

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL A TRAVÉS DEL CORTANTE
BASAL Y LAS DERIVAS PARA ESTUDIOS DE RIESGO SÍSMICO: CASO
POPAYÁN



Universidad
del Cauca

Presentado por:

Anderson Camilo Ortiz Villota

Código: 100419010938

Ana Maria Rodriguez Andrade

Código: 100419021266

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Civil

Programa de Ingeniería Civil

Popayán-Cauca

2025

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL A TRAVÉS DEL CORTANTE
BASAL Y LAS DERIVAS PARA ESTUDIOS DE RIESGO SÍSMICO: CASO
POPAYÁN



Universidad
del Cauca

Presentado por:

Anderson Camilo Ortiz Villota

Código: 100419010938

Ana Maria Rodriguez Andrade

Código: 100419021266

Directora: Ph. D. Denny Mariana Torres Ortiz

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Civil

Programa de Ingeniería Civil

Popayán-Cauca

2025

RESUMEN

El diseño estructural en Colombia se rige por la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR-10) y requiere de parámetros como la pseudoaceleración, deriva y cortante basal. Estos parámetros dependen de la amenaza sísmica y la amplificación por efecto de sitio. Popayán, ubicada al suroccidente del país en una zona sísmicamente alta debido a sus condiciones sismológicas, rige su diseño estructural bajo la NSR-10. Actualmente se han realizado estudios de microzonificación sísmica (MS) con el fin de actualizar el estudio anterior de 1991 realizado por INGEOMINAS, estos estudios se han realizado por entidades como la Universidad de los Andes (UAN) en el 2012 y por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en el 2020 utilizando factores con mayor aproximación a las condiciones reales. Sin embargo, los estudios no han sido oficializados por lo cual para el diseño se sigue utilizando los factores dados por la NSR-10. Por tanto, este estudio compara que tan significativo es el impacto, al usar los factores de diseño actual y los propuestos por las MS, en el comportamiento estructural de edificaciones prototipo de pórticos, analizando la deriva (deformación relativa entre niveles), relacionada a umbrales de daño con la metodología FEMA y el cortante basal (Fuerza sísmica acumulada). El análisis se hizo con el método de Fuerza Horizontal equivalente (FHE), considerando las condiciones del suelo descritos en cada estudio y el espectro de diseño dado en la NSR-10. Adicionalmente con el programa Deepsoil se sometieron estratos de suelo representativos de la ciudad a un escenario sísmico específico, con el fin de analizar la amplificación de las ondas sísmicas de los suelos y compararlo con las amplificaciones dadas por los tres estudios.

Los resultados de deriva se mostraron en mapas de riesgo sísmico de la ciudad para cada tipología estructural, número de pisos y estudio analizado. Se diseñó un programa en Matlab que permite visualizar las derivas de los tres estudios en mapas mostrando los niveles de daño estructural probables frente al sismo de diseño de la Norma y frente a un escenario sísmico específico por medio de datos de pseudoaceleraciones derivadas del procesamiento de una señal sísmica a través de un estrato de suelo. Este programa es una herramienta que mejora la repuesta frente a eventos sísmicos reales identificando rápidamente zonas vulnerables o más afectadas y así, facilita la movilización de recursos de emergencia. Este estudio se enfoca en la comprensión del comportamiento estructural en Popayán y en contribuir a evaluar el riesgo sísmico para planificar la ciudad de manera más segura. De los resultados se destaca que la mayoría de los puntos de análisis de las MS arrojan valores de deriva y cortante basal más altos que los que propone la Norma, con diferencias de hasta 65% superando límites de daño leve a moderado y los de moderado a severo, poniendo en riesgo la seguridad estructural. Se identificó la zona norte de la ciudad como la de mayor riesgo sísmico para estructuras de pórticos de hasta 5 niveles y la zona centro para estructuras de 10 niveles, debido a que, las características propias del suelo amplifican las señales sísmicas para los periodos de estos edificios, alcanzando mayores valores de deriva y cortante. Se concluyó que usar los valores de la MS impacta en el daño esperado en las edificaciones y aumenta el riesgo sísmico puesto que tiene coeficientes de amplificación de efecto de sitio más altos que la Norma en la mayoría de los puntos.

ABSTRACT

Structural design in Colombia is governed by the Colombian Seismic Resistant Standard (NSR-10) and requires parameters such as pseudo-acceleration, drift, and basal shear. These parameters depend on the seismic hazard and the amplification by site effect. Popayán, located in the southwest of the country in a high seismic zone due to its seismological conditions, governs its structural design under NSR-10. Currently, seismic microzonation (MS) studies have been conducted to update the previous 1991 study conducted by INGEOMINAS, these studies have been conducted by entities such as the Universidad de los Andes (UAN) in 2012 and by the Colombian Geological Survey (SGC) in 2020 using factors with greater approximation to real conditions. However, the studies have not been officialized, so the factors given by the NSR-10 are still used for the design. Therefore, this study compares how significant is the impact, when using the current design factors and those proposed by the MS, on the structural behavior of prototype frame buildings, analyzing the drift (relative deformation between levels), related to damage thresholds with the FEMA methodology and the basal shear (cumulative seismic force). The analysis was performed with the Equivalent Horizontal Force (EHF) method, considering the soil conditions described in each study and the design spectrum given in the NSR-10. Additionally, with the Deepsoil program, representative soil strata of the city were subjected to a specific seismic scenario, to analyze the amplification of the seismic waves of the soils and compare it with the amplifications given by the three studies.

The drift results were shown in seismic risk maps of the city for each structural typology, number of floors and study analyzed. A Matlab program was designed to visualize the drifts of the three studies in maps showing the probable structural damage levels against the design earthquake of the Standard and against a specific seismic scenario by means of pseudo-acceleration data derived from the processing of a seismic signal through a soil stratum. This program is a tool that improves the response to real seismic events by quickly identifying vulnerable or most affected areas and thus facilitates the mobilization of emergency resources. This study focuses on understanding the structural behavior in Popayán and contributing to assess the seismic risk to plan the city in a safer way. The results show that most of the DM analysis points show drift and basal shear values higher than those proposed by the standard, with differences of up to 65%, exceeding the limits of mild to moderate damage and those of moderate to severe damage, putting structural safety at risk. The northern zone of the city was identified as the one with the highest seismic risk for structures of up to 5 levels and the central zone for structures of 10 levels, because the soil characteristics amplify the seismic signals for the periods of these buildings, reaching higher values of drift and shear. It was concluded that using the values of the MS impacts the expected damage in the buildings and increases the seismic risk since it has higher amplification coefficients of the site effect than the standard in most of the points.

AGRADECIMIENTOS

A nuestra directora, Ph. D. Mariana Torres por su orientación, tiempo y sabiduría a lo largo de este proceso.

Al Servicio Geológico Colombiano y la Universidad de los Andes por los estudios de microzonificación sísmica de Popayán que nos proporcionaron para ser utilizados en este trabajo y que fueron claves para nuestra investigación.

A la Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil y Departamento de Estructuras por el conocimiento y acompañamiento ofrecido durante el desarrollo de este trabajo.

A todos los orientadores por compartir sus conocimientos y direcciones durante este proceso.

A nuestras familias y amigos por su amor, comprensión y apoyo cuando el camino se hacía difícil y por motivarnos a seguir adelante.

A todos los que de alguna forma contribuyeron a la realización de este trabajo, muchas gracias por su apoyo y confianza.

Ana Maria Rodriguez y Anderson Camilo Ortiz

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por ser el padre que siempre ha estado acompañándome, porque es bueno y ha mostrado su amor por mí, porque me sostuvo cuando ya no tenía fuerzas y me recordó que Él tenía el control de todo cuando yo ya lo había perdido. Gracias a Dios que me ha dado las fuerzas para lograrlo y que me ha llevado a cumplir mis sueños.

A Anderson, mi compañero de tesis, por cada reunión y traspasada, por su inagotable paciencia y comprensión conmigo, por sus ideas, por no rendirse y por darme ánimo cuando yo no podía seguir. Sé que no pude haber escogido un mejor compañero para realizar este trabajo.

A mi hermana quién me escucho, me tuvo paciencia y me dio ánimos en todo momento, gracias por acompañarme en lo bueno y en lo malo y ser mi compañera de guerra siempre. Sin ella, este logro no hubiera sido posible.

A mi familia por su apoyo, sabiduría y paciencia durante este proceso y estar siempre a mi lado.

A mis amigos, la familia que Dios me dio, por cada palabra de ánimo, por cada oración levantada y por darme siempre fuerzas para seguir. Sin duda, este logro es tanto mío como suyo.

Ana Maria Rodriguez Andrade

DEDICATORIA

Este documento lo dedico a Dios, porque de Él, por Él y para Él son todas las cosas; a Él sea la gloria por siempre. Le agradezco por darme la capacidad, los medios y el acompañamiento necesario para llevar a cabo esta tesis, y por haber puesto dentro de su propósito para mi vida el alcanzar esta profesión.

También agradezco a Janeth Amparo Villota y Fanny Amparo Castaño, mi madre y mi abuela, las dos mujeres que, junto a Dios, me enseñaron el verdadero amor incondicional. Ellas me guiaron en una vida que nunca imaginamos, dándome todo sin esperar nada a cambio. Fueron quienes creyeron en mí incluso antes de que yo mismo lo hiciera. Este logro también es suyo.

A mi compañera de tesis y futura colega, Ana María Rodríguez, quien hizo de este proceso una experiencia más significativa. Con su esfuerzo, carisma y firmeza, siempre se mantuvo firme en nuestras ideas, incluso en los momentos más difíciles. Fue quien me levantó del cansancio, me motivó en las decepciones y me recordó los motivos para seguir. Gracias.

Por último, a Mario Andrés Aguirre, mi mejor amigo, la persona con quien compartí lo que a nadie más le conté, quien me escuchó y a quien escuché. Mi amigo, que, aunque no siempre estuvo físicamente presente, siempre estuvo ahí. La verdadera definición de un amigo.

Anderson Camilo Ortiz Villota

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2. JUSTIFICACIÓN	18
1.3. OBJETIVOS	20
1.4. BENEFICIOS ESPERADOS.....	21
1.5. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO.....	22
1.6. UBICACIÓN Y SISMICIDAD DE LA REGIÓN	24
1.6.1. LOCALIZACIÓN DEL TERRITORIO DE ESTUDIO	24
1.6.2. SISMICIDAD HISTÓRICA DE LA REGIÓN.....	24
1.6.3. FUENTES SÍSMICAS DE LA REGIÓN	27
1.6.4. ESTUDIOS REFERENTES NACIONALES	30
2. MARCO TEÓRICO.....	33
2.1. CONCEPTOS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL	33
2.1.1. CORTANTE BASAL	33
2.1.2. DERIVA	35
2.2. PROPIEDADES DE LAS ESTRUCTURAS	36
2.2.1. TIPOS DE CARGAS ACTUANTES	36
2.2.2. MASA.....	37
2.2.3. AMORTIGUAMIENTO	37
2.2.4. RIGIDEZ	38
2.2.5. PERIODO DE LA ESTRUCTURA.....	38
2.2.6. FRECUENCIA NATURAL	38
2.3. NIVELES DE DAÑO DE LAS ESTRUCTURAS.....	39
2.3.1. METODOLOGÍA REALIZADA POR LA FEMA (1997).....	39
2.3.2. METODOLOGÍA VISION 2000	39
2.3.3. METODOLOGÍA DE GHOBARAH (1997)	40
2.4. CONCEPTOS DE SISMOLOGÍA	41
2.4.1. AMENAZA Y RIESGO SÍSMICO.....	42
2.4.2. ACELERACIÓN SÍSMICA.....	44
2.4.3. PERIODO FUNDAMENTAL DEL SUELO.....	44

2.4.4.	RESPUESTA SÍSMICA DEL SUELO: EFECTO DE SITIO	46
2.5.	MICROZONIFICACIÓN	48
3.	CONSIDERACIONES DE ANÁLISIS SÍSMICO DE LA NSR-10	50
3.1.	COEFICIENTES DE ACELERACIÓN A_a Y A_v	50
3.2.	COEFICIENTES DE EFECTOS DE SITIO F_a Y F_v	53
3.3.	COEFICIENTE DE IMPORTANCIA I	54
3.4.	ESPECTROS DE RESPUESTA.....	55
3.5.	PARAMETROS DE DISEÑO PARA POPAYAN SEGÚN LA NSR-10	57
3.6.	ANÁLISIS SÍSMICO - MÉTODO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE.....	59
4.	COMPARACIÓN DE LAS MICROZONIFICACIONES SÍSMICAS EN POPAYÁN 62	
4.1.	UNIVERSIDAD DE LOS ANDES	63
4.2.	SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO.....	66
4.3.	RESUMEN DE COMPARACION DE LAS MICROZONIFICACIONES	68
5.	METODOLOGIA	71
6.	DATOS.....	73
6.1.	SELECCIÓN DE DATOS	73
6.1.1.	PUNTOS DE ANÁLISIS Y FACTORES DE AMPLIFICACIÓN	73
6.1.2.	TIPOLOGIA ESTRUCTURAL TIPO	75
6.1.3.	CONDICIONES Y DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS	76
6.2.	PROCESAMIENTO DE DATOS	78
6.2.1.	DERIVA Y CORTANTE BASAL.....	78
6.2.1.1.	PROCEDIMIENTO PARA EL CORTANTE BASAL.....	78
6.2.1.2.	PROCEDIMIENTO DE DERIVA PARA PÓRTICOS	81
6.2.1.3.	PROCEDIMIENTO DE CORTANTE BASAL Y DERIVA PARA UN PÓRTICO DE 3 PISOS.....	84
6.2.2.	ANÁLISIS DEL EFECTO DE SITIO Y AMPLIFICACIÓN	91
6.2.2.1.	ESTRATOS DE SUELO REPRESENTATIVOS.....	92
6.2.2.2.	SELECCIÓN DE SEÑALES SÍSMICAS.....	96
6.2.2.3.	SELECCIÓN DE ESTRUCTURAS	100
6.2.3.	CÁLCULO DE DERIVA Y CORTANTE BASAL CON ETABS	101
6.2.4.	CONSTRUCCIÓN DEL MAPA PARA RESULTADOS DE LA UAN.....	105
6.2.5.	DESARROLLO DEL PROGRAMA DE MAPA DE DERIVAS.....	108

