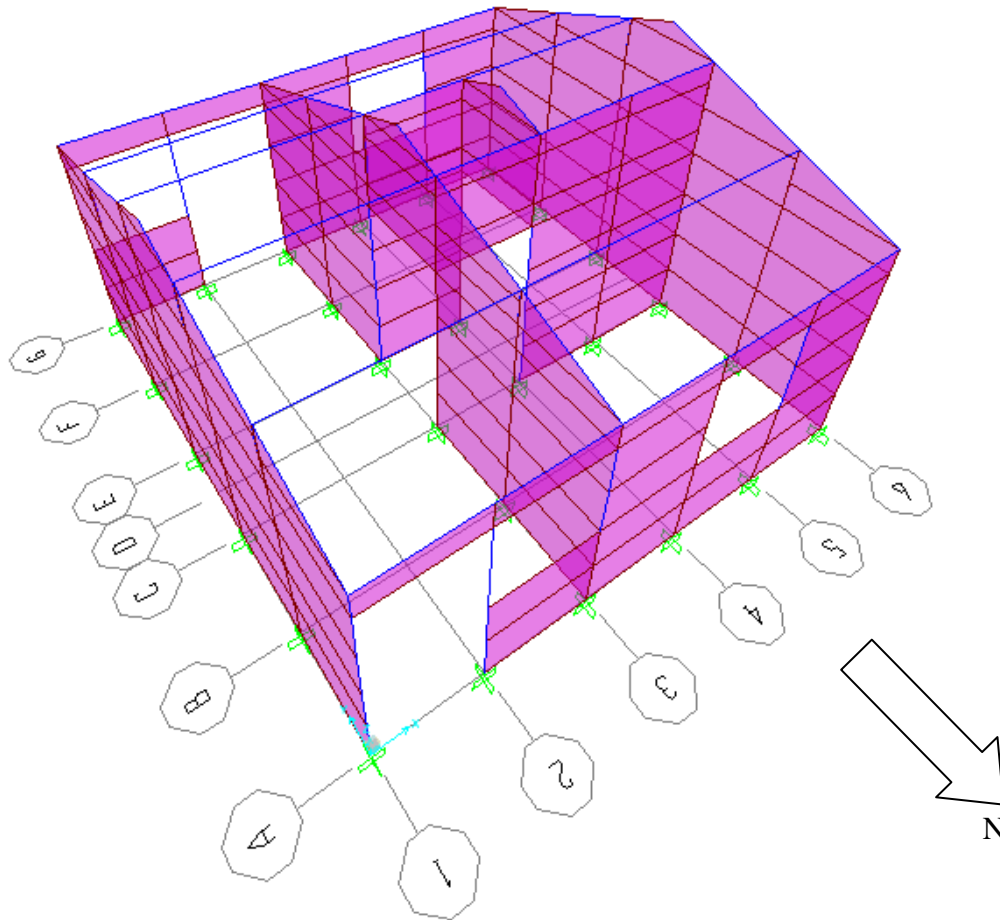


Figura 3.45: Modelación de la estructura en SAP2000

Se anota en la figura 3.45 que por cada panel se generó un elemento tipo 'shell' para no generar conectividades inexistentes en la edificación real.

### 3.3.3 Aplicación de Cargas

Las cargas correspondientes al Techo Verde, compuesto por las botellas individuales, el tanque de almacenamiento de agua y el sistema de riego, así como las tejas de fibrocemento se aplicaron a las cuatro (4) vigas de madera como cargas uniformemente distribuidas. Para esto fue imperioso calcular el peso total de cada uno de estos ítems y mediante el método de áreas aferentes establecer el valor de la carga distribuida en cada una de las vigas de madera.

Con el fin de calcular las cargas inducidas por el techo verde con mayor exactitud, se pesaron cinco (5) botellas de cada una de las líneas, se sacó el promedio por línea y se dedujo el peso total de cada línea. Obteniendo los siguientes resultados.

Línea	Medición 1 (Kg)	Medición 2 (Kg)	Medición 3 (Kg)	Medición 4 (Kg)	Medición 5 (Kg)	Promedio (Kg)	Peso (Kg)
Línea 1	1.957	2.055	2.125	2.108	1.838	2.017	54.4
Línea 2	2.113	1.98	2.085	2.108	1.914	2.040	55.1
Línea 3	2.11	2.118	1.828	2.007	1.883	1.989	53.7
Línea 4	2.067	2.217	2.056	2.292	2.023	2.131	57.5
Línea 5	2.122	2.059	2.037	2.203	1.903	2.065	55.7
Línea 6	2.25	1.913	2.448	2.105	2.521	2.247	60.7
Peso total botellas PET (Kg)							337.203
Tanque agua (Kg)							3
sistema riego (Kg)							5
Peso Total techo Verde (Kg)							345.2

Tabla 3.6: Pesos botellas PET de gaseosa y accesorios

Para identificar las características de la teja de fibrocemento se anotó la referencia de las mismas, teja No. 10 Colombit P7, y se consultó el catalogo del fabricante (Figura 3.46).

CUADRO DE DIMENSIONES										
NOMBRE	DIMENSIÓN TOTAL			DIMENSIÓN ÚTIL			TRASLAPO		PESO	CÓDIGO
	Long. m	Ancho m	Superf. m <sup>2</sup>	Long. m	Ancho m	Superf. m <sup>2</sup>	Long. m	Transv. m	Kg.	Producto Gris
No. 3	0.915	0.920	0.842	0.775	0.875	0.678	0.14	0.045	10.10	101100139
No. 4	1.220	0.920	1.122	1.080	0.875	0.945	0.14	0.045	13.44	101100121
No. 5	1.525	0.920	1.403	1.385	0.875	1.212	0.14	0.045	16.78	101100147
No. 6	1.830	0.920	1.648	1.690	0.875	1.479	0.14	0.045	20.21	101100154
No. 8	2.440	0.920	2.245	2.300	0.875	2.012	0.14	0.045	26.89	101100162
No. 10	3.050	0.920	2.806	2.910	0.875	2.546	0.14	0.045	33.65	101100188

Figura 3.46: Catalogo tejas de fibrocemento Colombit P7 tomado de SKINCO.

En la tabla 3.6 se muestra el cálculo del peso de las tejas. Es necesario recalcar que a este valor inicial se debe agregar el peso de accesorios como los amarres y el caballete de la cumbrera, correspondiente al 5% del peso de las tejas.

Peso por unidad	Kg	33.7
Área Efectiva teja	m <sup>2</sup>	2.546
Peso por m <sup>2</sup>	Kg/m <sup>2</sup>	13.2
Peso total	Kg	335.6
Peso más accesorios (5%)	Kg	352.4

Tabla 3.7: Calculo del peso del tejado de fibrocemento

Al final de este proceso se aplicaron las cargas distribuidas del techo verde y del tejado en unidades de fuerza por metro lineal en las vigas de madera de los pórticos B (Figura 3.47), C (Figura 3.48), E (Figura 3.49), y F (Figura 3.50), debe mencionarse que estas cargas fueron utilizadas para estimar las masas del sistema adicionales al peso propio de los paneles de concreto.

$W_{\text{techo verde}} = 17.57 \text{ Kg/m}$   
 $W_{\text{teja}} = 21.79 \text{ Kg/m}$

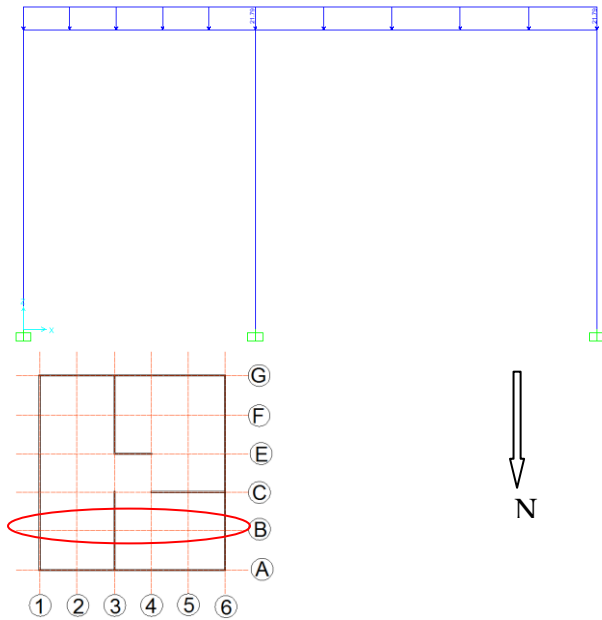


Figura 3.47: Pórtico eje B, asignación carga por tejado y techo verde

$W_{\text{techo verde}} = 17.57 \text{ Kg/m}$   
 $W_{\text{teja}} = 14.15 \text{ Kg/m}$