7.	RESULTADOS	114
7.1.	COMPARACIÓN DE Fa Y Fv.....	114
7.2.	RESULTADOS DE DERIVA Y CORTANTE BASAL	115
7.3.	RESULTADOS DE UN ESCENARIO SÍSMICO.....	122
7.4.	MAPA DE DERIVAS CON LOS DATOS DE LA UAN.....	127
7.5.	PROGRAMA DE MAPA DE DERIVAS	130
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	134
8.1.	COMPARACIÓN DE LAS MICROZONIFICACIONES SÍSMICAS Y NSR-10 134	
8.1.1.	COMPARACIÓN DE LAS MICROZONIFICACIONES.....	134
8.1.2.	COMPARACIÓN DE Fa Y Fv CON LA NSR-10	136
8.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CORTANTE BASAL Y DERIVA	139
8.2.1.	RESULTADOS DE CORTANTE BASAL	139
8.2.2.	RESULTADOS DE LA DERIVA	140
8.3.	ANÁLISIS DE UN ESCENARIO SÍSMICO.....	142
8.3.1.	ANÁLISIS DE LOS DESPLAZAMENTOS MÁXIMO DE LOS ESTRATOS DE SUELO.....	143
8.3.2.	ANÁLISIS DE LOS ESPECTROS DE AMPLIFICACIÓN	144
8.3.3.	ANÁLISIS DE AMPLIFICACIÓN EN UN ESCENARIO SÍSMICO.....	147
8.3.4.	COMPARACIÓN DE MAPAS DE RIESGO EN UN ESCENARIO SÍSMICO.....	148
8.4.	MAPAS DE RIESGO SÍSMICO Y APLICACIÓN DEL PROGRAMA	150
8.4.1.	ANÁLISIS DE ZONAS CON MAYOR RIESGO SÍSMICO	150
8.4.2.	APLICACIÓN DEL PROGRAMA FRENTE A ESCENARIOS SÍSMICOS FUTUROS.....	151
9.	CONCLUSIONES	153
10.	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	156
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de Popayán.....	24
Figura 2. Sismos históricos según intensidades de la escala macrosísmica EMS-98.....	25
Figura 3. Fotografías de edificaciones afectadas en Popayán por el sismo de 1983.	27
Figura 4. Sismos de subducción con intensidad ≥ 5 en Popayán.	28
Figura 5. Sismos de la zona de Benioff con intensidad ≥ 5 en Popayán.	29
Figura 6. Sismos corticales con intensidad ≥ 5 en Popayán.	29
Figura 7. Fuentes sísmicas del Modelo Nacional de Amenaza Sísmica cercanas a la ciudad de Popayán.....	30
Figura 8. Representación gráfica del cortante de piso y cortante basal V_0	34
Figura 9. Concentración de la masa de una estructura.	35
Figura 10. Representación gráfica de la deriva Δ	35
Figura 11. Carga dinámica de aceleración sísmica del terreno.	37
Figura 12. Mapas de amenaza uniforme en $PGA[g]$ para T_r de 225 y 475 años.	42
Figura 13. Modelación del riesgo sísmico en edificaciones.....	43
Figura 14. Aceleración de una señal sísmica.....	44
Figura 15. Mapa de periodos fundamentales del suelo ($T_g [s]$) en una zona de estudio.....	45
Figura 16. Influencia del tipo de terreno en los efectos de un terremoto.	47
Figura 17. Respuesta dinámica del subsuelo.	48
Figura 18. Microzonificación sísmica de Bogotá.....	48
Figura 19. Diagrama para obtener las fuerzas sísmicas requeridas en el diseño de edificios.	52
Figura 20. Zonas de Amenaza sísmica de Colombia.....	53
Figura 21. Amplificación de ondas sísmicas por efecto de sitio.	54
Figura 22. Coeficiente de importancia según el grupo de uso de la NSR-10. Tabla A.2.5-1.	55
Figura 23. Espectros de respuesta para el movimiento de terreno: (a) espectro de respuesta de deformación; (b) espectro de respuesta de pseudovelocidad; (c) espectro de respuesta de pseudoaceleración.....	56
Figura 24. Espectro de diseño de la NSR-10.....	57
Figura 25. Caracterización de los perfiles de suelo según la NSR-10.....	58
Figura 26. Valores de los coeficientes de amplificación de la NSR-10, a) F_a . b) F_v	59
Figura 27. Diagrama de flujo del procedimiento del método de fuerza horizontal equivalente (FHE).....	60
Figura 28. Mapa de variación de F_v de diseño para la ciudad de Popayán según el estudio de la UAN.....	64
Figura 29. Mapa de variación de F_a de diseño para la ciudad de Popayán según el estudio de la UAN.....	64
Figura 30. Ubicación de los puntos de sondeo de la MS del UAN.	65
Figura 31. Resultados de velocidad de onda de corte de los ensayos realizados por la UAN.	65
Figura 32. Mapa de zonas de respuesta sísmica homogénea de Popayán según el SGC.	66

Figura 33. Perfiles típicos geotécnicos encontrados en la microzonificación del SGC.	67
Figura 34. Ubicación de los puntos y zonas donde se obtuvieron los perfiles geotécnicos típicos.....	69
Figura 35. Marco metodológico.	71
Figura 36. Ubicación de los puntos y zonas de análisis en el mapa de Popayán.	74
Figura 37. Prototipos de estructuras de pórticos de 3, 5, 7 y 10 pisos.....	77
Figura 38. Planta típica de las estructuras prototipo de pórticos.	78
Figura 39. Valores de los parámetros C_t y α para el cálculo de periodo aproximado.	79
Figura 40. Espectro de diseño de la NSR-10.....	80
Figura 41. Modelo de la estructura de 3 pisos en ETABS.	84
Figura 42. Datos arrojados por el software ETABS para el ejemplo de estructura de 3 pisos en suelo tipo D.....	91
Figura 43. Aceleraciones del terreno en la roca base y en superficie.....	92
Figura 44. Localización de sitios modelados por el SGC.....	93
Figura 45. Perfil de suelo correspondientes a UVO-v2 (COLINAS A, zona homogénea definida por MS a cargo de SGC).	93
Figura 46. Perfil de suelo correspondientes a BMirador-v2 (COLINAS B, zona homogénea definida por MS a cargo de SGC).	94
Figura 47. Perfil de suelo correspondientes a PCaldas-v2 (PLANICIES A y B, zona homogénea definida por MS a cargo de SGC).	94
Figura 48. Perfil de suelo correspondientes a BGonzales-v2rev (Terrazas Altas A, zona homogénea definida por MS a cargo de SGC).	95
Figura 49. Perfil de suelo correspondientes a Campobellos-v2 (Terrazas Altas b, zona homogénea definida por MS a cargo de SGC).	95
Figura 50. Sismos cercanos a los sismos utilizados por la UAN.	97
Figura 51. Ubicación de los sismos utilizados por la UAN.....	98
Figura 52. Sismos cercanos a los sismos utilizados por el SGC.	98
Figura 53. Ubicación de los sismos utilizados por el SGC.	99
Figura 54. Ubicación de los sismos seleccionados de la UAN.	99
Figura 55. Gráficos espectrales y señal sísmica del sismo de PALM SPRINGS. Nombre de la estación: RSN848_LANDERS_CLW-LN.	100
Figura 56. Distribución espacial del número de edificaciones construidas en pórticos de concreto con muros de mampostería.	100
Figura 57. Creación del diafragma de piso en el software ETABS.....	101
Figura 58. Configuración de las cargas sísmicas usadas en ETABS.....	102
Figura 59. Consideración de la carga adicional dentro del peso del análisis sísmico.	103
Figura 60. Creación de la envolvente de combinaciones de sismo en ETABS.....	104
Figura 61. Visualización de los resultados de derivas de piso y cortantes de piso en ETABS.	105
Figura 62. Coordenadas de los puntos seleccionados para la construcción de los mapas de isolíneas partir de derivas máximas, caso de derivas específicas para el edificio de pórticos de 7 pisos.	106

Figura 63. Imagen ráster de la morfología urbana de Popayán sobre mapa satelital de Google.	107
Figura 64. Interpolación IDW sobre imagen ráster, caso de derivas específicas para el edificio de pórticos de 7 pisos con los datos de la UAN.	108
Figura 65. Resultado de la interpolación con valores e isolíneas, caso de derivas específicas para el edificio de pórticos de 7 pisos con los datos de la UAN.	108
Figura 66. Diagrama de flujo del desarrollo del programa en Matlab	110
Figura 67. Menú de opciones del programa de Riesgo Sísmico diseñado en Matlab	111
Figura 68. Espectro de diseño correspondientes a las zonas de la MS del SGC y puntos de la NSR.....	114
Figura 69. Espectro de respuesta correspondientes a los puntos de la MS del UAN y puntos de la NSR.....	115
Figura 70. Valores de deriva para el edificio prototipo de pórticos de 3 pisos en los puntos de análisis de acuerdo con los estudios de SGC y UAN.	119
Figura 71. Valores de deriva para el edificio prototipo de pórticos de 5 pisos en los puntos de análisis de acuerdo con los estudios de SGC y UAN.	119
Figura 72. Valores de deriva para el edificio prototipo de pórticos de 7 pisos en los puntos de análisis de acuerdo con los estudios de SGC y UAN.	120
Figura 73. Valores de deriva para el edificio prototipo de pórticos de 10 pisos en los puntos de análisis de acuerdo con los estudios de SGC y UAN.	120
Figura 74. Estructuras de 5 pisos. A la izquierda estructura del estudio de Toro et. al. (2020). A la derecha estructura realizada por los autores en ETABS (Versión 21.2.0).....	121
Figura 75. Desplazamiento del suelo correspondiente a COLINAS A por efectos del sismo del sismo LANDERS.....	122
Figura 76. Desplazamiento del suelo correspondiente a COLINAS B por efectos del sismo del sismo LANDERS.....	122
Figura 77. Desplazamiento del suelo correspondiente a TERRAZAS ALTAS A por efectos del sismo del sismo LANDERS	123
Figura 78. Desplazamiento del suelo correspondiente a TERRAZAS ALTAS B por efectos del sismo del sismo LANDERS	123
Figura 79. Desplazamiento del suelo correspondiente a PLANICIES A Y B por efectos del sismo del sismo LANDERS	124
Figura 80. Pseudo aceleraciones según el periodo, resultados de Deepsoil.	124
Figura 81. Gráficos espectrales que arroja el software Deepsoil, a partir de los datos de entrada de la sección 6.1.....	125
Figura 82. Espectro de aceleración para perfiles en las zonas definidas en la MS a cargo del SGC con la señal sísmica de Landers.....	125
Figura 83. Resultados de deriva obtenidos con el programa de Matlab (Versión R2023b) con los factores de amplificación del escenario sísmico usando Deepsoil con el registro sísmico de Landers 848.	126
Figura 84. Resultados de deriva obtenidos con el programa de Matlab (Versión R2023b) con los factores de amplificación del escenario sísmico usando Deepsoil con el registro sísmico de Landers 850.	127

Figura 85. Mapa de derivas según MS de la UAN con los estados de daño para un edificio en pórticos de 3 pisos.....	128
Figura 86. Mapa de derivas según MS de la UAN con los estados de daño para un edificio en pórticos de 5 pisos.....	128
Figura 87. Mapa de derivas según MS de la UAN con los estados de daño para un edificio en pórticos de 7 pisos.....	129
Figura 88. Mapa de derivas según MS de la UAN con los estados de daño para un edificio en pórticos de 10 pisos.....	129
Figura 89. Interfaz del programa en Matlab.	130
Figura 90. Interfaz del programa para un edificio de pórticos de 5 pisos según la MS del SGC.	131
Figura 91. Resultados del programa considerando el sismo probable Landers para pórtico de 3 pisos.	132
Figura 92. Resultados del programa considerando el sismo probable Landers para pórtico de 7 pisos.	133
Figura 93. Comparación de espectros elásticos de diseño de las MS con el tipo de suelo C de la NSR-10	137
Figura 94. Comparación de espectros elásticos de diseño de las MS con el tipo de suelo D de la NSR-10	137
Figura 95. Comparación de espectros elásticos de diseño de las MS con el tipo de suelo E de la NSR-10	138
Figura 96. Cortante basal (KN) de las estructuras de pórticos en cada punto de análisis del suelo.....	139
Figura 97. Derivas máximas (%) de las estructuras de pórticos en cada punto de análisis del suelo.....	141
Figura 98. Deformaciones máximas de los 5 perfiles de suelos representativos de cada una de las zonas descritas por la MS del SGC en función de su profundidad.	143
Figura 99. Comparación de los espectros de aceleración entre perfiles en las zonas de la MS a cargo del SGC y el suelo tipo E de la NSR-10.	145
Figura 100. Comparación de los espectros de aceleración entre perfiles en las zonas de la MS a cargo del SGC y el suelo tipo D de la NSR-10.....	145
Figura 101. Comparación de los espectros de aceleración entre perfiles en las zonas de la MS a cargo del SGC y el suelo tipo C de la NSR-10.	146
Figura 102. Resultados de deriva obtenidos con el programa de Matlab (Versión R2023b) con los factores de amplificación de la MS del SGC	149

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Derivas límites de entrepiso para un nivel de daño propuesto por la FEMA.	39
Tabla 2. Derivas límites de entrepiso para un nivel de daño propuesto por VISION 2000.	40
Tabla 3. Derivas límites de entrepiso para un nivel de daño propuesto por Ghobarah et al (1997).....	40
Tabla 4. Descripción de los estados de daño.	41
Tabla 5. Factores de amplificación para las zonas de respuesta sísmica de Popayán.	67
Tabla 6. Cuadro comparativo de la metodología usada por los estudios de microzonificación del SGC y UAN.....	68
Tabla 7. Perfiles típicos geotécnicos de los estudios de microzonificación del SGC y UAN.	69
Tabla 8. Factores de amplificación de los puntos de análisis del suelo.....	75
Tabla 9. Características de los prototipos de edificios de pórticos.....	77
Tabla 10. Parámetros de diseño para estructura de 3 pisos.	85
Tabla 11. Resumen de los resultados de FHE para un pórtico de 3 pisos.	88
Tabla 12. Comparación de los datos obtenidos manualmente y con el programa de la estructura de 3 pisos.	91
Tabla 13. Convenciones de escala de color para niveles de daño para estructuras de pórticos.	112
Tabla 14. Resultados de pseudoaceleraciones para edificios prototipos de pórticos.	116
Tabla 15. Resultados de deriva máxima para edificios prototipos de pórticos.	117
Tabla 16. Resultados de cortante basal para edificios prototipos de pórticos.	118
Tabla 17. Comparación de la deriva encontrada por los autores con la deriva del estudio de Toro et. al. (2020) para la estructura de 5 pisos	121
Tabla 18. Resultados de deriva y cortante basal a partir de los resultados de Deepsoil.....	126
Tabla 19. Factores de Fa y Fv de las Microzonificaciones y NSR-10. Nota: En color amarillo están los puntos que fueron comparados para el ejemplo.	135

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia, es de gran relevancia la ocurrencia de eventos sísmicos debido a su ubicación en una región sísmicamente activa, en la cual la mayor parte de su población se encuentra en zonas de amenaza alta y moderada (Duque Escobar, 2022). Estos eventos generan fuerzas sísmicas, las cuales son una de las acciones más severas que actúan sobre las estructuras (Hurtado, 2000) siendo necesario estudiar estos movimientos para garantizar la seguridad y buen comportamiento de ellas. Pese a esto, las investigaciones realizadas por Toro-Ruiz et al. (2020) y Rangel y Villafañe (2018) han mostrado como los parámetros sísmicos dados por la Norma vigente para construcciones sismo resistentes NSR-10 deben ser verificados y analizados con mayor detalle puesto que no consideran las condiciones sismológicas de efecto de sitio con la suficiente confianza.

En consecuencia, se ve la necesidad de comprobar la confiabilidad de los valores de los efectos sísmicos presentados por la Norma NSR-10 en la evaluación de derivas y cortantes basales en los tipos de suelos existentes en la ciudad de Popayán. Además, profundizar en cómo la aceleración del sismo afecta a las estructuras a través de los distintos estratos de suelo (Dhakal & Chaulagain, 2023). La revisión y búsqueda de literatura, a pesar de que el departamento del Cauca es una zona de alta sismicidad, hay pocos estudios locales en comparación con la investigación a nivel nacional.

Los efectos sísmicos son estudiados considerando una aceleración del sismo, definida como el promedio de las máximas aceleraciones pico efectivas (APE) y cuyo valor es necesario para evaluar el comportamiento estructural. Para su estudio se requiere de los parámetros estipulados por la NSR-10, como la aceleración y velocidad pico efectiva A_a y A_v (Salgado, et al., 2010), los coeficientes de amplificación del sitio F_a y F_v , entre otros, los cuales dependen de la zona geológica donde se presente el sismo, el lugar donde se va a evaluar la estructura y su tipo de uso.

Respecto a los coeficientes F_a y F_v , estos consideran los efectos locales del suelo los cuales son capaces de amplificar o reducir las ondas sísmicas que impactan la estructura, y depende de la aceleración y velocidad pico efectiva y del tipo de suelo presente. No obstante, la Asociación de Ingeniería Sísmica (AIS, 2010) afirma que estas consideraciones dadas por la Norma generalizan el comportamiento de los distintos suelos y no representan con exactitud las amplificaciones que sufre la onda sísmica al pasar por los diferentes estratos, lo que hace que se evalúen las estructuras sin considerar las condiciones de amplificación específicas del lugar donde se ejecutará la obra, requiriendo un análisis detallado para la ciudad.

A raíz de esto se han realizado estudios de sismicidad en todo el país considerando los efectos de sitio de forma que permitan minimizar las posibles pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, causadas por un sismo.

Se han realizado estudios de microzonificación en Popayán, que permiten evaluar las acciones sísmicas en superficie las cuales deben ser tenidas en cuenta para realizar los diseños sísmo resistentes (Pérez et al., 2020). Aunque estos estudios deben ser aplicados oficialmente en el análisis y diseño de estructuras, como en el caso de Bogotá (FOPAE, 2010), para ciudades como Popayán los estudios de microzonificación no son tomados en cuenta de manera oficial para el diseño estructural ya que los valores oficiales de los parámetros sísmicos para toda la ciudad siguen dados por la NSR-10.

Lo anterior evidencia como, en el caso de Popayán, se están diseñando estructuras con valores generales y diferentes a los que proponen de manera más específica las microzonificaciones, por lo cual, es necesario contrastar los valores dados por la Norma y los valores de estos estudios y definir cuáles son los más adecuados para el diseño estructural en Popayán. En ese orden, utilizar parámetros generalizados puede incurrir en errores de diseño, sub-diseñando o sobre diseñando las estructuras, por lo cual no solo se presenta un problema en costos, sino especialmente en la seguridad y confiabilidad estructural, tal como lo expresa Toro Ruiz et al. (2020) al evidenciar claras diferencias en el comportamiento y diseño estructural al considerar los factores F_a y F_v de la microzonificación de Ibagué y los de la NSR-10.

Aversa y Crespellani (2016) señalan que los estudios de microzonificación deben servir de apoyo a los instrumentos urbanos de planeación, como el Plan de Ordenamiento Territorial, para definir el riesgo sísmico local. Esto permite identificar las zonas de mayor amplificación sísmica y prever sus efectos esperados en las distintas zonas dentro de los municipios, tal como se ha hecho en Italia y Estambul (Celikbilek & Sapmaz, 2016). Así, es posible desarrollar planes urbanísticos con estrategias de prevención eficaces para mitigar el riesgo sísmico.

Sin embargo, en el caso del Plan de Ordenamiento Territorial de Popayán, expedido en el año 2002, no considera ni exige la oficialización de los nuevos estudios de microzonificación sísmica y desestima la influencia que tiene la microzonificación en determinar las zonas con diferente potencial de riesgo sísmico y ponerlas al servicio del diseño estructural, la planificación urbana y la gestión del uso del suelo (Celikbilek & Sapmaz, 2016).

1.2. JUSTIFICACIÓN

El enfoque de la ingeniería estructural es brindar seguridad a las personas, siendo la estructura el principal elemento de análisis, la cual, según su uso soportará diferentes cargas; dentro de los escenarios de carga, existe la posibilidad de que la estructura sea sometida a fuerzas que no estén presente de forma regular, como lo son las fuerzas horizontales producidas por un sismo y cuya magnitud es incierta (Hurtado, 2000).

Pese a esta incertidumbre, es posible y necesario acercarse al valor más probable de estas fuerzas sísmicas (Salgado, 2010), lo que se conoce como un sismo probable, el cual ayuda a garantizar que en toda situación la estructura tenga un comportamiento seguro evitando de cualquier manera el colapso, reduciendo pérdidas económicas y humanas, y de la misma manera, impedir que las excesivas consideraciones de seguridad afecten las inversiones al sobre diseñar las estructuras. Dentro del campo de la ingeniería civil, se busca ese punto medio, como un punto óptimo entre la seguridad y la economía, siendo la intención principal de la investigación el reducir la brecha entre esos dos extremos.

Para ello, es necesario conocer todos los aspectos que pueden influir en la estimación de la fuerza sísmica y su interacción entre ellos, los cuales son: la sismicidad de la zona, el tipo de depósito de suelo debajo de la estructura y las características de la estructura. En cuanto a sismicidad de la zona, esta se representa por medio de factores de aceleración y velocidad pico efectiva A_a y A_v , los cuales indican la aceleración del sismo probable, y como estudio preliminar se consideran como constantes, manteniendo los coeficientes de la NSR-10, ya que Díaz-Parra (2018) afirma que estos parámetros fueron definidos con una base de datos suficiente, correspondiente a los registros de los sismos históricos en todo el territorio colombiano.

Por otro lado, las ondas sísmicas se amplifican al atravesar los depósitos de suelo, por lo que la NSR-10 clasifica los suelos en seis tipos de perfil, desde la roca competente ($V_s \geq 1500$ m/s) hasta suelos que requieren evaluación especial. Sin embargo, esta metodología generaliza los efectos. En este sentido las microzonificaciones aportar una mayor precisión al estimar la magnitud de las fuerzas sísmicas y deberían ser consideradas en todos los diseños (Pérez et al., 2020).

Para la ciudad de Popayán, la falta de investigaciones que refuercen la confiabilidad de estos valores generalizados puede llevar a asumir que los coeficientes F_a y F_v definidos por la Norma son adecuados para la ciudad. La NSR-10 establece que ciudades con más de 100 mil habitantes es obligatorio e indispensable tener una microzonificación vigente para definir tal parámetro (AIS, 2010). El uso de coeficientes de amplificación basados en microzonificaciones permite tener diseños más seguros ante cargas sísmicas (Toro Ruiz et al. 2020). Los estudios de microzonificación sísmica permiten someter una edificación a condiciones más reales y posibilita la realización de análisis estructurales más confiables y seguros, por ello deben ser aplicados oficialmente en el análisis y diseño de estructuras, como en el caso de Bogotá (FOPAE, 2010).

Por otro lado, es bien sabido, que las estructuras se comportan de manera diferente frente a un sismo, dependiendo de sus características (Araca Llanos, 2020). Por ejemplo, la masa del edificio (debido al peso) genera fuerzas de inercia que son proporcionales a la aceleración sísmica, traduciéndose en esfuerzos cortantes en los diferentes pisos del edificio; además, la altura total de la edificación muestra un indicio de la capacidad de disipar la energía por medio de deformaciones reduciendo o aumentando las aceleraciones. Por lo cual la selección del sistema estructural debe hacerse según las condiciones sísmicas y requisitos de la Norma, garantizando los requisitos de ductilidad y seguridad.

Según lo anterior es necesario tener claridad en cómo el elegir cada una de las anteriores características, provocan repercusiones en la seguridad y en los costos de la estructura (Toro Ruiz et al., 2020), ya que, al proponer usar los coeficientes de amplificación de la Microzonificación en lugar de los ya definidos por la Norma, lleva a que se presenten dos situaciones:

La primera es donde los coeficientes de amplificación de la Norma son menores a los de la microzonificación dando un indicio de posibles sub diseños de las estructuras representando un mayor riesgo para la seguridad frente a un posible evento sísmico; la segunda situación, donde los coeficientes de la Norma son mayores, que pese a estar trabajando dentro del margen de la seguridad, puede incurrir en aumento de los costos, reflejados en las dimensiones de los elementos y cantidades de acero del diseño (Toro Ruiz et al., 2020).

Tal es el caso de la investigación realizada en Ibagué por Toro Ruiz et al. (2020), en la cual se muestra cómo varía el comportamiento entre una estructura construida con los valores de amplificación sísmica F_a y F_v de la NSR-10 y una construida con los valores de la microzonificación, indicando por ejemplo, un sobre costo en el diseño de las estructuras del 23% en cantidades de acero de refuerzo evaluado para 5 zonas de la ciudad en suelo E, evidenciando que la pseudo aceleración estimada, a partir de F_a y F_v para evaluar las fuerzas sísmicas en el edificio, afectan de manera directa los costos, la estabilidad y seguridad.

Es conveniente desarrollar herramientas que analicen la interacción entre las características estructurales y su respuesta sísmica, facilitando la toma de decisiones en la fase de planeación de proyectos. Esto permite visualizar cómo estas características impactan de manera positiva o negativa en la viabilidad, utilidad y evaluación de los proyectos (Romero González, 2013), beneficiando la seguridad y los costos del proyecto, proporcionando una visión amplia y clara para los inversionistas.

Lo anterior, muestra la relevancia de este estudio, ya que, al analizar el comportamiento de estructuras prototipo en la ciudad de Popayán junto con un estudio general de las señales sísmicas, es posible identificar qué zonas podrían tener mayor riesgo. Esto facilita la implementación de planes de acción, agiliza los procesos con los cuerpos de seguridad y genera beneficios para la comunidad en términos de seguridad ante a los posibles eventos sísmicos

1.3. OBJETIVOS

Para el desarrollo de esta investigación se planteó el siguiente objetivo general:

- Comparar el cortante basal y la deriva de un grupo de estructuras distribuidas en diferentes sitios en Popayán, considerando la NSR-10 y los estudios de microzonificación.

Objetivos específicos:

A partir de este objetivo se definieron los objetivos específicos:

- Observar el comportamiento y efecto del sismo en una estructura teniendo en cuenta las variaciones de los parámetros de F_a y F_v considerados en el diseño por la NSR-10 y los estudios de microzonificación.
- Comparar los parámetros de los estudios de microzonificación realizados para Popayán y la NSR-10.
- Estudiar el impacto de la amplificación del suelo para una estructura en un área de Popayán.

1.4. BENEFICIOS ESPERADOS

Favorecer a la comunidad investigativa y a la población de Popayán aportando para el conocimiento de riesgo sísmico en la ciudad. Para ello, se pretende sentar las bases informativas sobre el posible comportamiento de diferentes estructuras sobre los distintos suelos del casco urbano de la ciudad, permitiendo la identificación de zonas vulnerables, para que en futuros estudios se implementen medidas preventivas y planes de acción efectivos frente a estos eventos sísmicos, permitiendo una respuesta rápida y eficiente por parte ellos cuerpos de seguridad en beneficio de toda la comunidad.

Como resultado, se desarrolló un programa con un potencial para convertirse en una herramienta de amplio alcance que permita estimar el riesgo sísmico de la ciudad. En el futuro se espera que este sistema sea capaz de emitir alertas en dispositivos móviles ante eventos sísmicos proporcionando modelos predictivos de pérdidas no solo monetarias sino también humanas. Con esto se busca fomentar el uso de tecnología de monitoreo constante a las condiciones sísmicas de la ciudad fortaleciendo la gestión del riesgo y seguridad de los habitantes.

1.5. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

La organización del proyecto cuenta con varias etapas que resultan ser claves para alcanzar los objetivos planteados y obtener resultados óptimos. La estructuración del proyecto se describe a continuación:

Capítulo 1: Inicialmente se plantea el problema que motivo a desarrollar este proyecto, se justifica las razones por las cuales los resultados de este proyecto son beneficiosos para la comunidad, y se establecen los objetivos. Además, se presenta una descripción de la ubicación de la zona de estudio y principales características de interés.

Capítulo 2: Se efectúa la recopilación de información relacionada a la investigación como conceptos y métodos necesarios para la comprensión de los temas a tratar y el proceso que se va a seguir durante el proyecto.

Capítulo 3: Se presentan algunas consideraciones que hace la NSR-10 frente al análisis sísmico y que son requeridas para el procesamiento de datos.

Capítulo 4: Se realiza una recolección de información previa que incluye los estudios de Microzonificaciones (MS) necesarias para el desarrollo de esta investigación.

Capítulo 5: Se explica de manera clara el proceso metodológico y los pasos que se sigan y llevan a cabo en la investigación.

Capítulo 6: Se recopila los datos necesarios para desarrollar el proyecto, desde puntos de análisis como tipologías estructurales. También se describe el procesamiento de datos, indicando que se tiene claridad en la forma de trabajo de los programas que se utilizan como apoyo para procesar los datos de entrada y así obtener resultados, que en este caso son ETABS (Versión 21.2.0) y Deepsoil (Versión 7.1.2.0), los cuales son herramientas para analizar estructuras y analizar el comportamiento dinámico del suelo, respectivamente.

Capítulo 7: Se presentan los resultados obtenidos a partir del procesamiento de datos. Inicialmente se presenta la comparación de factores de efecto de sitio de los 3 estudios, el modelado y análisis de las estructuras utilizando la herramienta de ETABS y Deepsoil, y así, ser capaces de evaluar derivas y cortantes basales, integrando los factores de amplificación de sitio (F_a y F_v). Con la información obtenida se diseñó un programa en Matlab (Versión R2023b) que permite integrar todos los resultados y generar mapas interactivos de riesgo sísmico, los cuales algunos de ellos fueron elaborados con soporte de QGIS (Versión 3.34.9). También fue posible realizar escenarios sísmicos específicos evaluando el comportamiento estructural y su impacto en las distintas zonas de Popayán.

Capítulo 8: Se analizaron los resultados, incluyendo, mapas de riesgo sísmico detallados, proporcionando una herramienta clave para la planificación urbana y la gestión de emergencias en la ciudad. Se discuten y se determinan los aspectos positivos y negativos de los resultados.

Capítulo 9 y 10: Se definen las conclusiones de la investigación realizada dando respuesta a la hipótesis planteada y determinando si se cumple con los objetivos propuestos. Además, se describen algunas recomendaciones para futuras investigaciones o implementaciones de los resultados obtenidos.

Capítulo 11: Finalmente, se resaltan todas las investigaciones y documentos de referencia para el proyecto.

1.6. UBICACIÓN Y SISMICIDAD DE LA REGIÓN

En este capítulo se presentan características de sismicidad de Colombia, específicamente para la ciudad de Popayán, dando contexto al estudio realizado, así como algunos estudios realizados en el país sobre temas a fines como sismicidad, amenaza y riesgo sísmico que sirven de apoyo para el desarrollo de este trabajo.

1.6.1. LOCALIZACIÓN DEL TERRITORIO DE ESTUDIO

Como se observa en la Figura 1, la ciudad de Popayán está ubicada en el sur occidente colombiano, localizada en las inmediaciones de la cordillera central, en el valle de Pubenza, limitado en el occidente por la cordillera Occidental y en el oriente por la cordillera Central. La capital del departamento del Cauca se encuentra a una altitud promedio de 1737 metros sobre el nivel del mar, siendo un territorio de alta actividad sísmica debido a su proximidad a fallas geológicas. Una región con clima templado y una rica historia cultura, rodeada de ríos como el Cauca y el Molino.



Figura 1. Localización geográfica de Popayán.

Fuente: (Modificado Tascón, 2020).

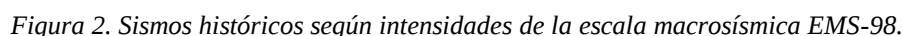
1.6.2. SISMICIDAD HISTÓRICA DE LA REGIÓN

Sobre la Tierra existen regiones sísmicas, las cuales son zonas activas de la corteza terrestre muy propensas a sufrir grandes movimientos sísmicos, como el Cinturón de Fuego del Pacífico en el cual se encuentra Colombia. El país se localiza dentro de una de las zonas sísmicas más activas de la Tierra, pues en la región convergen las placas tectónicas de Nazca y del Caribe contra la placa suramericana que se mueven y chocan entre sí, produciendo la formación de montañas, cordilleras y fallas geológicas (Duque Escobar, 2022).

En la costa pacífica se presenta un proceso de subducción perteneciente al Cinturón de Fuego, en el cual la placa Nazca se introduce debajo de la placa suramericana. El material rocoso

Cerca del 83% de la población colombiana habita en zonas de alto y moderado riesgo sísmico según IDIGER (2024), dado a que la mayoría de la población vive en las regiones Pacífica y Andina en las cuales son frecuentes los sismos, destacando sismos de intraplaca someros e intensos en la región del Pacífico, y profundos y menos leves sobre la región Andina. Caso contrario ocurre en las otras regiones, donde en el Caribe los sismos son eventuales y en la Orinoquia y Amazonía son aún más escasos, según Duque Escobar (2022).

Del mismo modo, la alta sismicidad se ve reflejada en la historia de la ciudad, para la cual se registran eventos sísmicos significativos que han ayudado a resaltar la importancia de asumir la responsabilidad en la planificación y diseño de infraestructura con consideraciones sismorresistentes, reduciendo los impactos negativos ante futuros movimientos sísmicos. De acuerdo con el informe de Evaluación de Riesgo Sísmico del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2020) Popayán ha sido afectada en más de 12 ocasiones por sismos de alta intensidad como se observa en la Figura 2, donde la mayoría de los sismos que han causado daños significativos en Popayán han sido producidos por las fuentes corticales.



25

Entre los sismos que han afectado a la ciudad, se destacan 5 de ellos, con una magnitud superior a 5 y que han causado daños significativos, los cuales se mencionan a continuación:

1. **Sismo del 2 de febrero de 1736:** Su epicentro se localizó muy cerca de la ciudad de Popayán con una magnitud 6.0 Mw y una profundidad superficial, marco un importante registro en la historia de la ciudad.
2. **Sismo del 16 de noviembre de 1827:** Este sismo se referencia como uno de los más destructivos en la historia de Colombia, tuvo una magnitud 7.1 Mw, una profundidad superficial y su epicentro se localizó al sureste del departamento del Huila, asociado principalmente al sistema de fallas frontal de la cordillera oriental.
3. **Sismo del 25 de mayo de 1885:** Con una magnitud de 6.4 Mw, su epicentro se localizó al norte del departamento del Cauca, a 51.7 Km de Popayán, este evento también con una profundidad superficial se vinculó al sistema de fallas Romeral.
4. **Sismo del 31 de enero de 1906:** Este terremoto interplaca, asociado a la subducción, en el pacífico colombiano, con una magnitud de 8.8 Mw. Su epicentro estuvo en el océano pacífico marcando un evento de gran impacto regional.
5. **Sismo del 31 de marzo de 1983:** Considerado el más relevante para el desarrollo normativo del país, con una magnitud de 5.6 Mw, una profundidad superficial, su epicentro se localizó cerca de la ciudad de Popayán con una distancia hipocentral aproximada del evento de 19.7 km, se asocia al sistema de fallas de Romeral.