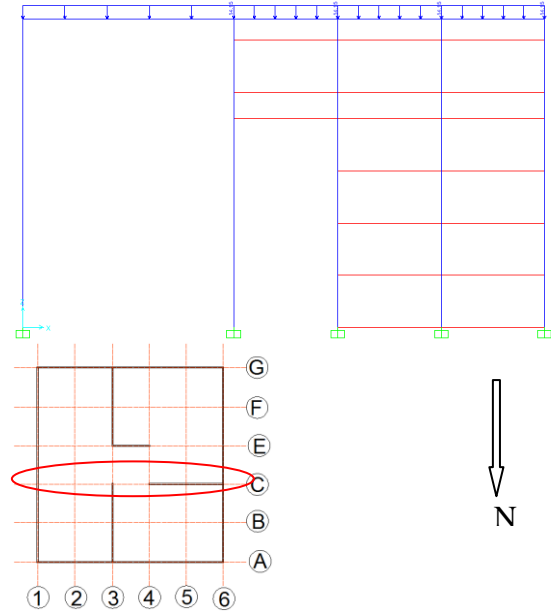


Figura 3.48: Pórtico eje C, asignación carga por tejado y techo verde

$W_{\text{techo verde}} = 17.57 \text{ Kg/m}$   
 $W_{\text{teja}} = 14.15 \text{ Kg/m}$

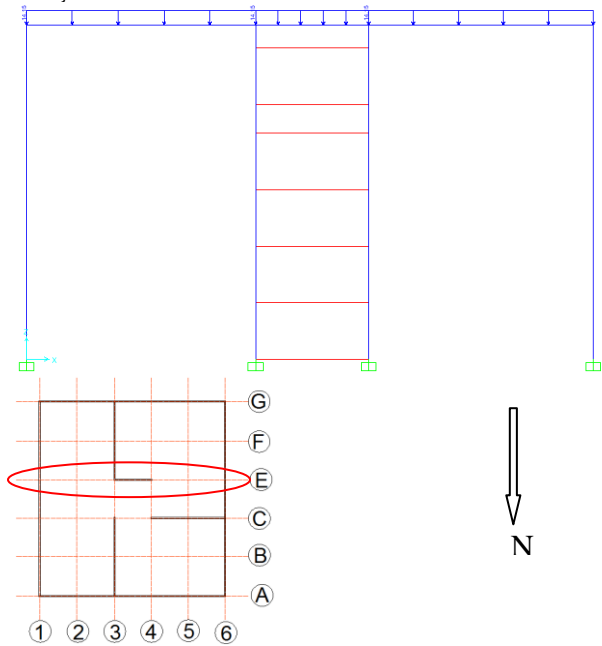


Figura 3.49: Pórtico eje E, asignación carga por tejado y techo verde

$W_{\text{techo verde}} = 17.57 \text{ Kg/m}$   
 $W_{\text{teja}} = 21.79 \text{ Kg/m}$

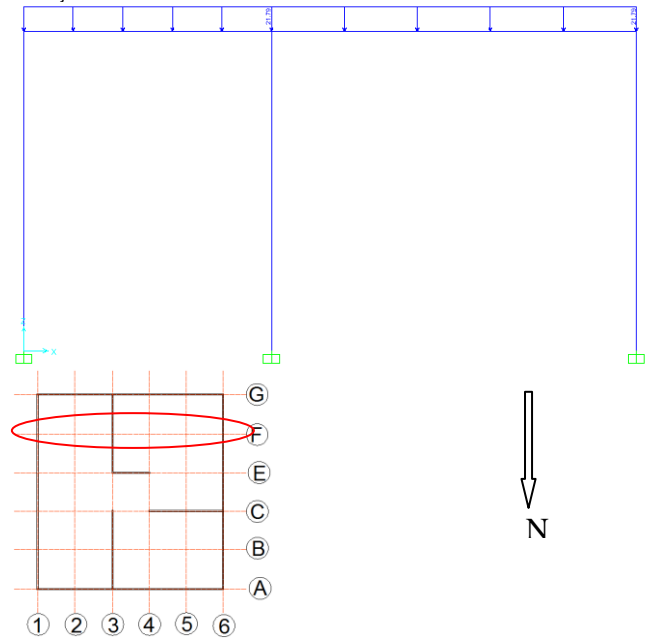


Figura 3.50: Pórtico eje F, asignación carga por tejado y techo verde

Los modelos se cargaron con el Espectro de aceleraciones calculado en el capítulo 3.1.4 y se crearon dos casos de carga, el primero cuando el sismo afecta la casa en dirección Este-Oeste con el cien (100) porciento de intensidad y la dirección Norte-Sur con el treinta (30) porciento de la intensidad. Mientras que en el segundo caso se invirtieron los porcentajes de intensidad que afectan a cada dirección. La forma en que se introdujeron estos casos de carga para el análisis dinámico de la estructura en el programa SAP2000 se muestra enseguida.

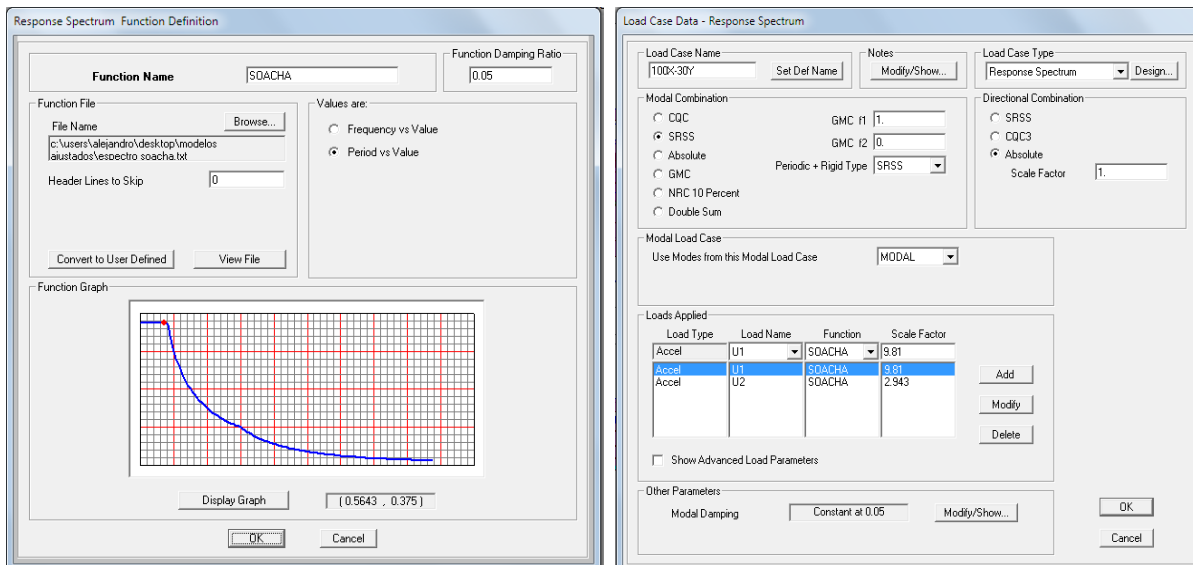


Figura 3.51: Creación carga sísmica por espectro de aceleraciones NSR-10 para Soacha.

### 3.3.4 Periodo Fundamental Teórico y Porcentajes de participación de masa

Una vez se introdujeron las condiciones iniciales, como materiales, geometría y cargas muertas, al modelo, se procedió a determinar el periodo fundamental de la vivienda, para esto se debía escoger el modo de vibración en el que participara el mayor porcentaje de masa.

Al conocer los periodos estructurales iniciales de los modelos, se vio la necesidad de calibrar el módulo de elasticidad del concreto para que los periodos calculados por el método de los porcentajes de participación de masa fueran lo más parecido posibles a los proyectados por la



función de transferencia, este proceso se argumentara con mayor entereza en el capítulo 3.3.5 de Calibración del Modelo.

Con los modelos calibrados en SAP2000 y los datos de participación de masas se trazaron las gráficas de las figuras 3.52 (Con techo verde) y 3.54 (Sin techo verde).

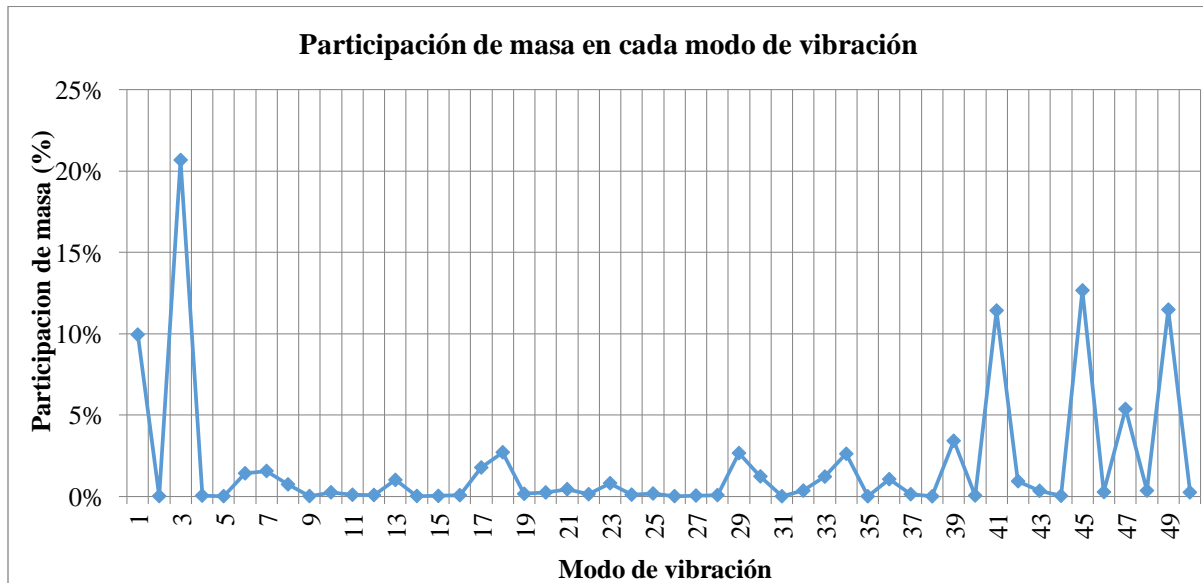
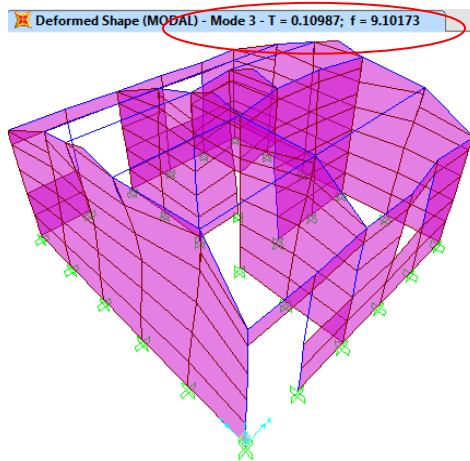