En el sismo del 31 de marzo de 1983 las cifras aproximadas sobre lo ocurrido en el departamento del Cauca fueron: 250 víctimas mortales, 1.500 heridos, 4.964 construcciones destruidas y 13.796 viviendas con daños severos como se muestra en la Figura 3. En este evento se reconoce que los tres factores más influyentes en la ocurrencia de daños severos en Popayán fueron la intensidad de la sacudida, los materiales de construcción predominantes, y las deficientes prácticas de diseño y construcción (Pérez et al. 2020).



Figura 3. Fotografías de edificaciones afectadas en Popayán por el sismo de 1983.

Fuente: (Díaz et al., 2020).

A raíz de lo anterior se promulgaron pautas de reconstrucción para la ciudad y se dio origen al Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes CCCSR-84 mediante el Decreto 1400 de 1984 y a la primera microzonificación sísmica de Colombia, una de las primeras de América (Sarria, 1979). A través del tiempo el CCCSR-84, demostró ser insuficiente y debió ser actualizado al Reglamento de Construcción Sismo Resistente (1998) hasta llegar a la Norma Colombiana Sismo Resistente NSR-10, la cual permitió identificar de manera más acertada las zonas de amenaza sísmica en Colombia (Gualdrón & Rodríguez, 2020).

1.6.3. FUENTES SÍSMICAS DE LA REGIÓN

Colombia está expuesta a la actividad sísmica generada por los diversos sistemas de fallas geológicas activas existentes en el país, por lo cual París y Romero (1994) presentan la siguiente descripción de las principales fallas que se encuentran activas:

- **Fallas en el sistema de subducción de Nazca-Sudamericana:** La subducción es causada por el deslizamiento del borde de una placa de la corteza terrestre por debajo del borde de otra. En este caso, la interacción entre las placas de Nazca y Sudamericana genera actividad sísmica y ha dado lugar a la formación de diversas

fallas en Colombia, haciendo propensa a terremotos significativos el área de subducción en la costa oeste del país.

- **Fallas en la Cordillera de los Andes:** La Cordillera de los Andes está asociada con diversas fallas tectónicas que pueden generar terremotos y deslizamientos de tierra.
- **Zona de Falla de Romeral:** Esta es una de las fallas más estudiadas en Colombia y se encuentra en la región de Romeral, atravesando los departamentos de Nariño, Cauca, Tolima, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquia, Córdoba, Sucre, Bolívar y Magdalena. Ha sido identificada como una fuente potencial de sismos significativos.

Para Popayán de acuerdo con el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica (MNAS) del Servicio Geológico Colombiano realizado por Arcila et al, (2020) se distinguen tres grandes fuentes sismogénicas que han generado sismos con intensidad mayor o igual 5: la zona de subducción frente a la costa del Pacífico, la zona de Benioff caracterizada por sismos de profundidad intermedia y dos grandes fuentes corticales: Sistema de Fallas Frontal de la Cordillera Oriental y Sistema de Fallas de Romeral.

En la Figura 4, Figura 5 y Figura 6 se presentan los sismos significativos en Popayán, según la fuente sismogénica relacionada. Cada epicentro lleva una etiqueta con la fecha y magnitud del evento.

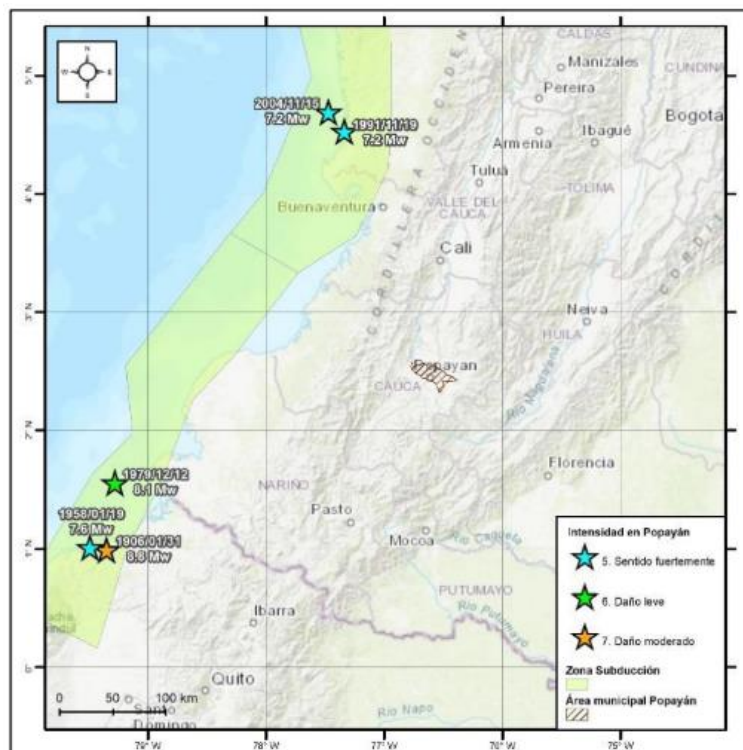


Figura 4. Sismos de subducción con intensidad ≥ 5 en Popayán.

Fuente: (Díaz et. al., 2020).

Figura 5. Sismos de la zona de Benioff con intensidad ≥ 5 en Popayán.

Fuente: (Diaz et al., 2020)

Figura 6. Sismos corticales con intensidad ≥ 5 en Popayán.

Fuente: (Diaz et al., 2020).

De lo anterior, Pérez et al. (2020) afirman que, debido a su proximidad y a las magnitudes máximas asignadas, tanto las fallas activas como la zona de Benioff son las que en mayor medida pueden generar eventos que afecten a la ciudad.



Fuente: (Pérez et al., 2020).

En Colombia se han realizado diversos estudios de sismología, entre los que se destacan:

- 30

El primer estudio fue requerido para la expedición de la nueva versión de la NSR de 2010 siendo la base para definir los parámetros de diseño Aa, Av, Ae y Ad. Esto se logró por medio de la definición de la tectónica del país, la recopilación de información sobre los sismos ocurridos, cálculo de parámetros estadísticos de las fuentes sismogénicas, cálculo de las curvas de aceleración horizontal esperada para diferentes periodos estructurales y generación de un conjunto de espectros de amenaza uniforme en términos de aceleración.

El segundo estudio consistió en identificar y modelar cada una de las fallas o fuentes sismogénicas a nivel nacional, agrupándolas en segmentos de grandes familias de fallas locales; asignar mediante ubicación geográfica los eventos sísmicos que se consideran asociados a cada uno de los segmentos, utilizando para ello, los catálogos sísmicos nacionales; caracterizar cada una de las fuentes sísmicas mediante parámetros estadísticos relevantes, tales como magnitud mínima, máxima y frecuencias de eventos para diferentes rangos de magnitudes; realizar el análisis de amenaza sísmica utilizando el programa CRISIS V7.2; y, finalmente, interpretar y depurar los resultados para su utilización en el diseño de infraestructura y en otras aplicaciones. El tercero calcula valores de aceleración con otra metodología mostrando que los valores obtenidos para las ciudades de Cali, Ibagué, Medellín, Pasto, Pereira, Popayán y Quibdó son mayores que los de la Norma sismorresistente vigente.

De los estudios sobre sismicidad y sismología que se han realizado en otras ciudades del país se debe destacar ciudades como Bogotá, Medellín, Armenia e Ibagué, de los cuales se considera pertinente mencionar los siguientes porque fueron parte del fundamento para la realización de este trabajo:

- Comparación del análisis y diseño estructural entre la microzonificación sísmica de Ibagué y el reglamento NSR-10 (Toro et al., 2020).
- Espectros de respuesta elásticos de desplazamiento para la ciudad de armenia, apropiados para el diseño sísmico basado directamente en desplazamientos (DBDD) (Aldana-Carrillo et al., 2009).
- Estimación de la amenaza sísmica en condiciones de referencia y amplificación de ondas sísmicas en un lugar específico: Ibagué.
- Propuesta metodológica de microzonificación sísmica - Methodological proposal for seismic microzonation (Diaz-Parra et al., 2018).

Además, se considera necesario señalar los estudios de microzonificación sísmica realizados en el país, los cuales según Gualdrón y Rodríguez (2020), se están convirtiendo en la base para la elaboración de los planes de prevención y atención de desastres en caso de un sismo, generando un nuevo conocimiento en el área de geotecnia y estructuras ante el comportamiento del suelo en presencia de ondas sísmicas. Por esta razón, son cada vez más las ciudades colombianas que implementan a sus planes de desarrollo y de construcción sismo resistente los estudios de microzonificación.

Dentro de las ciudades que han iniciado este proceso se pueden mencionar Popayán, Bogotá, Medellín, Cali, Manizales, Armenia, Bucaramanga y Pereira. Prácticamente la mayoría de las ciudades importantes ubicadas en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta han iniciado los estudios necesarios tendientes a la realización de mapas de microzonificación sísmica.

Sin embargo, destaca el caso de Armenia y Bogotá, donde los estudios de microzonificación han sido decretados de manera obligatoria para el diseño y construcción de edificaciones sismorresistentes.

Por otra parte, la ciudad de Popayán cuenta con tres estudios de microzonificación sísmica, el primero de ellos fue realizado en el año 1991 por la Comunidad Económica Europea - CEE e Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS, el segundo por la Universidad de los Andes en el 2012 y el tercero por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en el año 2020, sin embargo, ninguno de estos se aplica oficialmente en el diseño de estructuras para Popayán.

2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se muestra el marco teórico que fundamenta esta investigación, encontrando conceptos generales y específicos del tema de investigación como conceptos de análisis estructural, sismología, espectro de respuesta, microzonificaciones, análisis sísmicos, entre otros.

2.1. CONCEPTOS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En el campo de ingeniería civil, una estructura es un tipo de construcción formada por elementos unidos entre sí, capaces de soportar la acción de una serie de fuerzas que actúan sobre ellas. Para determinar el estado de deformación y tensiones que se producen en el interior de la estructura a consecuencia de las acciones actuantes sobre ella se emplea el análisis estructural (Celigüeta, 2022).

Un tipo de análisis estructural es el análisis sísmico, que permite visualizar la respuesta de las estructuras como resultado de un sismo, entregando información característica de la estructura basada en su configuración geométrica, materiales, etc. Para fines de diseño sismo resistente interesa conocer la respuesta máxima de la estructura, por ejemplo, el desplazamiento lateral máximo, el cortante basal máximo, la aceleración máxima, entre otros (Rochel Awad, 2012). En el presente trabajo se estudia la respuesta de la estructura a partir del cortante basal y la deriva máxima:

2.1.1. CORTANTE BASAL

El cortante basal (V_b) representa la fuerza lateral total que se le aplica a una estructura como consecuencia de las fuerzas de inercia generadas en un sistema de N grados de libertad. Esta fuerza distribuye a lo largo de la altura del edificio y se acumula progresivamente en cada nivel reflejándose en la base de la edificación. En la Figura 8 se ilustra este concepto, donde V_i corresponde al cortante del piso i , y V_0 equivale al cortante basal V_b . Los cortantes en cada nivel resultan de la aplicación de la fuerza sísmica en ese punto específico (Saavedra, 2016).

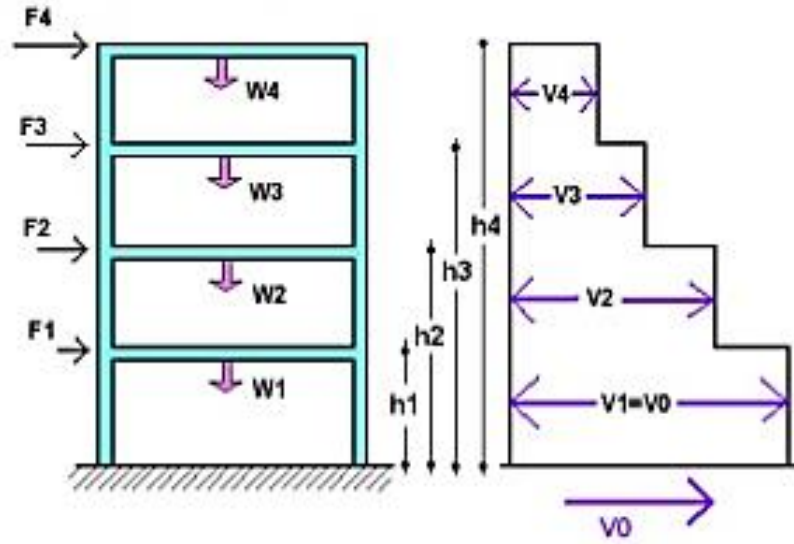


Figura 8. Representación gráfica del cortante de piso y cortante basal V_0 .

Fuente: (Saavedra, 2016).

La NSR-10 presenta la Ecuación 1 para determinar del cortante basal (V_b):

$$V_b = \sum_{i=1}^n F_i$$

Ecuación 1. Fórmula 1 del cortante basal

Donde,

- F_i es la fuerza del piso i
- n es el número de pisos
- W_T es el peso sísmico de la estructura (KN)
- S_a es la pseudoaceleración medida en porcentaje de la gravedad (%g)

Una de las principales suposiciones del análisis es considerar que el peso de la estructura se concentra en cada uno de los niveles existentes, generando N grados de libertad como número de niveles haya, tal como se muestra en la Figura 9.

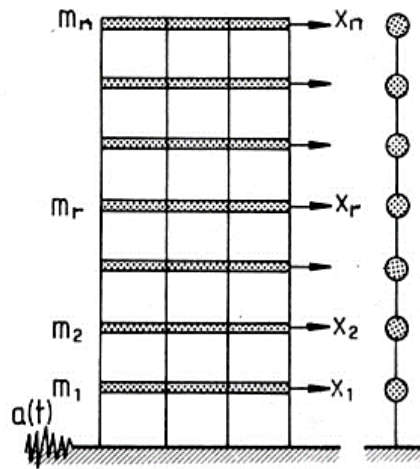


Figura 9. Concentración de la masa de una estructura.

Fuente: (Cassano, 2009).

El cortante basal mide la demanda sísmica, por tanto, sus resultados dan una visión preliminar para determinar la sollicitación final de una estructura, que se ve directamente reflejado en las dimensiones de los elementos estructurales de los edificios, repercutiendo directamente en los costos de esta (Rangel Mora & Villafañe Mattos, 2018).

2.1.2. DERIVA

Las derivas (Δ) son el desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos colocados en la misma línea vertical medidos en niveles o pisos consecutivos de una edificación, como se observa en la Figura 10. Este desplazamiento de los pisos proporciona información valiosa sobre el comportamiento estructural bajo cargas sísmicas, ya que deformaciones excesivas pueden generar inestabilidad y comprometer la seguridad del edificio. Su cálculo se establece matemáticamente en la Ecuación 2.

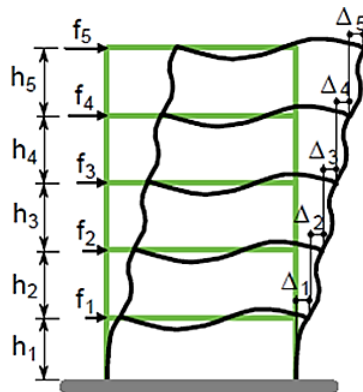


Figura 10. Representación gráfica de la deriva Δ .

Fuente: (Ceballos, 2019).

$$\Delta_i = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{h_i}$$

Ecuación 2. Deriva

Donde,

- Δ_i es la deriva máxima
- δ_i es el desplazamiento horizontal máximo de un punto en el piso i.
- δ_{i-1} es el desplazamiento horizontal máximo de un punto localizado en el mismo eje vertical localizado en el piso inmediatamente inferior (i-1).
- h_i es la altura del piso i.

La deriva es un indicador clave del comportamiento estructural, ya que permite evaluar indirectamente la rigidez y ductilidad de una edificación. Estos dos factores, junto con la resistencia conforman los tres principios fundamentales de la filosofía de diseño de la NSR-10. Además, la deriva facilita la estimación del daño estructural, lo que permite establecer medidas para su mitigación a través de límites normativos (Rochel Awad, 2012). En el caso de la Norma colombiana se establecen valores máximos de deriva del 1% para pórticos en concreto reforzado, con el fin de garantizar un desempeño estructural adecuado.

Además, en rasgos generales la deriva depende de tres parámetros: la carga sísmica, el módulo de elasticidad del concreto, la rigidez y las dimensiones de los elementos estructurales, por lo cual se ha convertido en uno de los parámetros con mayor influencia en el tamaño de los elementos estructurales (Borrero Chaux, 2011).

2.2. PROPIEDADES DE LAS ESTRUCTURAS

Para que el análisis de una estructura sea correcto es necesario que su idealización se acerque lo más posible a su comportamiento real. Para lograr esto se deben considerar varios aspectos técnicos, como los tipos de cargas actuantes, las propiedades dinámicas de la estructura, el periodo de la estructura, la frecuencia natural, entre otros y así poder visualizar la respuesta de la estructura frente a un sismo.

2.2.1. TIPOS DE CARGAS ACTUANTES

Las cargas pueden considerarse como estáticas o dinámicas de acuerdo con el tiempo en el que estas permanecen o varían en la estructura. Una carga estática es aquella que varía muy lentamente, mientras que las cargas dinámicas son aquellas que varían continuamente su localización, dirección y magnitud, es decir, que muestran importantes efectos dinámicos durante el tiempo en que aparecen produciendo aceleraciones sobre los elementos de la estructura. Estas cargas se modelan debido a la acción de sismos, viento, vibraciones debido al movimiento de maquinarias, cargas de impacto, nieve (Nilson, A. H., & Darwin, D 1999). Por ejemplo, en la Figura 11 se muestra la señal de una carga dinámica a causa de un sismo.

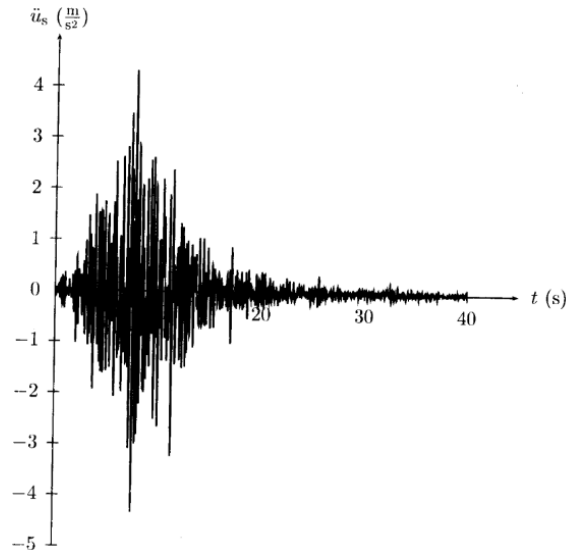


Figura 11. Carga dinámica de aceleración sísmica del terreno.

Fuente: (Hurtado, 2000).

2.2.2. MASA

La masa es una medida de la cantidad de materia de un objeto, por otro lado, el peso, es la fuerza de gravedad que actúa sobre un objeto. La masa es un factor importante en la determinación de la ecuación de movimiento, ya que a partir de la cantidad de masa se genera fuerzas de inercia que son proporcionales a la aceleración sísmica, traduciéndose en esfuerzos cortantes en los diferentes pisos del edificio.

2.2.3. AMORTIGUAMIENTO

El amortiguamiento o fricción interna es una de las propiedades más sensibles de materiales y estructuras. Es el fenómeno por el cual se disipa la energía mecánica en un sistema y determina la amplitud de la vibración en la resonancia y el tiempo de persistencia de la vibración después que culmina la excitación.

Chopra (2014), define al amortiguamiento como “el proceso mediante el cual la amplitud de vibración disminuye de manera constante”. (p.7) Esto significa, que en estructuras sencillas la disipación de energía está dada por diversos mecanismos asociados con efectos térmicos del esfuerzo elástico repetido y de la fricción interna que se produce en el material o sólido. En estructuras reales, se incluye la fricción de las conexiones de acero, la apertura y cierre de micro fisuras en el concreto y la fricción de los elementos estructurales con los no estructurales.

2.2.4. RIGIDEZ

La rigidez mide la resistencia a las deformaciones elásticas producidas por un material con la capacidad estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones. En la teoría de la rigidez estructural, las estructuras están formadas por colecciones de objetos que en sí mismos son cuerpos rígidos. Una estructura es rígida si no puede flexionarse; es decir, si no hay un movimiento continuo de la estructura que conserve la forma de sus componentes rígidos y el patrón de sus conexiones en las uniones. Cuando existe una diferencia notable entre los desplazamientos de la base con los de la cubierta, se puede decir que el edificio es flexible y no rígido (Chopra, 2014).

2.2.5. PERIODO DE LA ESTRUCTURA

El periodo fundamental de una estructura se refiere al tiempo que le toma completar un ciclo completo de vibración en ausencia de amortiguación. También se conoce como "periodo natural" (T_n) de vibración del sistema, y sus propiedades de vibración natural están determinadas únicamente por las características intrínsecas de la estructura, como su masa y rigidez. El término "natural" enfatiza que estas son propiedades inherentes del sistema cuando vibra sin ninguna influencia externa.

El periodo es un concepto esencial en el análisis sísmico, ya que la respuesta de deformación $u(t)$ de un sistema de un grado de libertad (1GDL) frente a una aceleración del terreno dada ($\ddot{u}_g(t)$) depende únicamente del periodo de vibración natural del sistema y de su fracción de amortiguamiento. Por ello, en general, a medida que el periodo de vibración aumenta, la deformación máxima tiende a incrementar.

2.2.6. FRECUENCIA NATURAL

La frecuencia natural de una estructura es la frecuencia a la cual esa estructura vibrará de manera natural y autónoma cuando se la libera desde una posición de equilibrio o se la excita mínimamente. Para una estructura dada, existen múltiples frecuencias naturales, cada una asociada a un modo de vibración específico, estos modos de vibración representan las diferentes formas en las que la estructura puede moverse de manera autónoma.

Cuando una estructura se somete a una carga o una excitación externa que coincide con una de sus frecuencias naturales (llamada frecuencia de resonancia), puede experimentar una amplificación significativa de las vibraciones, lo que puede llevar a daños o colapsos. Por esta razón, es importante conocer las frecuencias naturales de una estructura al diseñar o al realizar análisis de vibración, especialmente en el caso de edificios, puentes y otras estructuras que puedan verse afectadas por vibraciones no deseadas

2.3. NIVELES DE DAÑO DE LAS ESTRUCTURAS

El daño estructural es el daño de mayor importancia en las edificaciones y depende del comportamiento de los elementos resistentes de una estructura como vigas, columnas y muros de carga (Pimbo Palate, 2021). La evaluación del daño se puede hacer de diversas maneras, una de ellas es la forma cualitativa en la cual se establecen diferentes niveles a través de la identificación de daños ocasionados por la ocurrencia de alguna acción, como, por ejemplo, un sismo. Con el desarrollo de los modelos de daño se ha podido evaluar el daño en forma cuantitativa basándose en parámetros de respuesta estructural, como las derivas de piso, demandas de ductilidad, rigidez, cortante de piso, etc. (Mena Hernández, 2002).

Diversos autores como Mosalam et al (1997), Vielma (2008), Mena Hernández (2002), EERI (1996), FEMA (1995), SEAOC (1995), Ghobarah (1997), entre otros han estudiado los estados o niveles de daño a través de la identificación y parametrización de parámetros tanto cualitativos como cuantitativos, sin embargo, a pesar de todos los estudios de los métodos de daño aún no existe un criterio unificado para la definición de estos. En las Tablas 1 al 3 se presentarán los límites que plantean algunas metodologías para definir los estados de daño basado en la deriva de piso como parámetro de análisis.

2.3.1. METODOLOGÍA REALIZADA POR LA FEMA (1997)

Se considera una de las metodologías más completas para estimar pérdidas por sismos, la cual mediante valores medios de deriva se definen los umbrales de los estados de daños Leve, Moderado, Severo y Completo. En general, estas estimaciones de deriva son diferentes para cada tipo de edificio modelo, incluido el sistema estructural, la altura y nivel de diseño sísmico. La Tabla 1 resume las derivas medias utilizadas para definir el daño estructural para edificios de pórticos con un nivel de diseño sísmico alto (DES).

Tabla 1. Derivas límites de entrepiso para un nivel de daño propuesto por la FEMA.

Derivas límite de una estructura en pórtico de concreto				
Número de pisos	Daño Leve	Daño Moderado	Daño Severo	Daño completo
1 a 3	0.005	0.008	0.02	0.05
4 a 7	0.0033	0.0053	0.0133	0.033
8 a más	0.0025	0.004	0.012	0.025

Fuente: (Cervantes García & Albrizzio Francia, 2020).

2.3.2. METODOLOGÍA VISION 2000

El comité VISION 2000 basa su metodología involucrando todas aquellas actividades necesarias tanto para el proceso constructivo, como para las tareas de mantenimiento, que permiten predecir el desempeño sísmico de las estructuras en sismos de diferentes

intensidades. La forma de medir el desempeño sísmico es a través de las medidas de daño luego de un evento de este tipo. VISION 2000 mide su desempeño a través de derivas de piso permisibles como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Derivas límites de entrepiso para un nivel de daño propuesto por VISION 2000.

Rango de derivas	Nivel de desempeño	Niveles de daño	Observaciones
$\Delta \leq 0.002$	Totalmente operacional	No hay daño	
$0.002 < \Delta \leq 0.005$	Operacional	Daño leve	El agrietamiento no es considerable en la estructura
$0.005 < \Delta \leq 0.015$	Seguridad	Daño Moderado	Agrietamiento considerable y se ha iniciado la fluencia de la estructura
$0.015 < \Delta \leq 0.025$	Próximo al colapso	Daño Extensivo	
$0.025 < \Delta$	Colapso	Daño completo	Colapso de la estructura

Fuente: (SEAO, 1995).

2.3.3. METODOLOGÍA DE GHOBARAH (1997)

De acuerdo con Aguiar Falconí (2006), la metodología propuesta por Ghobarah et al. (1997) define cinco niveles de desempeño en función de la deriva máxima de piso los cuales permiten establecer el nivel de daño estructural y así tener una idea del estado en que se encuentra una edificación con base en una deriva máxima. En la Tabla 3 se indica además en forma general el nivel de daño en cada clasificación y el desempeño.

Tabla 3. Derivas límites de entrepiso para un nivel de daño propuesto por Ghobarah et al (1997).

Deriva de piso	Daño	Descripción del daño	Desempeño
$\Delta \leq 0.002$	Sin daño	Sin daño	Sin daño
$0.002 < \Delta \leq 0.005$	Leve	Grietas ligeramente visibles	Agrietamiento
$0.005 < \Delta \leq 0.011$	Moderado	Grietas menores de 1mm	Fluencia del acero
$0.011 < \Delta \leq 0.023$	Extensivo	Grietas entre 1 y 2mm	Inicio de mecanismo
$0.023 < \Delta$	Completa	Grietas mayores a 2mm	Mecanismo global

Fuente: (Aguiar Falconí, 2006).

Los niveles de daño anteriores se han establecido generalmente bajo las descripciones presentadas en la Tabla 4. Sin embargo, para este trabajo se dividió el Daño moderado en 3 tipos de daños, ya que este es el nivel donde se encuentran la mayoría de las estructuras frente a un sismo y por ende se busca ser más específico en la descripción de daños. El daño moderado fue subdividido teniendo como criterio la deriva máxima permitida por la NSR-10 la cual es de 1%.

Tabla 4. Descripción de los estados de daño.

Estado de daño	Descripción
Sin daño estructural	Sin ningún tipo de daño
Daño leve	Presencia de pocas grietas pequeñas en elementos no estructurales
Daño moderado 1	Evidencia de pequeñas, pocas y localizadas grietas en elementos estructurales y no estructurales.
Daño moderado 2	Grietas evidentes en elementos estructurales, posible pérdida de recubrimiento. Se supera la deriva permitida por la NSR-10.
Daño moderado 3	Aumento de grietas en elementos estructurales, la mayoría de las paredes exhiben grandes grietas diagonales y horizontales. Pérdida de estabilidad.
Daño severo	Fallas localizadas en algunos elementos estructurales o sus conexiones sin pérdida de estabilidad. Varios muros de mampostería pueden volcarse, la mayoría del mobiliario se ha volcado. La estructura presenta deformación permanente
Daño completo	Desplazamiento lateral excesivo, pérdida de estabilidad vertical. Colapso parcial o total de la estructura.

Fuente: Tomado de Hazus (1999)

2.4. CONCEPTOS DE SISMOLOGÍA

Para comprender los conceptos básicos de sismología es necesario mencionar que un sismo es el resultado de la liberación de energía acumulada durante un largo tiempo en la corteza terrestre (Chuy, T. 2013). Esto se produce por el movimiento relativo entre las placas tectónicas que originan grandes esfuerzos concentrados principalmente en sus límites, haciendo que se deforme el medio. Las placas funcionan como grandes resortes que van acumulando energía potencial (energía sísmica), tanta como el límite elástico del medio lo permita, hasta que se rompe o se fractura, es decir, se desplaza súbitamente y origina un sismo (Espíndola Castro & Pérez Campos, 2018).

Las señales sísmicas son registradas por redes sismológicas, para ser analizadas y obtener información de las características del sismo en cuanto al tiempo de origen, localización, magnitud, profundidad y potenciales efectos. El tamaño y efectos de un sismo se pueden calcular por su magnitud que es un único valor y por la intensidad que es diferente según el sitio de análisis (Chuy, T. 2013).

Las señales sísmicas se pueden medir con instrumentos de registros como los acelerógrafos, en los cuales se registra la aceleración del suelo, obteniéndose indirectamente la velocidad y el desplazamiento de las partículas. Con este registro se puede conocer la respuesta del suelo, si se coloca sobre el suelo, y la del conjunto suelo-estructura, si se coloca sobre la estructura, por lo cual permite conocer indirectamente el comportamiento de esta (Duque Escobar, 2022).

2.4.1. AMENAZA Y RIESGO SÍSMICO

La amenaza sísmica, es la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos y los movimientos del terreno que estos pueden generar para un sitio particular en un periodo de tiempo determinado. La amenaza sísmica dicta en gran medida la intensidad de movimiento esperada a nivel de roca para un sitio, sin embargo, el movimiento que se puede llegar a sentir en diferentes puntos de la ciudad también está influenciado por el tipo de suelo en cada uno de ellos debido a los efectos locales.

Para evaluar la amenaza es necesario conocer dónde se pueden generar los sismos teniendo en cuenta las fallas geológicas activas identificadas y la información sísmica registrada a nivel histórico e instrumental en el país. Generalmente, en su evaluación se utilizan métodos probabilísticos simplificados para definir el comportamiento sísmico de una zona basado en las fuentes sísmicas, los registros de eventos sísmicos ocurridos y la atenuación del movimiento del suelo, expresando los resultados en forma de probabilidad de ocurrencia de los distintos niveles de intensidad del movimiento (Arcila et al., 2020).

El análisis de la amenaza sísmica en roca a nivel nacional ha permitido establecer los coeficientes de aceleración y velocidad pico efectiva (A_a y A_v) que han sido incorporadas en el reglamento de la NSR-10, dividiendo al país en zonas de amenaza alta, intermedia y baja, y mejorando la precisión en el diseño sismo resistente de las edificaciones en Colombia (Salgado-Gálvez, M, 2014). Con lo anterior es posible construir un modelo de amenaza sísmica permitiendo estimar los valores de intensidad esperada a partir de diferentes periodos de retorno, caracterizando estadísticamente la probabilidad de ocurrencia de una intensidad sísmica o aceleración del suelo (SGC, 2024) tal como se muestra en la Figura 12.

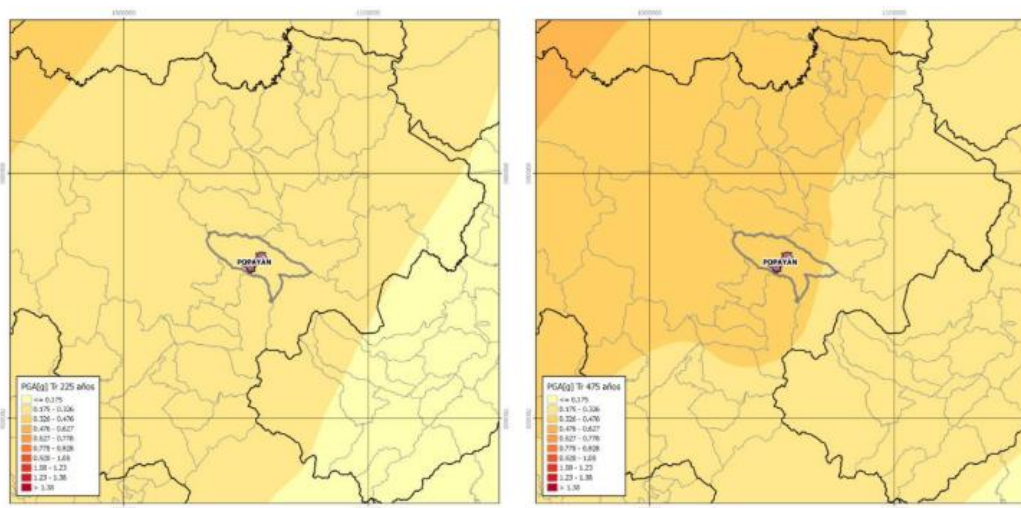


Figura 12. Mapas de amenaza uniforme en $PGA[g]$ para Tr de 225 y 475 años.