Figura 3.52: Participación de masa para cada modo de vibración. Vivienda con techo verde

De la gráfica anterior se identifica el modo de vibración número tres (3), como el movimiento que más participación de masa tiene. Como consecuencia de esto, el periodo fundamental teórico de la estructura será el indicado en este modo de vibración, así pues el periodo correspondiente al caso anterior se muestra en la Figura 3.53.



Periodo (T)= 0.11 segundos

Figura 3.53: Modo de vibración número 3. Vivienda con techo verde.

De igual forma se halló el periodo fundamental de la estructura sin el techo verde. La grafica de participación de masa se muestra en la figura 3.52.

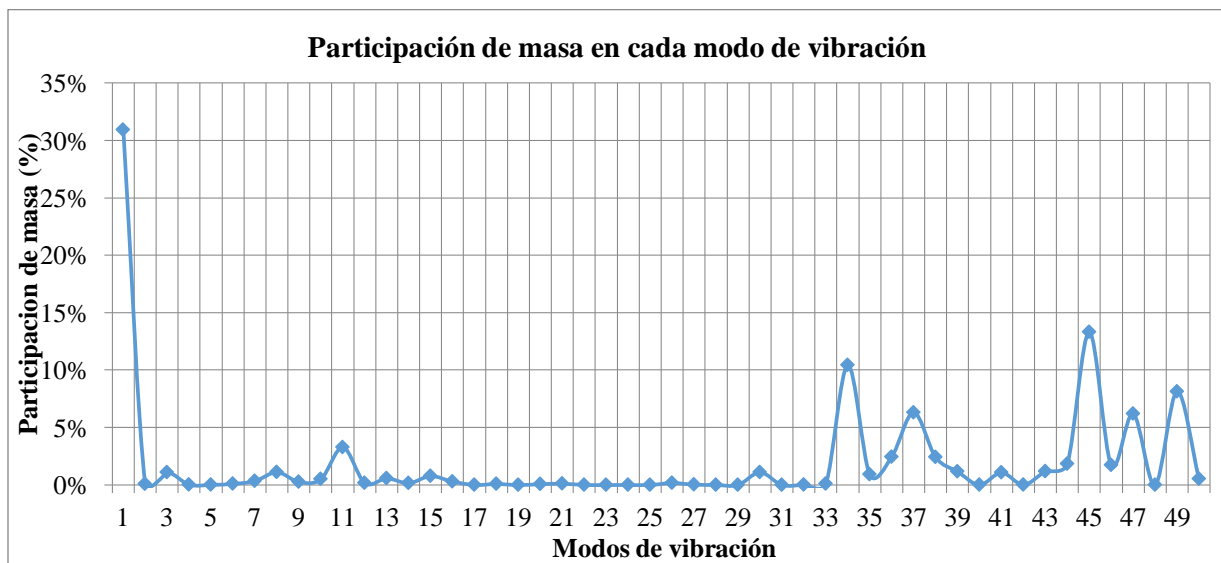
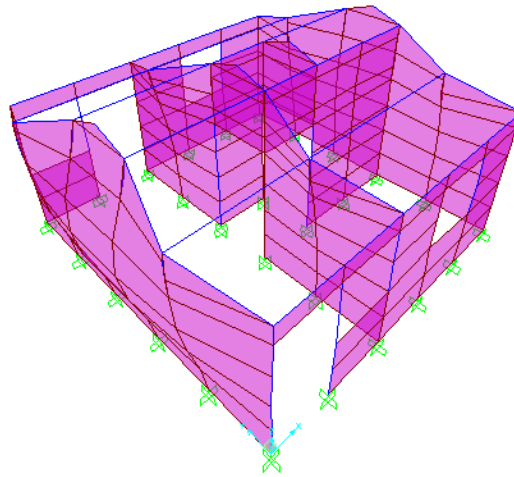


Figura 3.54: Participación de masa para cada modo de vibración. Vivienda sin techo verde

En este caso el modo de vibración con mayor porcentaje de participación de masa fue el número uno (1) (Figura 3.55)

Deformed Shape (MODAL) - Mode 1 - T = 0.09371; f = 10.67116



Periodo (T) = 0.093 segundos

Figura 3.55: Modo de vibración número 1. Vivienda sin techo verde.

### 3.3.5 Calibración del modelo

Al comparar el modelo numérico inicial con los resultados arrojados por los acelerómetros, se identificó que la estructura poseía más rigidez de la que se exponía en la información deducida de la función de transferencia. A causa de esto se decidió bajar el Modulo de Elasticidad del concreto.

Basándose en la investigación (Ruiz, Vacca & Leon, 2007) se reformulo la ecuación del módulo de elasticidad del concreto en función de la resistencia a compresión, según esta publicación el código Colombiano de Construcción Sismo Resistente del año 2010 (NSR-10) sobreestima el módulo de elasticidad de los concretos para ciudad de Bogotá D.C. y mediante un análisis estadístico se determinó el coeficiente que describe correctamente el módulo de elasticidad para los concretos de la ciudad de Bogotá. Los resultados de este trabajo se muestran en la figura 3.56.

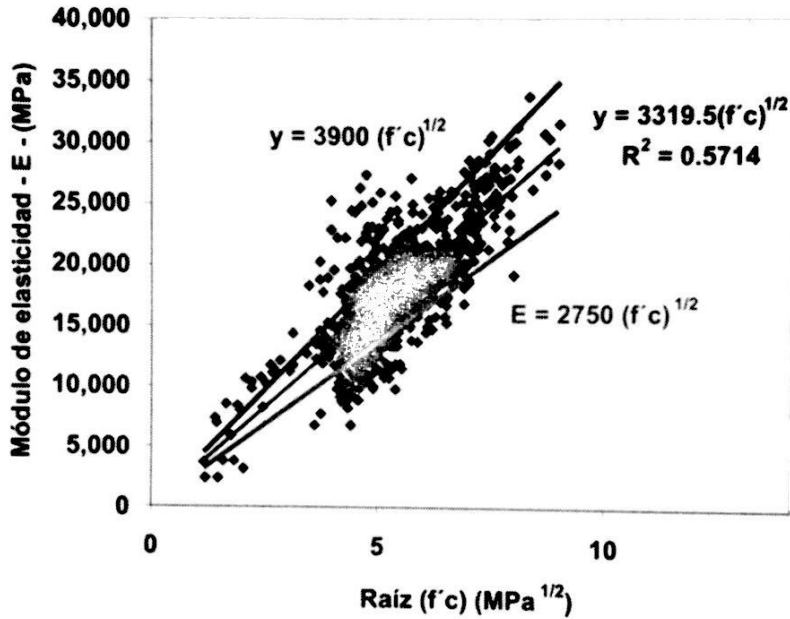


Figura 3.56: Grafica Modulo de elasticidad en función de la raíz del  $f'c$  (Ruiz, Vacca y León, 2007)

A partir de estos estudios, la ecuación del módulo de elasticidad pasara de:  $E = 4700 \sqrt{f'c}$  a  $E = 3900 \sqrt{f'c}$  dando como resultado final que el módulo de elasticidad es igual a 17.872 MPa.

Al modificarse el módulo de elasticidad en los modelos, el porcentaje de error entre los periodos teóricos y los experimentales garantizan la confiabilidad de los datos obtenidos a partir de los modelos numéricos, estos se mostraran en el Capítulo de Resultados.

### 3.3.6 Casos de análisis,

Basándose en el Titulo B de la NSR-10 se establecieron dos tipos de carga sísmica para evaluar los desplazamientos relativos o derivas de la casa prefabricada.

- 1,2 D + 1,0 (Sx + 0,30 Sy)
- 1,2 D + 1,0 (0,3 Sx + Sy).