Fuente: (Díaz et. al., 2020).

El hecho de que diferentes sitios tengan la misma amenaza sísmica en roca, cuantificado a partir de coeficientes A_a y A_v , no quiere decir que los niveles de riesgo sísmico sean iguales, ya que los efectos de sitio y la vulnerabilidad física de los elementos expuestos permiten que

estos valores difieran, siendo la razón por la cual la filosofía de diseño debe enfocarse hacia la perspectiva del riesgo (Salgado-Gálvez, 2014).

De acuerdo con el IDIGER (2024), el riesgo sísmico son las posibles pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, causadas por un sismo que es una de las manifestaciones propias de la dinámica de la tierra, y que se constituye en la amenaza sísmica al encontrar condiciones de vulnerabilidad de las personas, los bienes o la infraestructura. Por lo tanto, se puede decir que el riesgo sísmico depende tanto de la amenaza como de la vulnerabilidad, y puede expresarse en términos de parámetros como porcentaje de pérdida, porcentaje de daños, valoración total de daños, número de heridos, número de muertos y otras, para cada escenario de amenaza.

Por ejemplo, en la Figura 13 se muestra la medición del riesgo sísmico a partir de un porcentaje de daño, evidenciando como los elementos de una zona con cierta amenaza sísmica pueden verse afectados en menor o mayor medida dependiendo del grado de vulnerabilidad sísmica que tengan, ocasionando distinto nivel de riesgo.

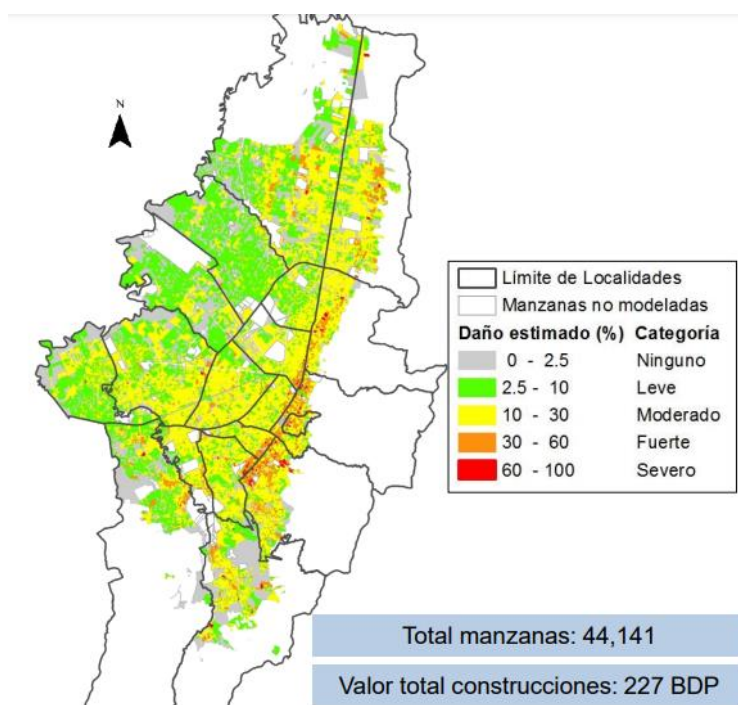


Figura 13. Modelación del riesgo sísmico en edificaciones.

Fuente: (IDIGER, 2024)

Para evaluar el riesgo sísmico la mayoría de los estudios a nivel urbano utilizan como parámetro del sismo, la intensidad macrosísmica, la aceleración máxima, magnitud, distancia epicentral, entre otros, así también se utilizan las matrices de probabilidad o funciones de vulnerabilidad obtenidas a partir de las experiencias con terremotos pasados.

2.4.2. ACELERACIÓN SÍSMICA

Durante un terremoto, el daño en los edificios y las infraestructuras está íntimamente relacionado con la velocidad y la aceleración sísmica, y no con la magnitud del temblor por tanto su estudio es de vital importancia dentro de la ingeniería sísmica. La aceleración sísmica es una medida para determinar las aceleraciones que experimenta el suelo durante un sismo, cuya señal se presenta como en la Figura 14. Aunque no siempre representa de manera precisa la severidad total del evento ni sus posibles consecuencias a las edificaciones por parte del sismo, por simplicidad para las normativas es útil cuantificar la peligrosidad sísmica mediante valores característicos de aceleración en terrenos de referencia (Pérez, 2014).

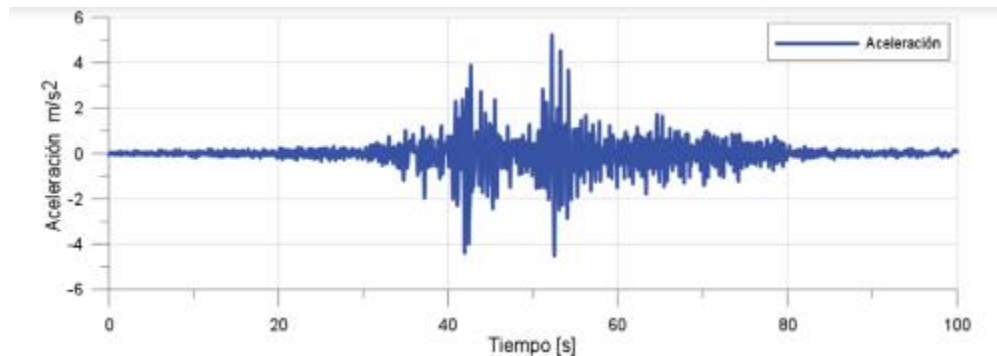


Figura 14. Aceleración de una señal sísmica.

Fuente: (Solans et. al., 2015).

Dentro de este contexto, la aceleración máxima del suelo o PGA (Peak Ground acceleration), es la máxima aceleración registrada en un acelerograma como producto de un sismo en un sitio particular. La PGA es una de las medidas más importantes dentro de la ingeniería sísmica ya que permite estimar la severidad del movimiento del suelo y su impacto en las estructuras, especialmente cuando se combinan con factores de amplificación y otros parámetros derivados de microzonificaciones sísmicas.

2.4.3. PERIODO FUNDAMENTAL DEL SUELO

El período de vibración de un suelo, también conocido como período fundamental, es una medida que describe la duración de un ciclo completo de vibración en respuesta a un terremoto u otra excitación sísmica. El período se expresa en segundos y es un parámetro importante para el análisis sísmico y el diseño de estructuras.

El periodo fundamental del suelo también es un indicador de la rigidez del suelo; por ejemplo, en la Figura 15 los sectores que tienen menor valor de periodo presentan suelos más compactos y rígidos (zona amarilla), en cambio en sectores donde hay mayor valor de periodo, se encuentra depósitos de suelos más blandos y menos rígidos (zona azul).

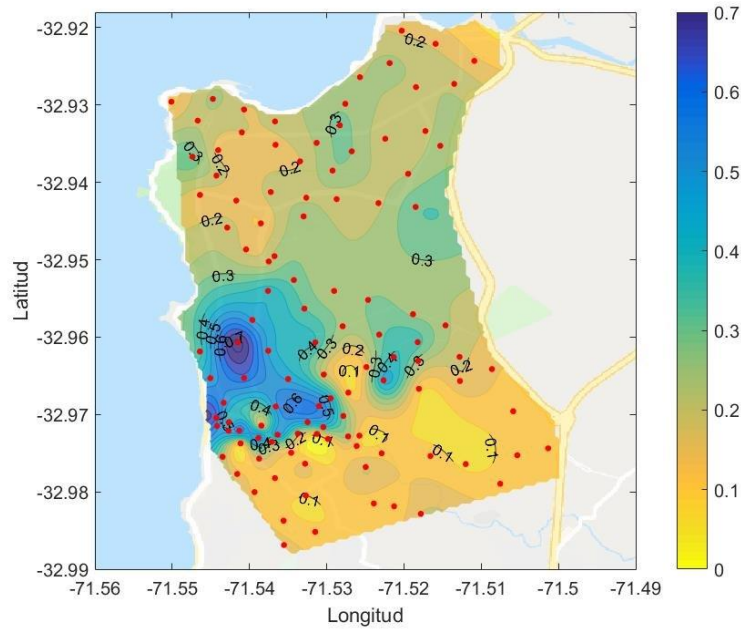


Figura 15. Mapa de periodos fundamentales del suelo (T_g [s]) en una zona de estudio.

Fuente: (Raddatz, 2021).

Por otra parte, el cálculo del período en un suelo puede realizarse mediante varias metodologías, destacándose los siguientes enfoques:

- **Pruebas de Campo y Análisis Geofísicos:** Este enfoque implica el uso de técnicas como los ensayos de refracción sísmica, análisis de ondas superficiales (MASW), o mediciones de microtemores obteniendo propiedades dinámicas del suelo directamente en el campo.
- **Enfoque de Ensayos de Laboratorio:** Son necesarias muestras de suelo extradías en sitio para realizarle pruebas dinámicas, permitiendo evaluar la respuesta del suelo a distintas frecuencias y permiten modelar su comportamiento bajo cargas sísmicas, obteniendo información clave sobre su rigidez y capacidad de amortiguación.

Es importante mencionar que estos métodos proporcionan una estimación del período fundamental del suelo, y pueden ser necesarios ajustes y validaciones adicionales según las condiciones específicas del sitio. Además, el análisis del período del suelo es crucial en la ingeniería sísmica para evaluar el comportamiento de las estructuras en respuesta a eventos sísmicos y para el diseño de cimientos y sistemas estructurales. A continuación, se describen las formas en que el período del suelo puede influir en la vibración de las estructuras:

- **Coincidencia de Periodos:** Cuando el período fundamental del suelo coincide con el período natural de vibración de una estructura, se puede producir un fenómeno conocido como "resonancia". En esta situación, la estructura puede experimentar amplificaciones significativas de las vibraciones sísmicas, lo que podría aumentar el riesgo de daño.

- **Amplificación en Suelos Blandos:** Suelos más blandos tienden a tener períodos fundamentales más largos. En estos suelos, las ondas sísmicas tienden a tener velocidades de propagación más bajas, lo que puede resultar en una mayor amplificación de las aceleraciones sísmicas y afectar la respuesta sísmica de las estructuras construidas sobre ellos.
- **Cambios en la Forma de la Onda Sísmica:** El período del suelo puede influir en la forma en que las ondas sísmicas se propagan y se reflejan en el subsuelo. Esto puede afectar la respuesta dinámica de las estructuras, especialmente en áreas con variaciones en las características del suelo.
- **Variabilidad del Período de la Estructura:** Las estructuras pueden tener varios modos de vibración con diferentes períodos naturales. La interacción entre el período del suelo y los períodos naturales de la estructura puede dar lugar a modos de vibración acoplados y afectar la respuesta global de la estructura.
- **Selección de Cimentación:** El período del suelo influye en la selección de sistemas de cimentación y en la determinación de la capacidad de carga sísmica requerida. En suelos blandos, puede ser necesario considerar cimentaciones más profundas o técnicas especiales para mitigar los efectos de la amplificación sísmica.
- **Influencia en Edificaciones Altas:** En edificaciones altas, el período del suelo puede afectar la interacción entre la estructura y el suelo. Es crucial evaluar cómo estos efectos pueden influir en la seguridad y el desempeño sísmico de edificaciones de gran altura.

2.4.4. RESPUESTA SÍSMICA DEL SUELO: EFECTO DE SITIO

La respuesta sísmica del suelo es la reacción de un terreno cuando es sometido a vibraciones sísmicas, mostrando distintas repuestas dinámicas en amplitud y frecuencia en comparación a las señales captadas en roca. En la Figura 16 se muestra como los cambios en las señales sísmicas generados por la propagación de onda en los distintos estratos de suelo inciden directamente en las solicitaciones y el comportamiento de las edificaciones durante un sismo.

La modificación de la señal sísmica debida a la influencia de las condiciones geológicas y topográficas durante o después de un terremoto, se conoce como efecto de sitio o efecto local. Esta modificación consiste en la amplificación fuerte de la señal, así como una mayor duración de esta y la modificación de su contenido frecuencial. Por ejemplo, el análisis de estos cambios de la intensidad sísmica permitió establecer la evidencia que los terrenos blandos amplifican los efectos de los terremotos, siendo la amplificación del movimiento del suelo la responsable del daño en áreas constituidas por depósitos de gran potencia de sedimentos blandos y poco compactados.

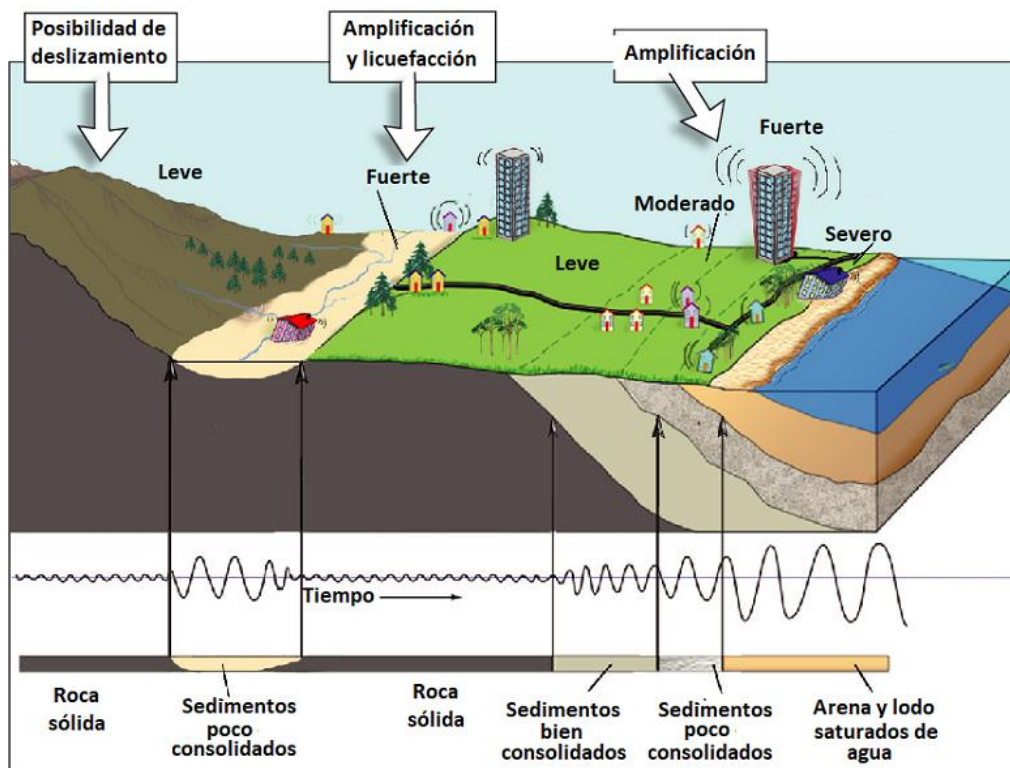


Figura 16. Influencia del tipo de terreno en los efectos de un terremoto.

Fuente: (EarthScope ANGLE, 2018).

La amplificación es típicamente mayor para terremotos de magnitud pequeña en áreas a una cierta distancia epicentral donde se espera que las ondas sísmicas reduzcan la amplitud debido a los efectos de atenuación en la propagación de la señal sísmica por el interior de la tierra. Dos mecanismos contribuyen a los efectos de amplificación de la señal en el suelo: la amplificación geométrica y la amplificación dinámica. La amplificación geométrica corresponde a los efectos de amplificación debidos al contraste de impedancias entre dos medios en contacto, es decir, la resistencia que tienen los suelos para evitar que la señal pase. La amplificación dinámica también se conoce como efecto de resonancia y considera la diferencia entre la frecuencia de las ondas sísmicas y la frecuencia natural del depósito sedimentario.

A causa de esta amplificación, es que la identificación de las frecuencias predominantes del suelo y la cuantificación de la amplificación de la señal sísmica constituyen uno de los principales intereses en ingeniería sísmica. Actualmente, se dispone de un gran número de procedimientos numéricos para estimar la respuesta dinámica del suelo, los cuales consideran en mayor o menor medida el comportamiento no lineal de los suelos, lo que hace más adecuados para análisis detallados (CEDERI, 2006). En la Figura 17 se presenta un esquema de como una señal sísmica en roca se amplifica en superficie cuando se considera la respuesta dinámica del suelo.

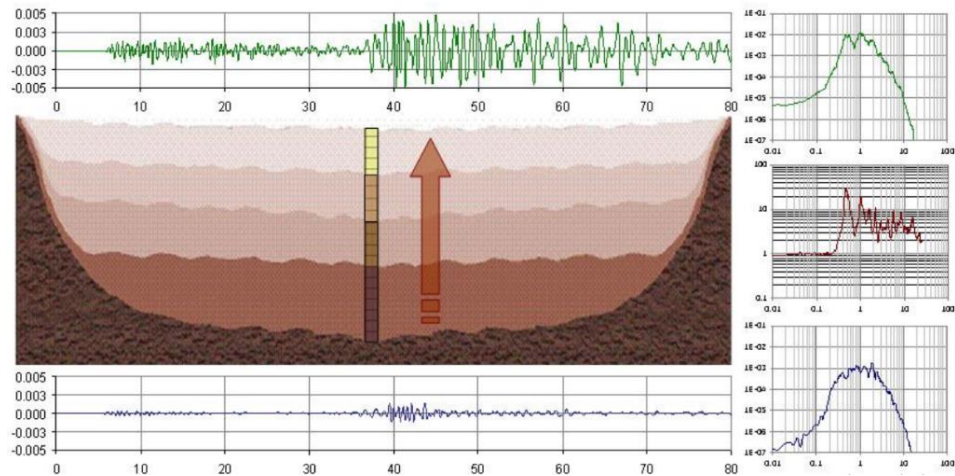


Figura 17. Respuesta dinámica del subsuelo.

Fuente: (Universidad de los Andes, 2012).

Por esta razón es importante identificar los depósitos en los cuales la amplificación es mayor para así diseñar obras civiles seguras especialmente en países con amenaza sísmica alta, como Colombia, es crucial estimar los efectos de amplificación o reducción sísmica generados por los estratos de suelo.

2.5. MICROZONIFICACIÓN

Una microzonificación sísmica consiste en dividir el territorio en zonas más pequeñas, con características similares en cuanto a la respuesta de la estructura de un suelo frente a un sismo, permitiendo identificar áreas vulnerables (Carrillo, 2013) como se muestra en la Figura 18. El proceso de zonificación requiere actualización y análisis de la información sismológica, geológica, geotécnica, geofísica y catastral, implicando la participación de varias disciplinas científicas y técnicas (Hernández, 2006).

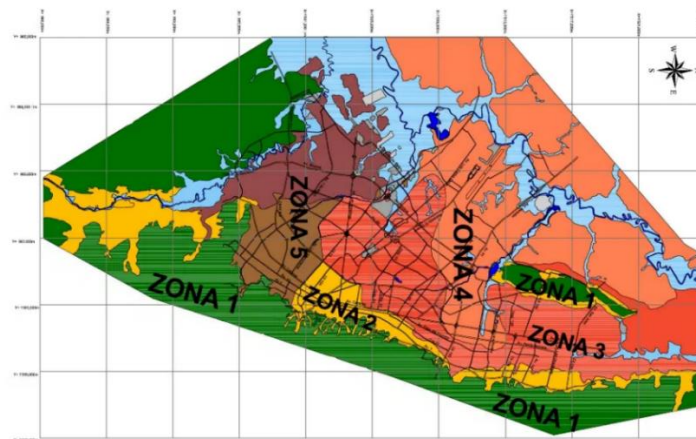


Figura 18. Microzonificación sísmica de Bogotá

Fuente: (INGEOMINAS, 1997)

El objetivo principal es obtener una aproximación del comportamiento dinámico del suelo frente a un evento sísmico, lo cual permite identificar variaciones en las respuestas del terreno en diferentes zonas. Esta información resulta ser esencial para planificar de manera adecuadamente el uso del suelo y diseñar estructuras en áreas vulnerables, contribuyendo así, a los programas de ordenamiento territorial y sirviendo como herramienta clave en la mitigación del riesgo sísmico.

Desde la década de 1960, el concepto de microzonificación sísmica ha sido fundamental en la ingeniería sísmica en ciudades de alta sismicidad como Santiago de Chile y ciudad de México. Su implementación ha sido crucial para reducir el riesgo sísmico permitiendo un diseño más seguro en edificaciones. En Colombia las metodologías proponen obtener factores de amplificación espectral evaluando la respuesta dinámica de los suelos considerando la incertidumbre asociada a cada paso del análisis y a cada variable aleatoria involuntaria del mismo (Prada, 2017).

3. CONSIDERACIONES DE ANÁLISIS SÍSMICO DE LA NSR-10

Para realizar el análisis sísmico de una estructura según la Norma Colombiana, se deben definir los movimientos sísmicos de diseño tomando en cuenta la amenaza sísmica para el lugar expresado a través de los parámetros de aceleración y velocidad pico efectiva A_a y A_v , las características de la estratificación del suelo en el lugar a través de los coeficientes de F_a y F_v y la importancia de la edificación para la recuperación de la comunidad con posterioridad a la ocurrencia de un sismo por medio de un coeficiente de importancia I , los cuales se explican en el presente capítulo.

Las características de los movimientos sísmicos de diseño se expresan por medio de un espectro elástico de diseño, que para el análisis se debe realizar sin dividir los movimientos sísmicos por el coeficiente de capacidad de disipación de energía, R , el cual representa la cantidad de energía que puede disipar una estructura mediante sus deformaciones inelásticas.

Para escoger adecuadamente el método de análisis se debe tener en cuenta el sistema estructural de resistencia sísmica de la edificación, el cual debe clasificarse dentro de uno de los sistemas estructurales prescritos por la Norma: sistema de muros de carga, sistema combinado, sistema de pórtico, o sistema dual. La Norma define limitaciones en el empleo de los sistemas estructurales de resistencia sísmica en función de la zona de amenaza sísmica, del tipo de material estructural empleado (concreto estructural, estructura metálica, mampostería estructural, o madera), de la altura de la edificación, de su grado de irregularidad y de la posibilidad de la estructura de responder adecuadamente ante movimientos sísmicos esperados por medio de su capacidad de disipación de energía, la cual puede ser especial (DES), moderada (DMO) o mínima (DMI) (AIS, 2009).

3.1. COEFICIENTES DE ACELERACIÓN A_a Y A_v

En la NSR-10 es posible estimar la amenaza sísmica en términos de aceleración, por medio de los coeficientes de aceleración pico efectiva (A_a) y la velocidad pico efectiva en la roca (A_v) (Montoya Cañola, 2018). La aceleración pico efectiva se define como el promedio de las aceleraciones espectrales en un rango de periodos y representa el movimiento del suelo en dicho rango, presentando los mayores valores de aceleración espectral (LIS-UCR, 2024). Según la AIS (2010) el parámetro A_a caracteriza los movimientos sísmicos del terreno causados por un sismo relativamente cercano en el rango de períodos de vibración de las edificaciones comprendido entre 0.1 y 0.5 s lo cual corresponde en general a edificaciones entre uno y cinco pisos de altura.

El parámetro A_v caracteriza los movimientos sísmicos de sismos fuertes ocurridos a distancia moderadas a través de períodos de vibración de aproximadamente 1 s, lo cual corresponde a edificaciones de 10 pisos o más y fue calculado tomando el valor de la aceleración para un período de vibración igual a 1s y dividiendo ese valor por la constante de 1.2

Estos coeficientes se calcularon gracias al “*Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia*” (2009) en el cual se definió el mapa de aceleraciones A_a y A_v . Este estudio, es una actualización del informe realizado en octubre de 1996, donde se definió una descripción

matemática de la tectónica que permitiera hacer la asignación de los eventos sísmicos a cada uno de los accidentes tectónicos. Dentro de esta etapa, se digitalizó el mapa de Colombia y su tectónica con el fin de determinar las características estadísticas de cada uno de estos grupos a través de regresiones. La anterior información fue actualizada para la expedición de la NSR-10 con un catálogo de 33100 eventos de hasta una magnitud Richter cercanas a 9 (Aranguren Sedano, 2011).

Utilizando un modelo probabilístico de línea fuente en el estudio se determinaron curvas de máxima aceleración horizontal esperada contra período de retorno en años, para diferentes niveles de incertidumbre en puntos seleccionados del territorio nacional y en las principales ciudades del país. Se realizaron estudios de sensibilidad a diferentes parámetros, utilizando los valores obtenidos en las ciudades capitales de departamento. Con estos estudios de sensibilidad fue posible definir los parámetros a utilizar en aquellos casos en que existían varias alternativas, y al mismo tiempo calibrar las diferencias, en términos de amenaza sísmica. Con los valores definidos en el paso anterior se obtuvieron las curvas de igual aceleración máxima esperada para todo el territorio nacional (Aranguren Sedano, 2011).

A partir del estudio mencionado, se determinaron valores para la NSR-10 como el coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva para diseño Aa, el coeficiente de la velocidad horizontal pico efectiva para diseño Av, el coeficiente de la aceleración horizontal pico efectiva reducida para diseño con seguridad limitada Ae y el coeficiente que representa la aceleración pico efectiva para el umbral de daño Ad. Los anteriores parámetros permiten construir los espectros de diseño, seguridad limitada y umbral de daño respectivamente. Adicionalmente, los resultados descritos permitieron elaborar los mapas de amenaza sísmica de la NSR-10 y los valores de aceleración definidos sirven como datos de entrada para estudios de microzonificación sísmica o estudios de sitio que requieran determinados proyectos (Salgado et al., 2010).

En este orden de ideas, en la Figura 19 se muestra la metodología para definir los valores de Aa y Av, para ello, se requiere de la evaluación de la amenaza sísmica caracterizando cada una de las fuentes sísmicas, asignando los eventos sísmicos (profundos, superficiales), parametrizando las fuentes por medio del método de máxima verosimilitud y generando relaciones de atenuación para diferente magnitud (AIS, 2009).

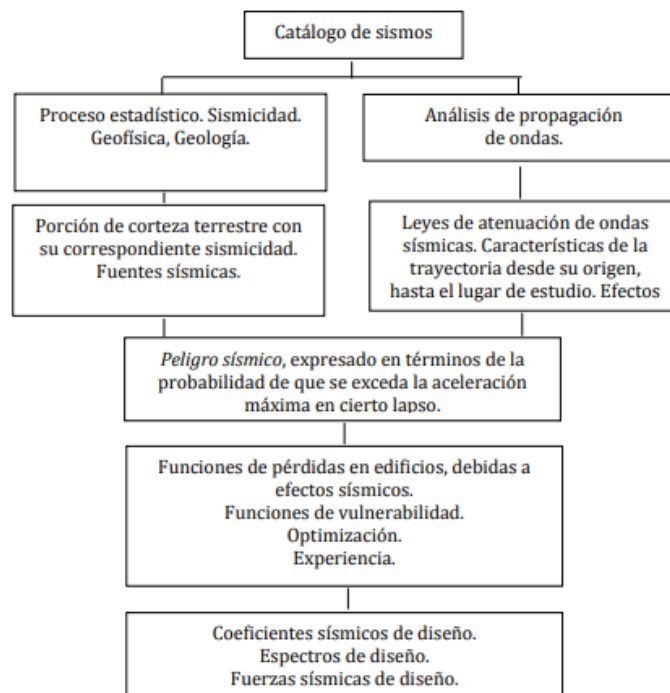


Figura 19. Diagrama para obtener las fuerzas sísmicas requeridas en el diseño de edificios.

Fuente: (AIS,2009).

La Norma utiliza el programa CRISIS 2007 V7.2 el cual ha sido ampliamente aceptado a nivel mundial como una de las herramientas más idóneas para la evaluación de la amenaza sísmica. El modelo de sismicidad incorporado en el programa y que se usó para estos trabajos es el de Gutenberg-Richter modificado. El programa permite la evaluación de la amenaza sísmica en términos de diferentes periodos de retorno, así como de diferentes periodos estructurales. Y requiere de los siguientes datos:

- Se definan las zonas de fuertes sísmicas
- Se fijan las relaciones de recurrencia de la magnitud de cada fuente sísmica
- Se proporcionen las leyes de atenuación de las ondas sísmicas
- Se precise la región en estudio mediante una malla de puntos

Como resultado del cálculo de la amenaza sísmica se presentan para cada ciudad capital de departamento los valores de aceleración máxima probable.

De acuerdo con este modelo de amenaza sísmico establecido por la NSR-10, Colombia está dividido en tres zonas de amenaza sísmica como se muestra en la Figura 20, las cuales buscan asignar parámetros sísmicos a determinadas regiones a partir de la evaluación de probabilidad de excedencia del 10% en 50 años dentro de un periodo de retorno promedio de 475 años. Esta zonificación se divide cualitativa y cuantitativamente de la siguiente forma:

- Zona de amenaza sísmica baja: Lugares donde tanto A_a como A_v son menores o iguales a 0.10

- Zona de amenaza sísmica intermedia: Lugares donde A_a y/o A_v son mayores que 0.10 y ninguno excede 0.20
- Zona de amenaza sísmica alta: Lugares donde A_a y/o A_v son mayores que 0.20

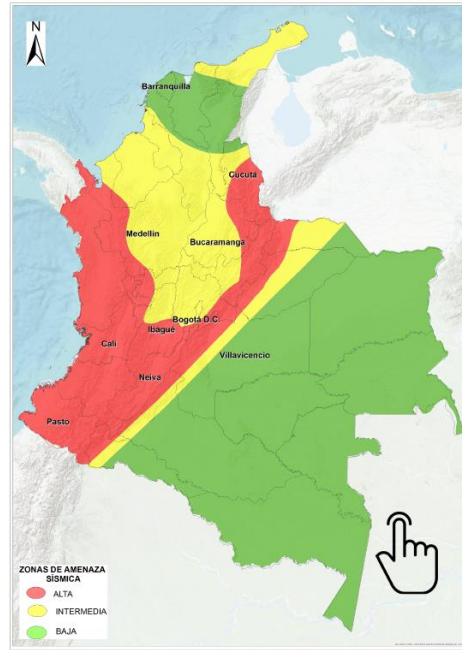


Figura 20. Zonas de Amenaza sísmica de Colombia.

Fuente: (AIS, 2010).

3.2. COEFICIENTES DE EFECTOS DE SITIO F_a Y F_v

Basándose en los registros de terremotos del pasado y en el análisis de la respuesta del suelo expuesto en la Sección 2.4.4, se sabe que los suelos producen una amplificación del sismo como se observa en la Figura 21, especialmente, en suelos sedimentarios gruesos (Pawirodikromo, 2019). Por ello, Errazuriz (2012) declara que para encontrar la respuesta de una estructura frente a un evento sísmico que sea la más fiel a la realidad es necesario conocer primero el posible comportamiento del suelo frente a estos eventos, ya que el nivel de demanda sísmica al que se enfrentan las estructuras depende de la variabilidad de los depósitos del suelo. Este comportamiento del suelo, conocido como efecto de sitio, se puede determinar por medio de los coeficientes amplificación del suelo que son capaces de amplificar las ondas sísmicas que impactan la estructura, y para el caso colombiano, corresponde a F_a y F_v .

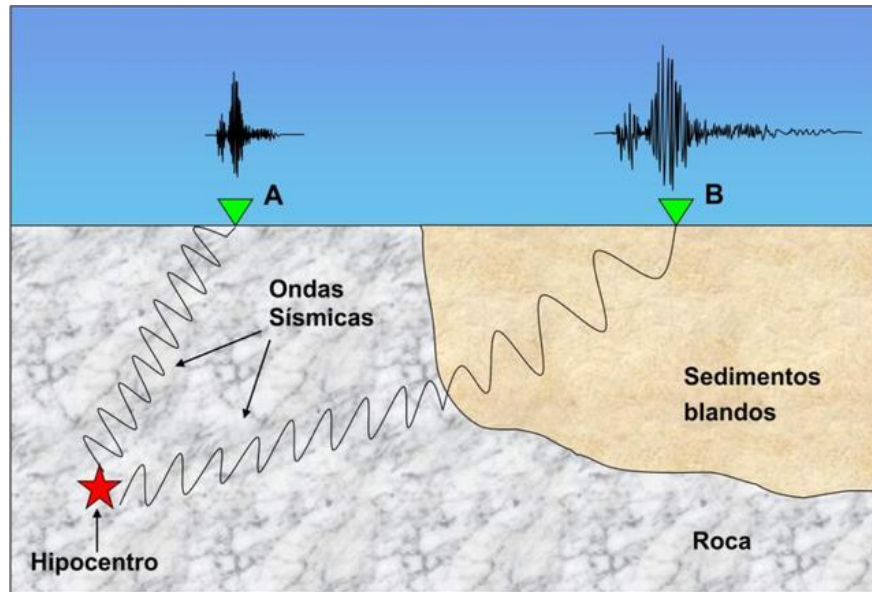


Figura 21. Amplificación de ondas sísmicas por efecto de sitio.