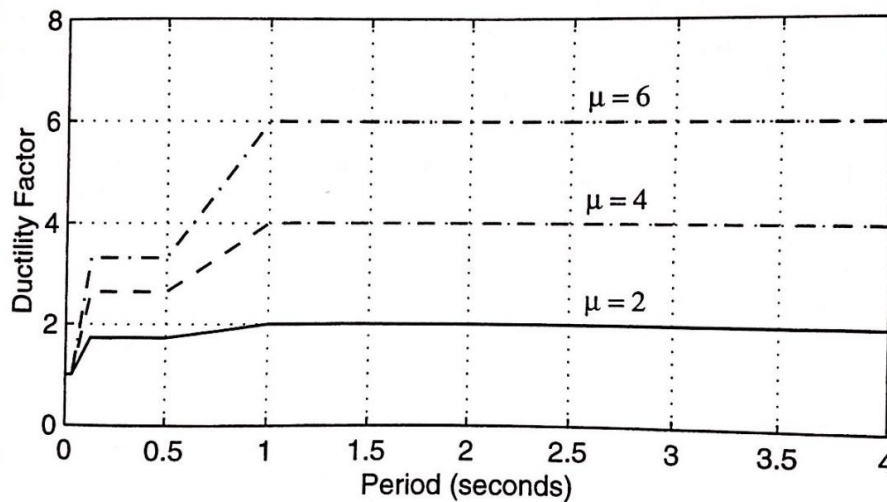
Donde D es la carga muerta constituida por el peso propio de la estructura, el tejado de fibrocemento y el techo verde (Solo en uno de los dos modelos), y S es la Fuerza sísmica que genera el espectro de aceleraciones.

Para evaluar los esfuerzos que afectan los diferentes elementos de la estructura se conformaron tres (3) combinaciones:

- 1,2 D + 1,0 (Ex + 0,30 Ey)
- 1,2 D + 1,0 (0,3 Ex + Ey).
- 1,4 D

Donde E es igual a Fuerza sísmica / Coeficiente de disipación de energía (R).

El Coeficiente de disipación de energía (R) se determinó como 1.0, debido a que construcciones prefabricadas y muy rígidas no disipan tanta energía como otros sistemas constructivos. Esto se apoya en la Norma ATC 19 capítulo 4.5.2, que explica la relación entre el Factor de ductilidad ( $R_u$ ) y el periodo de la estructura, además se afirma que en edificaciones con periodos relativamente cortos, menores a 0.12 segundos, el coeficiente de disipación de energía tiende a ser uno. Esto se puede corroborar en la Figura 3.57.



*Figure 4.7: Newmark and Hall  $R_\mu - \mu - T$  relationship.*

Figura 3.57: Relación Newmark and Hall. Relación de Coeficiente de disipación y periodo. Tomado de la ATC-19

## 4 RESULTADOS

### 4.1 COMPARACION DE PERIODOS

Al analizar los periodos estructurales de la vivienda con techo verde y sin techo verde, se logró identificar un aumento significativo del periodo fundamental cuando se hace uso del techo verde, esto es claramente comprobable en el hecho que el periodo estructural de la vivienda con techo verde aumento un 48% en comparación con el periodo registrado mientras la estructura no presentaba la carga adicional, en la tabla 4.1 se publican los periodos experimentales del estudio.

	Periodo Experimental (Segundos)
Sin techo verde	0,083
Con techo verde	0,123

Tabla 4.1: Periodos experimentales de la estructura con y sin techo verde

Un aumento de periodo es predecible si se tiene en cuenta que el periodo con que oscila una estructura depende principalmente de la rigidez y de la masa de la misma, de tal forma que al aumentar la masa que oscila en el sistema estructural y no aumentar la rigidez se genera un aumento lógico del periodo, estos resultados obtenidos no implican que la estructura sea necesariamente vulnerable ante eventos sísmicos, sin embargo con el objetivo de determinar la vulnerabilidad se examinaran los desplazamientos relativos y los esfuerzo admisibles utilizando como herramienta el modelo numérico .

### 4.2 COMPARACION DE DERIVAS

A partir de los modelos calibrados se comprobaron los desplazamientos relativos (Derivas) y los esfuerzos admisibles por elemento, estos indicadores son indispensables para la resolución y cumplimiento de los objetivos planteados en este escrito.

Antes se debe hacer un paréntesis para recalcar la importancia de tener modelos en SAP2000, con periodos muy cercanos a los medidos experimentalmente y por lo tanto bajos porcentajes de error, de esta manera se asegura la confiabilidad de los resultados generados por los modelos numéricos. A continuación se muestran los periodos definitivos de los modelos una vez fueron calibrados y el respectivo porcentaje de error.

	Modelo SAP2000 (segundos)	Periodo Experimental (segundos)	Error (%)
Sin techo	0,093	0,083	12,05%
Con techo	0,11	0,123	10,57%

Tabla 4.2: Comparación entre Periodos experimentales y numéricos

Como se ilustra en la tabla 4.2, la aproximación de los modelos calibrado es muy buena, pues tienen un error promedio del 11%, lo cual es bastante bueno para este tipo de modelos que incluyen una gran cantidad de variables.

Retomando el análisis de Derivas, en primera instancia se corrieron los modelos con las combinaciones de carga establecidas en el capítulo 3.6.6 de Casos de análisis y se obtuvo los desplazamientos máximos en los nudos de la cubierta. Hecho esto, se calcularon las derivas, siguiendo las directrices de la NSR-10 Capítulo A.6.3 y se diagramaron los resultados de la vivienda con techo verde y sin techo en las Figuras 4,3 y 4,4.

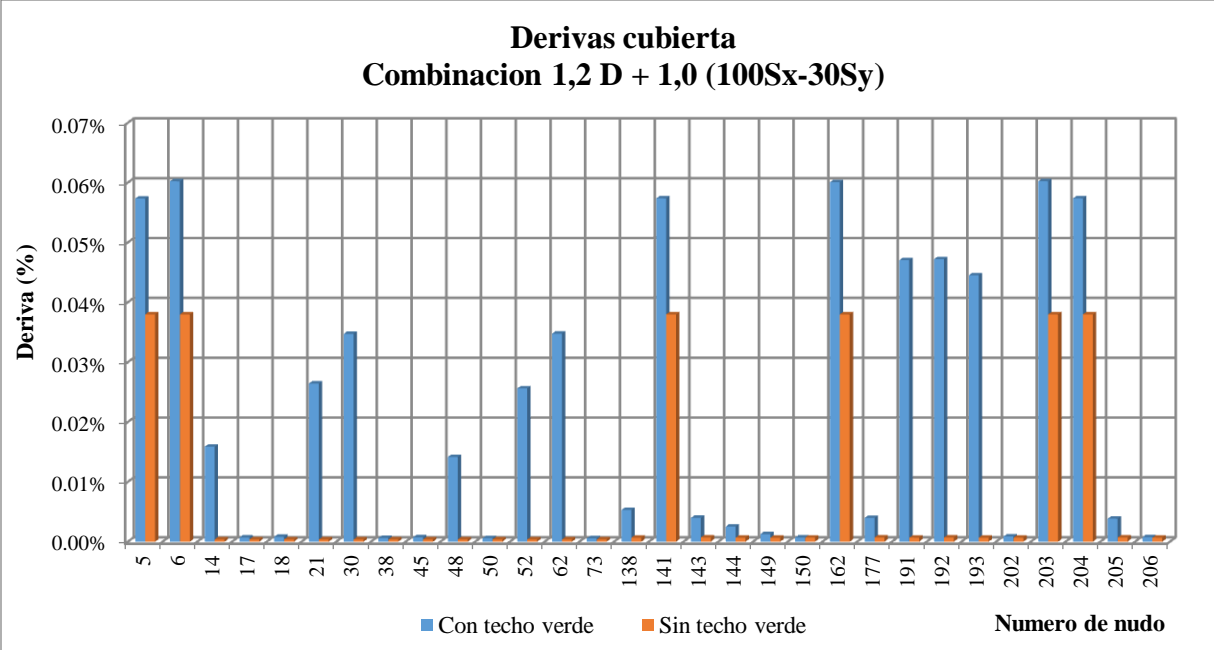


Figura 4.1: Derivas en la cubierta de la estructura con y sin techo verde, ante la combinación 1,2 D + 1,0 (100Sx-30Sy)

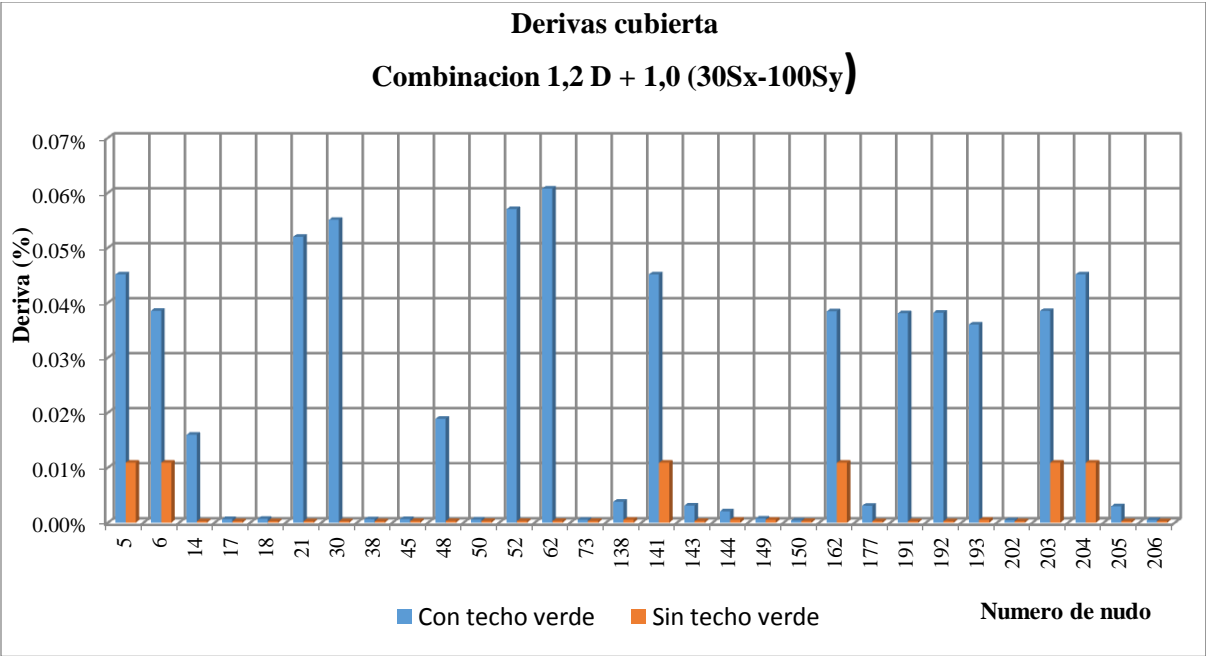


Figura 4.2: Derivas en la cubierta de la estructura con y sin techo verde, ante la combinación 1,2 D + 1,0 (30Sx-100Sy)



De las anteriores graficas se deduce que efectivamente hay un aumento de los desplazamientos cuando está presente el techo verde, no obstante los valores de deriva en ninguno de los dos casos de carga implican riesgo para la estabilidad y funcionalidad de la vivienda prefabricada, esto es correcto decirse teniendo en cuenta que en ninguno de los nudos de la cubierta se supera el 1% de Deriva concertado por la NSR-10 en el Capítulo A.6.4.

### **4.3 COMPARACION DE ESFUERZOS**

Se procedió a evaluar los esfuerzos que deben soportar los elementos estructurales ante la acción del espectro de aceleraciones calculado para el municipio de Soacha. Al igual que en el capítulo de Derivas se aplicaron las combinaciones de carga especificadas en el capítulo 3.6.6.

Al ejecutar los modelos analíticos se corroboró un aumento de los esfuerzos a tensión actuantes en la gran mayoría de los paneles modulares de concreto. De hecho el esfuerzo máximo producido por el espectro sísmico en el modelo que presenta la carga del techo verde es de 2773,32 KPa, mientras que en el modelo sin la carga del sistema verde, este esfuerzo fue tan solo de 1983,89 KPa lo que indica una variación aproximada del 40%.

Adelante se presentan los esquemas, en las figuras 4.3 y 4.4, en los que se visualizan la intensidad de los esfuerzos a tensión que actúan sobre los diferentes elementos de la estructura y el incremento de los mismos cuando se coloca el techo verde sobre una estructura como estas.

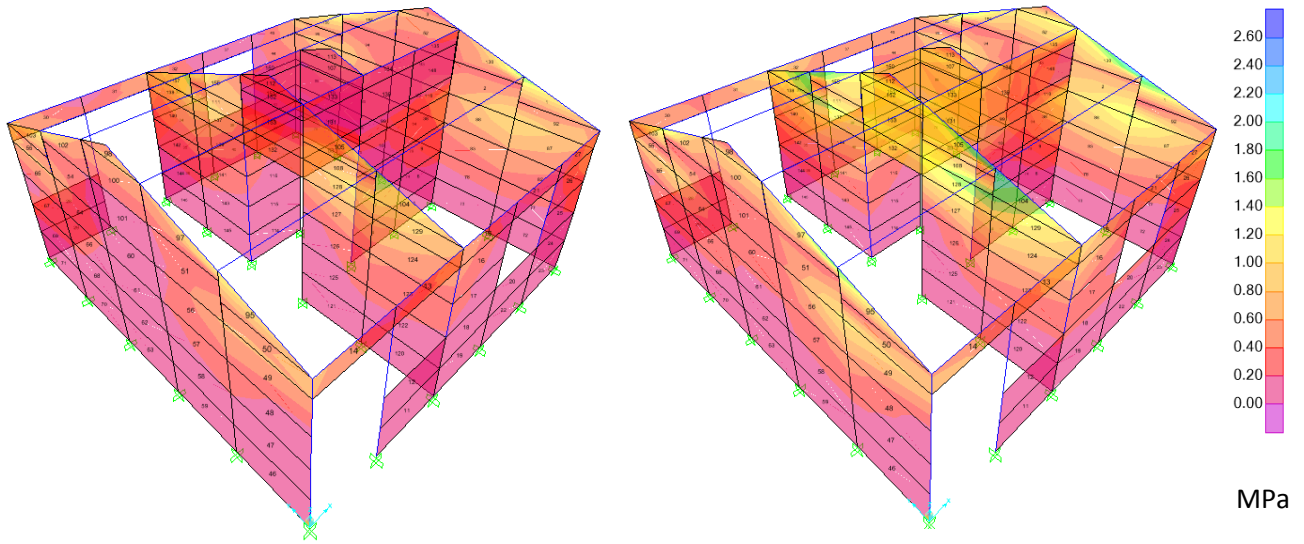


Figura 4.3: Esfuerzos actuantes sobre vivienda sin techo verde.

Figura 4.4: Esfuerzos actuantes sobre vivienda con techo verde.

Igualmente en la siguiente las figuras 4.4 y 4.6 se expone el comportamiento de los esfuerzos a tensión en el Pórtico 6 de la vivienda, allí se ve claramente el incremento de los esfuerzos a tensión en la mayoría de los paneles modulares cuando se hace uso del techo verde.

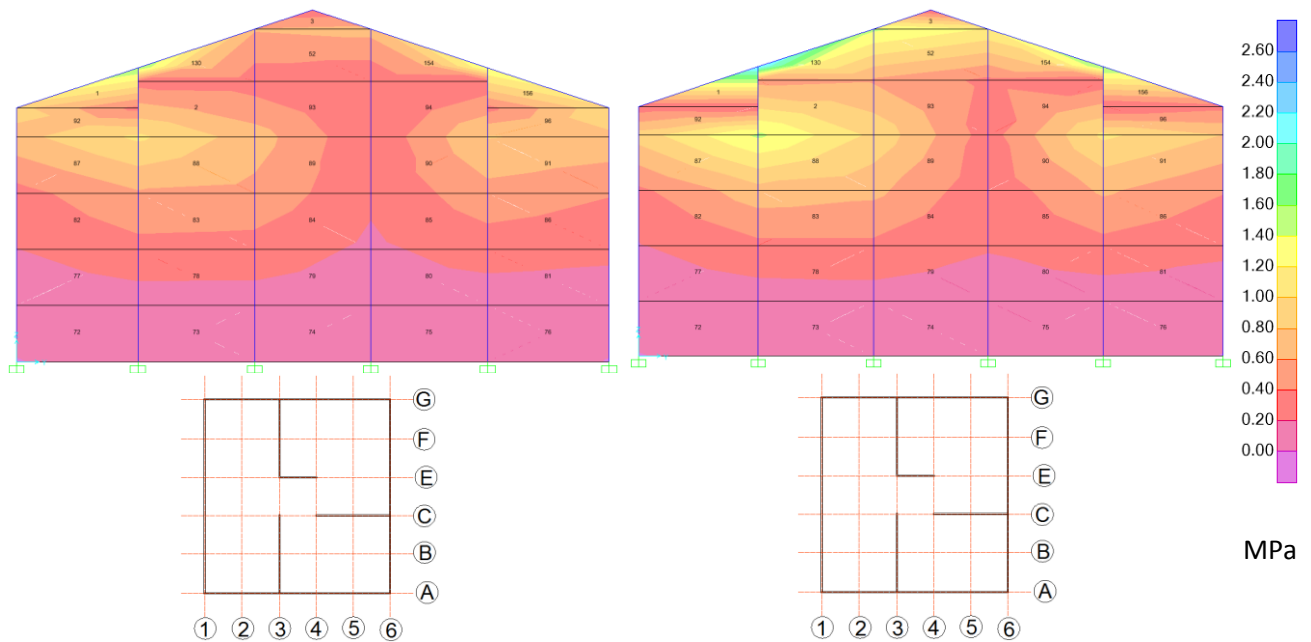


Figura 4.5: Esfuerzos actuantes sobre Pórtico 6 de la vivienda sin techo verde.

Figura 4.6: Esfuerzos actuantes sobre Pórtico 6 de la vivienda con techo verde.

Aunque ya se comprobó la variación de los esfuerzos entre los dos sistemas de carga, es necesario verificar si estos esfuerzos a tensión son capaces de sobrepasar la resistencia de los paneles de concreto y poner en riesgo la estabilidad de la estructura. Para esto se remite a los ensayos que se elaboraron en el laboratorio de la Universidad Javeriana (Mogollón, 2013), donde se busca encontrar la resistencia a tensión por flexión de placas de concreto.

En el estudio mencionado se probó la resistencia a compresión y flexión de dos paneles de concreto, utilizados para viviendas prefabricadas. Para el objeto de este trabajo se acudió al estudio a flexión, el cual consistió en aplicar una carga puntual con la maquina universal sobre la cara con mayor área de la placa y a partir de las cargas aplicadas se calculó el módulo de rotura y la resistencia a flexión, en los siguientes esquema (Figuras 4.7, 4.8, Tablas 4.3 y 4.4) se muestran las principales características del ensayo.



Figura 4.7: Ensayo a flexión. Diagrama de dimensiones y aplicación de carga. Vista perfil. (Mogollón, 2013)

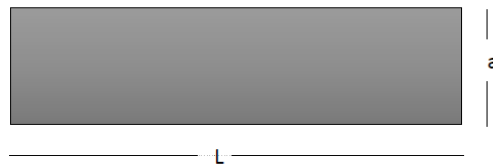


Figura 4.8: Ensayo a flexión. Diagrama de dimensiones y aplicación de carga. Vista top. (Mogollón, 2013)

Precarga (Kg)	5
L (cm)	96.9
Ancho (cm)	48.2
Espesor (cm)	3
$L_e$ (cm)	92

Tabla 4.3: Ensayo a flexión. Condiciones iniciales. Ensayo 1. (Mogollón, 2013)

Precarga (kg)	5
L (cm)	97.4
Ancho (cm)	48.35
Espesor (cm)	3
$L_e$ (cm)	92

Tablas 4.4: Ensayo a flexión. Condiciones iniciales. Ensayo 2. (Mogollón, 2013)

Las gráficas de Fuerza aplicada contra desplazamiento, resultantes de los ensayos a flexión se ilustran en la figura 4.9 y 4.10.

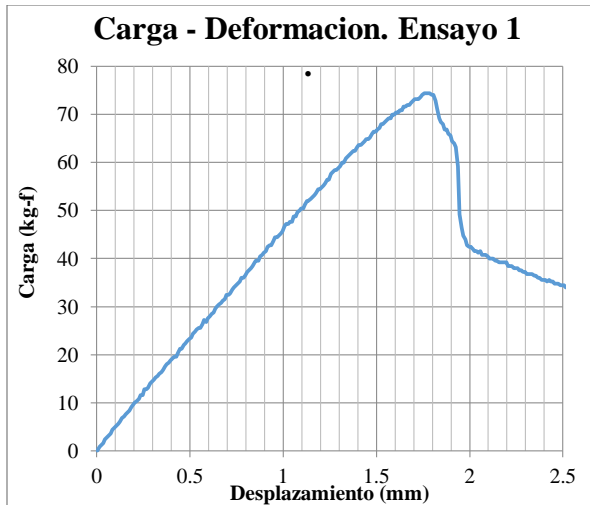


Figura 4.9: Grafica Carga versus Deformación. Ensayo Flexión 1. (Mogollón, 2013)

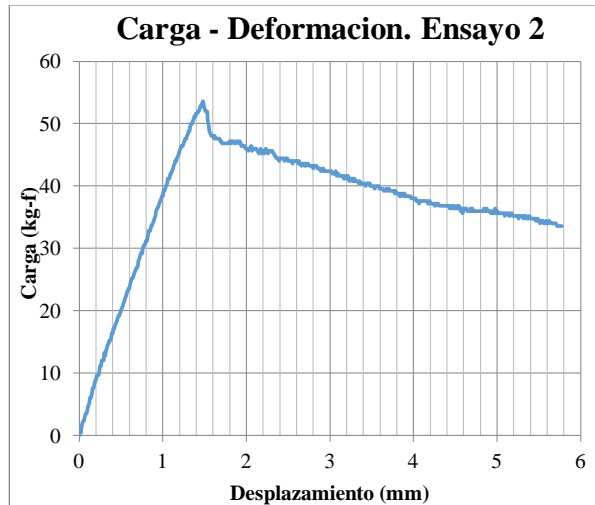


Figura 4.10: Grafica Carga versus Deformación. Ensayo Flexión 2. (Mogollón, 2013)

A partir de las anteriores gráficas y sabiendo que el esfuerzo máximo a tensión es aproximadamente el 80% del módulo de rotura, se determinó el esfuerzo crítico que puede soportar cada uno de estos paneles por esfuerzos a tensión. En la tabla 4.5 se muestra el proceso que se siguió para el cálculo de este esfuerzo

		Ensayo 1	Ensayo 2
Fuerza máxima (P)	Kgf	74.4	53.6
Momento ultimo ( $P L_e/4$ )	Kgf-cm	1711.2	1232.8
Y ( $e/2$ )	cm	1.5	1.5
Inercia ( $(I * a * e^3)/12$ )	cm <sup>4</sup>	108.5	108.8
$\sigma_{flexión}$ (MY/I)	Kg/cm <sup>2</sup>	23.7	17.0
$\sigma_{tensión}$ (80% $\sigma_{flexión}$ )	Kg/cm <sup>2</sup>	18.9	13.6

Tabla 4.5: Grafica Carga versus Deformación. Ensayo Flexión 1. (Mogollón, 2013)

Hecho el trámite anterior se pueden comparar los valores máximos de esfuerzos, arrojados por el modelo numérico, con un límite de rotura. En las figuras 4.11 y 4.12 se traza una línea verde que representa el promedio de esfuerzo máximo a tensión, igual a 1594.56 Kilopascales (16.26 Kg/cm<sup>2</sup>), y se comparan los esfuerzos actuantes en los paneles de concreto cuando la vivienda tiene cubierta verde y cuando no la tiene.

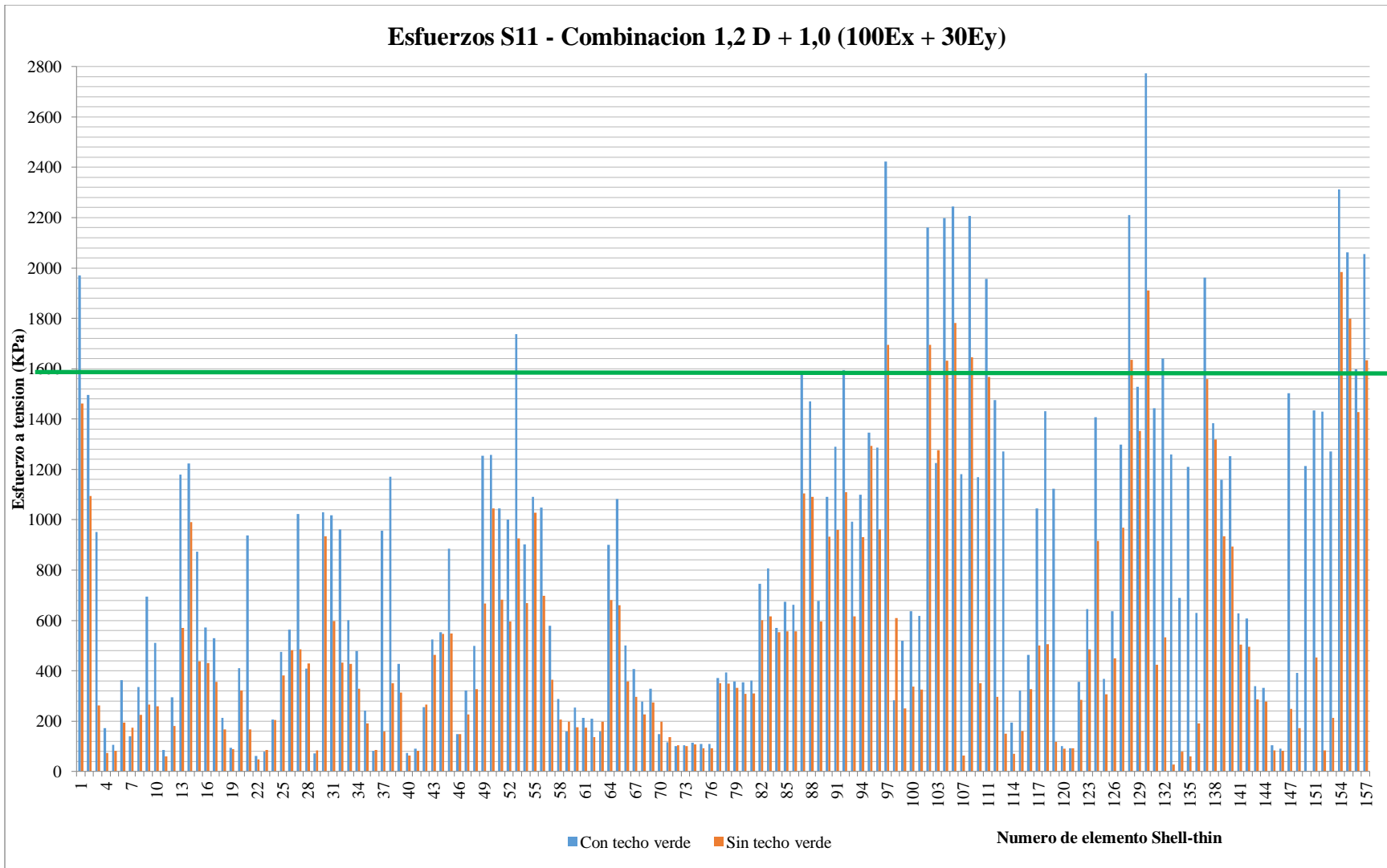


Figura 4.11: Comparación de esfuerzos S11 estructura con y sin techo verde. Combinación 1,2 D + 1,0 (100Ex + 30Ey)

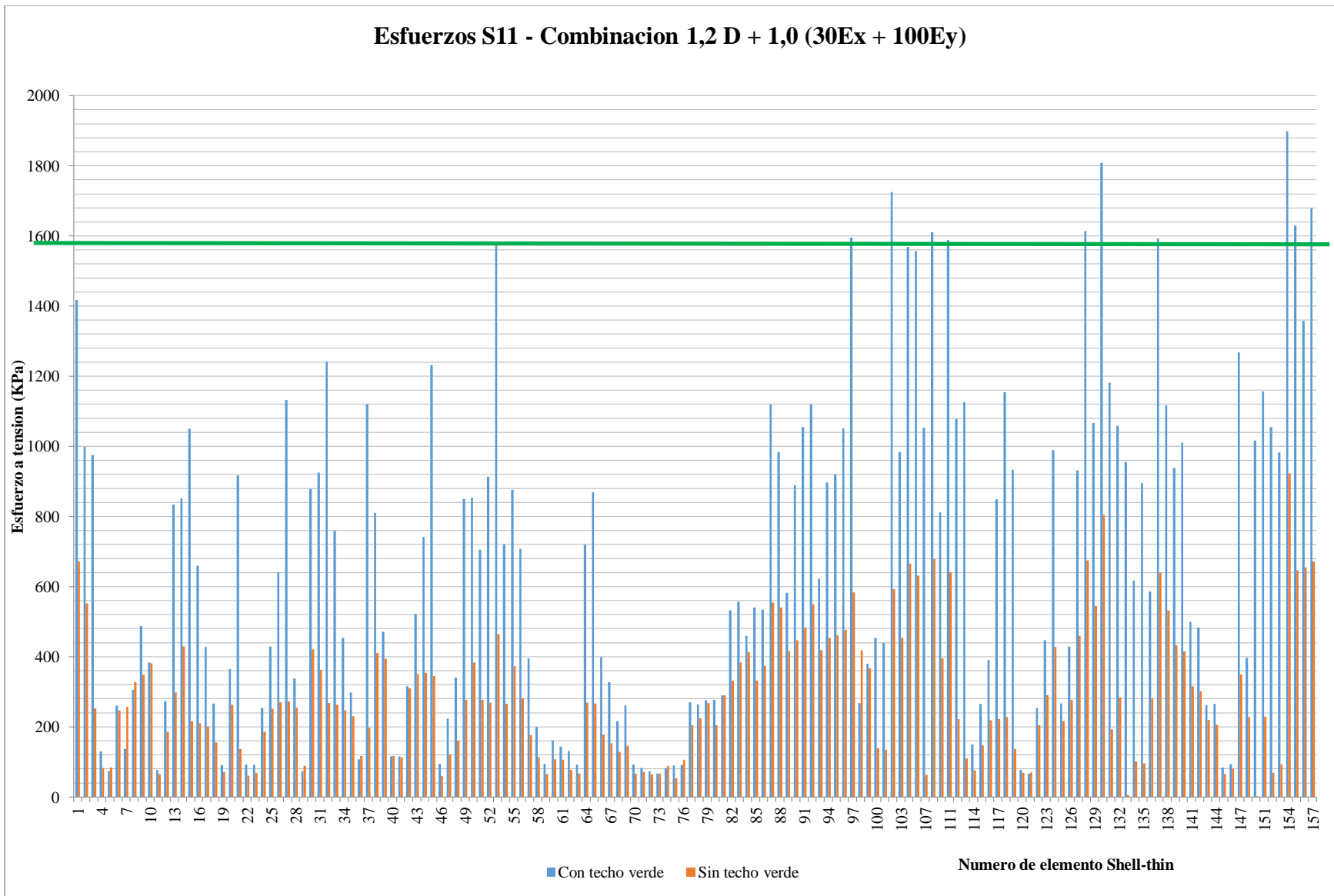


Figura 4.12: Comparación de esfuerzos S11 estructura con y sin techo verde. Combinación 1,2 D + 1,0 (30Ex + 100Ey)

Al analizar los anteriores resultados se identificó que para la combinación (1,2 D + 1,0 (100Ex + 30Ey)), un total de 16 elementos shell sobrepasan la capacidad de soportar esfuerzos a tensión por esta clase de paneles modulares de concreto cuando la estructura tiene presente la carga adicional del techo verde, mientras tanto solo 10 elementos sufren de esta condición en el momento que las botellas PET no se ubican en el tejado.

Con respecto a la combinación (1,2 D + 1,0 (30Ex + 100Ey)), la vivienda no tendría ningún panel de concreto sobre esforzado mientras está no tenga el techo verde, no obstante al colocarse el sistema de botellas el número de paneles sobre esforzados alcanzarían a ser diez (10)

Como resultado de este estudio es apropiado decir que la vulnerabilidad sísmica de la vivienda se aumenta, sin embargo los resultados no son críticos ni ponen en riesgo la estabilidad y funcionalidad de la casa prefabricada, suponiendo una mayor capacidad de disipación de energía por la presencia del refuerzo de acero de los paneles.

## 5 CONCLUSIONES

- El sistema estructural podría ser vulnerable sísmicamente dado que no utiliza ningún tipo de adhesivo estructural entre los elementos que lo componen. Los paneles de concreto solo se acomodan entre los perfiles metálicos, por lo cual el movimiento de un panel es independiente del movimiento de los paneles contiguos. Los perfiles metálicos se mantienen en su posición debido al ensamblaje de la estructura y gracias a la presión en ella, sin haber ningún otro tipo de refuerzo. La cimentación es muy simple y tiene la única función de nivelar la vivienda de un piso y evitar asentamientos diferenciales. Todos los factores mencionados anteriormente afectan la rigidez de la estructura, la cual disminuye y dificulta la modelación de la estructura, por lo cual se debe hacer la calibración con los datos tomados en campo.
- Para una edificación prefabricada ya construida, hay dificultad en saber el comportamiento dinámico real de la estructura a partir de modelos teóricos debido a que han sido pocos los estudios que se han realizado alrededor de este tipo de sistema constructivo. A pesar que se han realizado bastantes pruebas a cada uno de los materiales por separado es difícil garantizar que un modelo teórico represente fielmente la realidad de una vivienda prefabricada, por lo cual es importante la calibración de los modelos en SAP2000, además esta calibración debe dar un porcentaje de error pequeño.
- La comparación entre una vivienda prefabricada con techo verde y una sin techo verde deja una clara representación de la afectación que genera un peso extra a una estructura que no es diseñada para soportar este peso, debido a que aumenta la



vulnerabilidad sísmica, en términos de periodo, masa rigidez, derivas y esfuerzos generados sobre las placas.

- El periodo estructural para la vivienda prefabricada aumenta cuando se le coloca una carga extra de techo verde, lo cual es un comportamiento lógico de la estructura debido a que la masa que oscila para el sistema aumenta sin que aumente la rigidez de este. Este aumento puede llegar a ser hasta de un 48% (0.08 s a 0.12s).
- Las derivas de la vivienda prefabricada aumentan cuando se le aplica una carga extra de cubierta verde a la estructura, es decir que los desplazamientos diferenciales entre la base de la estructura y la cubierta son mayores gracias al peso extra. En los puntos donde se puede observar las derivas máximas después de implementadas la cubiertas el aumento llego a ser de más del 60%. Es importante resaltar que estos desplazamientos en ningún momento superan el 1%, valor máximo de deriva para una estructura según la NSR10, es decir que la estructural aun es estable y funcional, no falla gracias al peso extra.
- Los esfuerzos en elemento estructurales como los paneles de concreto también se ven afectados por la carga extra. Los esfuerzos aumentan en la mayoría de los casos es decir que los paneles están expresando una mayor reacción ante estas cargas. De acuerdo al análisis se puede observar un aumento del esfuerzo a tensión de los elementos hasta en un 40 % cuando se le aplica techo verde.
- Para verificar si la vivienda es sísmicamente vulnerable los esfuerzos a tensión en placas son los que mejor evidencian este hecho. Para algunas placas en el estado inicial de la estructura (sin techo verde) se observa que sobrepasan los esfuerzos de rotura. Al colocar una carga extra como los techos verdes, los esfuerzos generados

por los casos de análisis aumentan mucho más allá del esfuerzo límite a tensión. Se debe resaltar que este sobreesfuerzo solo se ve en pocas placas, por lo cual no cabe decir que la estructura pueda colapsar como consecuencia de estos hechos.

- La vivienda prefabricada, la cual es vulnerable sísmicamente desde su inicio, puede evidenciar un aumento en su vulnerabilidad sísmica la cual se observa en el aumento del periodo, la deriva y los esfuerzos, pero ninguno de estos aspectos representa un riesgo para la estabilidad de la estructura, es decir la estructura no va a fallar debido al nuevo peso extra que tendrá debido a la cubierta verde.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Applied technology council (1995). ATC-19: Structural Response Modification Factors.
- Cifuentes L.O. (2007). Medición e interpretación de las vibraciones ambientales: Estudios del caso del edificio de Parqueaderos “Don Guillermo Castro”. Trabajo de grado, pregrado Ingeniería civil. Pontificia Universidad Javeriana.
- Chopra A. (2001). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (2 ed.). USA: Prentice Hall
- CODHES, Consultoría para los Derechos Humanos y el Desplazamiento (2012). “Desplazamiento creciente y crisis humanitaria invisible”. [www.codhes.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1258](http://www.codhes.org/index.php?option=com_content&task=view&id=1258).
- Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes (2010). Reglamento Colombia de Construcción Sismo Resistente NSR-10.
- Forero C. y Devia A. (2012). Sistema productivo de techos verdes en comunidades vulnerables. Estudio de caso en el barrio La Isla, Altos de Casuca en Soacha, Cundinamarca. Ambiente y Desarrollo, 16 (30), 21-35.
- García L.E. (1998). Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico (1° ed.). Colombia: Ediciones Uniandes.
- Giraldo J. y Méndez D.M. (2006). Evaluación de vulnerabilidad sísmica en viviendas de mampostería en estratos uno y dos según tipificación de la estructura. Trabajo de grado, pregrado Ingeniería civil. Universidad de los Andes.
- Gutiérrez J.C. y Zabala A.O. (2008). Medición e interpretación de las vibraciones de 2 puentes peatonales metálicos pertenecientes al sistema de transporte masivo de

Bogotá, Trasmilenio. Trabajo de grado, pregrado Ingeniería civil. Pontificia Universidad Javeriana.

- IAEE (International Association for Earthquake Engineering - Japan) y NICEE (National Information Center of Earthquake Engineering - India) (2004). Resistencia sísmica en construcciones de autoconstrucción – Tipos de daño y planeación. Guidelines for Earthquake Resistant Non-engineered Construction - [www.nicee.org/IAEE\\_English.php](http://www.nicee.org/IAEE_English.php).
- Mogollón M.J. (2013). Ensayos de laboratorio de paneles prefabricados de concreto. Pontificia Universidad Javeriana. Proyecto Social Universitario. Celigüeta J.T. (2011). Método de los Elementos finitos para el Análisis Estructural (4 ed.). España: Unicopia C.B.
- Ruiz D.M, Vacca H.A, y León M.P (2007). Propuesta de modificación de la ecuación para la estimación del módulo de elasticidad del concreto en función de la resistencia a la compresión para Bogotá. Revista De La Escuela Colombiana De Ingeniería, 17, 7-15.
- Secretaria Distrital del medio ambiente (2011). Guía de Techos verdes en Bogotá. [www.oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa.../guia\\_de\\_techos\\_verdes\\_2011.pdf](http://www.oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa.../guia_de_techos_verdes_2011.pdf).
- Tovar E.J. y Huertas F.A. (2008). Modelación analítica de un murete post-tensado de mampostería y sin mortero de pega. Trabajo de grado, pregrado Ingeniería civil. Pontificia Universidad Javeriana.

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES  
(Licencia de uso)**

Bogotá, D.C., 27 de enero de 2014

Señores  
Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J.  
Pontificia Universidad Javeriana  
Cuidad: Bogotá D.C

Los suscritos:

Luisa Fernanda Olaya Rodríguez , con C.C. No 1016049796  
Diego Alejandro Rubio Pulido , con C.C. No 1032444553

En nuestra calidad de autores exclusivos de la obra titulada:  
Comportamiento sísmico de viviendas con cubierta verde en el municipio de Soacha

\_\_\_\_\_ (por favor señale con una "x" las opciones que apliquen)  
Tesis doctoral  Trabajo de grado  Premio o distinción: Si  No   
cual: \_\_\_\_\_

presentado y aprobado en el año 2013

Por medio del presente escrito autorizamos a la Pontificia Universidad Javeriana para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre nuestra obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autorizan a la Pontificia Universidad Javeriana, a los usuarios de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J., así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado un convenio, son:

<b>AUTORIZO (AUTORIZAMOS)</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>
1. La conservación de los ejemplares necesarios en la sala de tesis y trabajos de grado de la Biblioteca.	X	
2. La consulta física o electrónica según corresponda	X	
3. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer	X	
4. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet	X	
5. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previo convenio perfeccionado con la Pontificia Universidad Javeriana para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones	X	
6. La inclusión en la Biblioteca Digital PUJ (Sólo para la totalidad de las Tesis Doctorales y de Maestría y para aquellos trabajos de grado que hayan sido laureados o tengan mención de honor.)		X

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso nuestra obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

De manera complementaria, garantizamos en nuestra calidad de estudiantes y por ende autores exclusivos, que la Tesis o Trabajo de Grado en cuestión, es producto de nuestra plena autoría, de nuestro esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de nuestra creación original particular y, por tanto, somos los únicos titulares de la misma. Además, aseguramos que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifestamos que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de nuestra competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Pontificia Universidad Javeriana por tales aspectos.



Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaremos conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Pontificia Universidad Javeriana está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

**NOTA: Información Confidencial:**

Esta Tesis o Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de una investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado. Si  No

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

NOMBRE COMPLETO	No. del documento de identidad	FIRMA
Luisa Fernanda Olaya Rodríguez	1016049796	
Diego Alejandro Rubio Pulido	1032444553	

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

PROGRAMA ACADÉMICO: Carrera de Ingeniería Civil

**BIBLIOTECA ALFONSO BORRERO CABAL, S.J.  
DESCRIPCIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO  
FORMULARIO**

TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS O TRABAJO DE GRADO						
Comportamiento sísmico de viviendas con cubiertas verdes en el municipio de Soacha.						
SUBTÍTULO, SI LO TIENE						
AUTOR O AUTORES						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
Olaya Rodríguez			Luisa Fernanda			
Rubio Pulido			Diego Alejandro			
DIRECTOR (ES) TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
Ruiz Valencia			Daniel Mauricio			
FACULTAD						
Facultad de ingeniería						
PROGRAMA ACADÉMICO						
Tipo de programa ( seleccione con "x" )						
Pregrado	Especialización	Maestría	Doctorado			
x						
Nombre del programa académico						
Carrera de ingeniería						
Nombres y apellidos del director del programa académico						
María Patricia León Neira						
TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:						
Ingeniero civil						
PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial):						
CIUDAD		AÑO DE PRESENTACIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO			NÚMERO DE PÁGINAS	
Bogotá		2013			83	
TIPO DE ILUSTRACIONES ( seleccione con "x" )						
Dibujos	Pinturas	Tablas, gráficos y diagramas	Planos	Mapas	Fotografías	Partituras
		x	x		x	
SOFTWARE REQUERIDO O ESPECIALIZADO PARA LA LECTURA DEL DOCUMENTO						
<b>Nota:</b> En caso de que el software (programa especializado requerido) no se encuentre licenciado por la Universidad a través de la Biblioteca (previa consulta al estudiante), el texto de la Tesis o Trabajo de Grado quedará solamente en formato PDF.						

MATERIAL ACOMPAÑANTE					
TIPO	DURACIÓN (minutos)	CANTIDAD	FORMATO		
			CD	DVD	Otro ¿Cuál?
Vídeo					
Audio					
Multimedia					
Producción electrónica					
Otro Cuál?					
DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVE EN ESPAÑOL E INGLÉS					
Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. <i>(En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Sección de Desarrollo de Colecciones de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J en el correo <a href="mailto:biblioteca@javeriana.edu.co">biblioteca@javeriana.edu.co</a>, donde se les orientará).</i>					
ESPAÑOL			INGLÉS		
Comportamiento sísmico			Seismic behavior		
Techos verdes			Green roofs		
Municipio de Soacha			Soacha township		
Vivienda prefabricada			Prefabricated buildings		
RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS					
(Máximo 250 palabras - 1530 caracteres)					
<p>La implementación de cubiertas verdes en edificaciones prefabricadas ya construidas es una opción arriesgada, debido a que es una carga extra que tendrá que soportar la estructura sin haber sido diseñada para esto inicialmente, por lo cual es de vital importancia estudiar la afectación para evitar grietas e incluso fallas que puedan poner en riesgo la vida de los usuarios. El sistema estructural de una vivienda prefabricada consiste en encajar módulos de placas con la ayuda de perfiles metálicos. El sistema constructivo deja muchos campos abiertos para la incertidumbre con respecto a su comportamiento estructural. Además al aplicarle una carga extra de cubiertas verdes a este tipo de estructuras se puede observar un aumento en la vulnerabilidad de la estructura. Durante este trabajo se realizara un estudio dinámico a una estructura prefabricada ubicada en le localidad de Soacha, la cual ya ha sido terminada y habitada por una familia de bajos recursos económicos que ven en la implementación de cubiertas verdes productivas una buena opción para la economía familiar. Con mediciones en campo de las estructuras en su estado inicial (sin cubiertas verdes) y luego con un estado de cargas extras (con cubiertas verdes) se realizó una comparación de la respuesta sísmica de la estructuras. Este estudio muestra que la vulnerabilidad sísmica se ve incrementada por la implementación de este sistema productivo de cubiertas verdes.</p> <p>The implementation of green roofs in prefabricated buildings already built is a risky option, because it is an extra weight that will be supported by the structure without been designed for this initially, so it is vital to study its involvement to prevent cracking and even failures that could be dangerous to the users lives. The structural system of a manufactured home consists on fitting plate modules with aid of metal</p>					



profiles. The constructive system leaves many open fields to the uncertainty about its structural behavior. In addition to applying an extra load of green roofs to these structures can be observed an increase in the vulnerability of the structure. During this work a dynamic study will be conducted on a prefabricated structure located in Soacha, which has already been completed and occupied by a low income family who see in the implementation of productive green roofs a good choice for family economy. With field measurements on the structure in its initial state (without green roofs) and then with a state of extra loads (with green roofs) a comparison of the seismic response of the structures was performed. This study shows that the seismic vulnerability is increased by the implementation of this productive system of green roofs