Fuente: (Skyalert, 2024).

La NSR-10 cuenta con factores de amplificación por efecto de sitio F_a y F_v que afectan la aceleración y la velocidad en la zona que depende de la aceleración en roca (A_a y A_v) y de las características intrínsecas del suelo presente en la obra. F_a , es el coeficiente que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos ($T < 1s$) asociado a la aceleración y F_v es el coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios ($T = 1s$) asociado a la velocidad (Aranguren Sedano, 2011).

Existen varios conceptos o enfoques para determinar el coeficiente de sitio, según Pawirodikromo (2019) el coeficiente está influido por el espesor de los suelos sedimentarios y se definen como la relación entre la aceleración espectral en el suelo y la roca de referencia en el mismo periodo. La NSR-10 pese a proponer valores de F_a y F_v para todo el territorio en diferentes condiciones de suelo, con una metodología suficientemente válida, expresa que para poblaciones de más de 100 mil habitantes es necesario reformular estos coeficientes por medio de las metodologías que ofrecen los estudios de microzonificación sísmica (AIS, 2010), ya que estos últimos ofrecen condiciones más específicas y fieles a las características reales.

3.3. COEFICIENTE DE IMPORTANCIA I

El coeficiente de importancia adoptado por la NSR-10 se muestra en la Figura 22 y está relacionado con el tipo de uso de una edificación, amplificando el espectro y por ende las fuerzas de diseño de acuerdo con la importancia que tiene una estructura, la cual se elige en función de dos aspectos: el número de víctimas potenciales en caso de colapso de la estructura, y la relevancia de la edificación durante y después del evento sísmico (Piscal Arévalo & López Almansa, 2018).

- Grupo IV – Edificaciones indispensables
- Grupo III — Edificaciones de atención a la comunidad
- Grupo II — Estructuras de ocupación especial
- Grupo I — Estructuras de ocupación normal

Grupo de Uso	Coefficiente de Importancia, I
IV	1.50
III	1.25
II	1.10
I	1.00

Figura 22. Coeficiente de importancia según el grupo de uso de la NSR-10. Tabla A.2.5-1.

Fuente: (AIS, 2010).

3.4. ESPECTROS DE RESPUESTA

El espectro de respuesta, según Chopra (2014), ofrece una manera conveniente de resumir la respuesta máxima de todos los posibles sistemas lineales de 1 grado de libertad (1GDL) a un componente específico del movimiento del suelo. Es una gráfica que representa el valor máximo de una respuesta, como la aceleración, en función del periodo de vibración natural del sistema sirviendo como una herramienta práctica para aplicar el conocimiento de la dinámica estructural en el diseño de estructuras y en la elaboración de requisitos de fuerza lateral en códigos de construcción.

Existen diferentes tipos de espectros de respuesta: el de deformación, el de pseudovelocidad y el de pseudoaceleración como se muestra en la Figura 23. El espectro de deformación contiene toda la información necesaria para calcular las deformaciones máximas y las fuerzas internas. Sin embargo, también se incluyen los espectros de pseudovelocidad y pseudoaceleración, ya que son útiles para analizar las características de los espectros de respuesta. El prefijo pseudo se emplea para indicar la falta de exactitud de los espectros, por tanto, un pseudoespectro de respuesta es aquel en el que se dan la pseudoaceleración o pseudovelocidad espectral en lugar del valor real de la aceleración o la velocidad respectivamente.

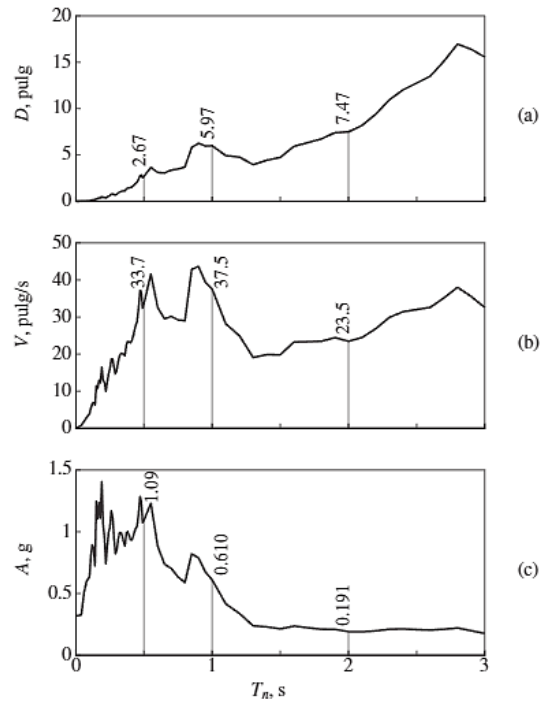


Figura 23. Espectros de respuesta para el movimiento de terreno: (a) espectro de respuesta de deformación; (b) espectro de respuesta de pseudovelocidad; (c) espectro de respuesta de pseudoaceleración.

Fuente: (Chopra, 2014).

Por medio de los espectros sísmicos, se puede determinar cómo se comporta el suelo debajo de una estructura ante sismos de diferentes magnitudes, lo cual permite conocer si las estructuras cumplen con los requisitos nacionales de desempeño. Para construirlos se requiere definir parámetros como la aceleración del suelo, el periodo de vibración natural y la fracción de amortiguamiento de un sistema, calcular la respuesta de deformación, determinar el valor máximo de deformación y calcular las ordenadas espectrales correspondientes (Chopra, 2014).

Por su parte, la NSR-10 también considera estos tres espectros de diseño, pero en este trabajo se hizo uso únicamente del espectro elástico de aceleraciones S_a , presentado en la Figura 24, y expresado como fracción de la gravedad para un coeficiente de cinco por ciento (5%) de amortiguamiento crítico.

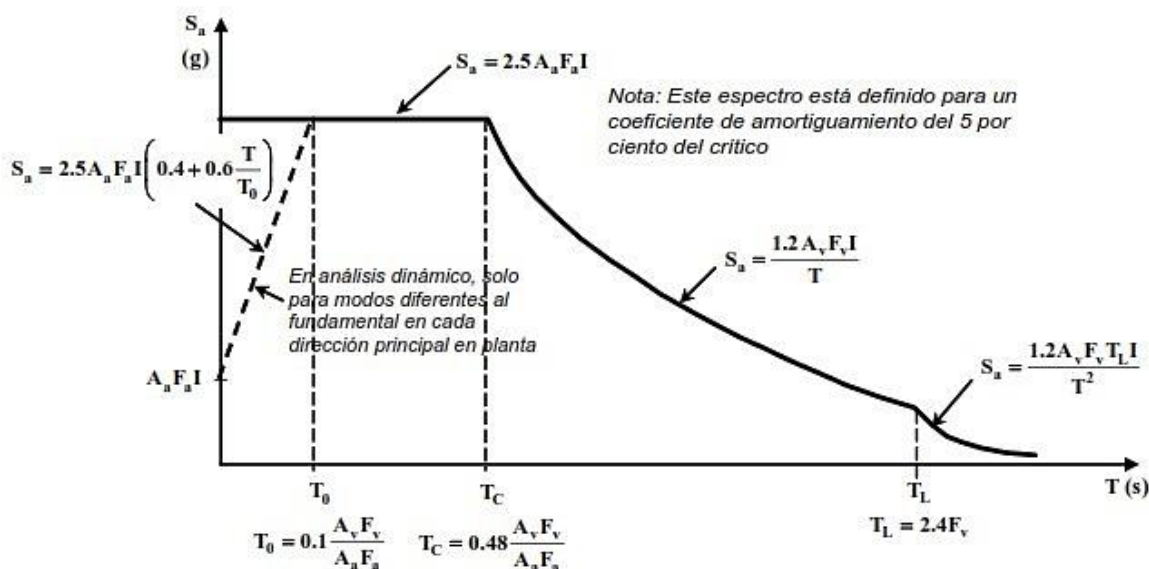


Figura 24. Espectro de diseño de la NSR-10

Fuente: (AIS, 2010)

3.5. PARAMETROS DE DISEÑO PARA POPAYAN SEGÚN LA NSR-10

Para el diseño estructural en la ciudad de Popayán actualmente se utilizan los coeficientes de aceleración y amplificación por efecto de sitio que la NSR-10 propone. Para iniciar la aceleración pico efectiva (A_a) y velocidad pico efectiva (A_v) se determinan mediante las regiones asignadas por la NSR-10. Popayán se encuentra en la región 5 y 4 respectivamente con valores de 0.25 y de 0.20 para toda la ciudad.

En el caso de los factores de efecto de sitio, la Norma también incluye el estimativo de la respuesta de los suelos ante sismos basado en una simplificación de los tipos de suelo en 6 clases principales, A, B, C, D, E y F. Dicha clasificación se debe a que la Norma generaliza la diversidad de comportamientos de los suelos, con el propósito de establecer una categorización que se pueda para Colombia. Esta clasificación se realiza de acuerdo con sus propiedades geotécnicas, específicamente con base en parámetros como la velocidad de onda de corte en roca (V_S) y el número medio de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT), entre otros, tal como se observa en la Figura 25.

Por su parte, la velocidad de onda de corte es un parámetro geotécnico clave para evaluar la rigidez de los suelos de manera precisa y no invasiva midiendo la velocidad a la cual las ondas de corte (S) se propagan a través del suelo o la roca; y el número de golpes del SPT es el número de golpes necesarios para hincar una barra metálica en el suelo por medio del cual se determina la resistencia a la penetración de los suelos y por medio de correlaciones es posible estimar la resistencia a la compresión simple.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{V}_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 360 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2)$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 180 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$180 \text{ m/s} > \bar{V}_s$
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $50 \text{ kPa} (\approx 0.50 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75) F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

Figura 25. Caracterización de los perfiles de suelo según la NSR-10.

Fuente: (AIS, 2010).

Es necesario entonces conocer el perfil de suelo donde se planea el diseño, ya que según esto se pueden definir los factores de amplificación por efecto de sitio tanto para periodos cortos como intermedios del espectro (F_a y F_v). En Popayán, según la clasificación de la NSR-10 existe la presencia de suelos tipo C, D y E, de tal forma que en la ciudad se diseña con los factores que se muestran en la Figura 26.

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.

a)

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.

b)

Figura 26. Valores de los coeficientes de amplificación de la NSR-10, a) F_a . b) F_v .

Fuente: (AIS, 2010).

Con estos valores de A_a , A_v , F_a , F_v y de acuerdo con la importancia de la estructura y su periodo natural es posible hacer uso del espectro de diseño de la NSR-10 que se presentó en la Figura 24.

3.6. ANÁLISIS SÍSMICO - MÉTODO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE

En el contexto del análisis sísmico, se emplean dos métodos para calcular las fuerzas laterales: el método estático y el dinámico. La Norma NSR-10 contempla ambos enfoques como válidos para el diseño estructural, con la distinción de que el método estático sigue una metodología específica, utilizando el método de fuerza horizontal equivalente (FHE). La Norma detalla el procedimiento que se debe seguir y los resultados que se deben obtener mediante este método, que incluyen:

- Los desplazamientos horizontales de la estructura, considerando los efectos torsionales.
- La distribución del cortante de piso, también considerando los efectos torsionales, en todos los elementos verticales del sistema de resistencia sísmica.
- Los efectos de las fuerzas sísmicas en la cimentación de la edificación.
- Las fuerzas internas (momentos flectores, fuerzas cortantes, fuerzas axiales y momentos de torsión) correspondientes a cada elemento que forma parte del sistema de resistencia sísmica.

En la Figura 27 se presenta un esquema metodológico de la forma como se desarrolla el método FHE para encontrar las fuerzas sísmicas de piso.

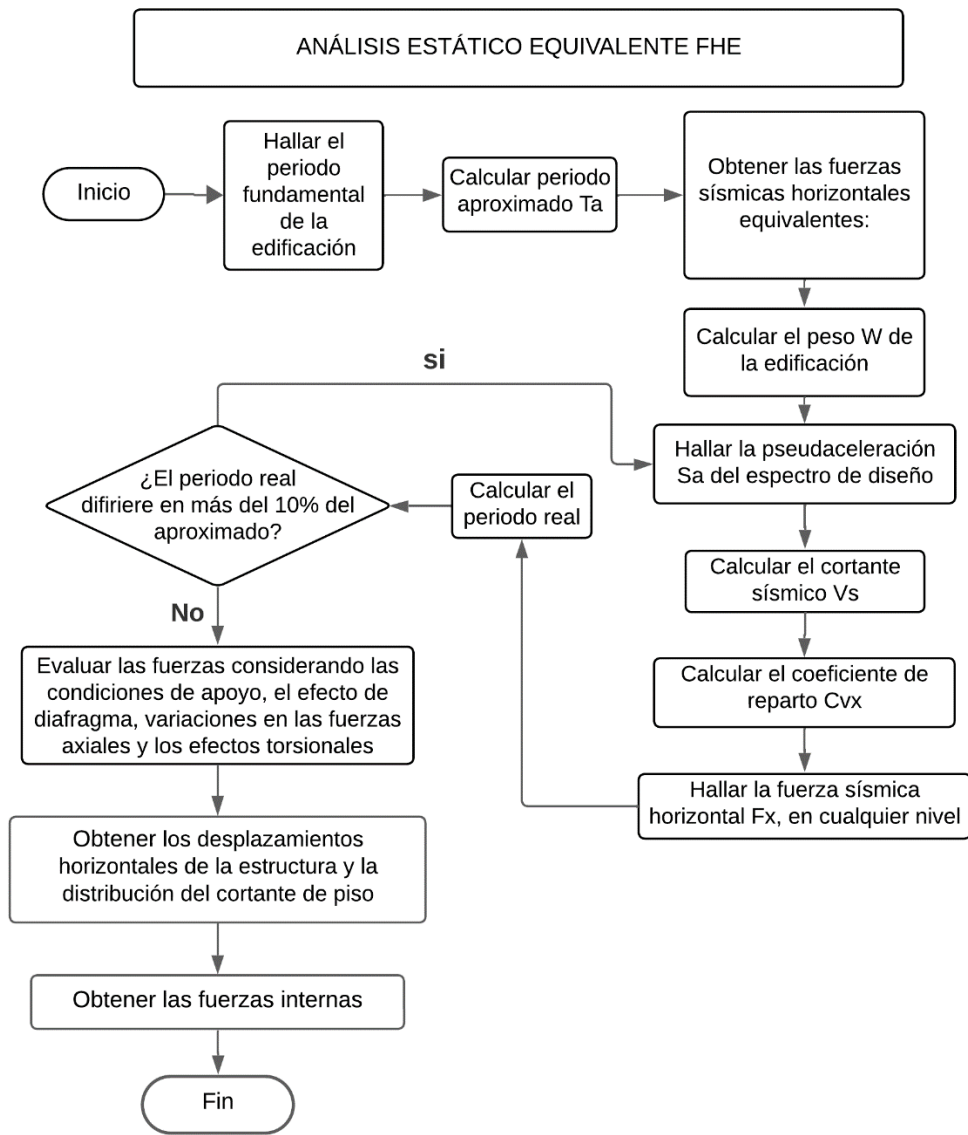


Figura 27. Diagrama de flujo del procedimiento del método de fuerza horizontal equivalente (FHE).

Fuente: Elaborado por los autores.

El método de FHE se puede aplicar con las siguientes restricciones: En zonas sísmicas (ZS) medias, solo se permite su aplicación en construcciones del grupo 1. Para todas las zonas sísmicas, las estructuras regulares adecuadas para este método son aquellas con 20 niveles o menos y una altura inferior a 60 metros, excluyendo edificaciones en suelo tipo D, E o F con períodos mayores a $2T_c$. En edificaciones irregulares, el método se puede aplicar en estructuras con un máximo de 6 niveles o 18 metros de altura, y en aquellas estructuras flexibles apoyadas sobre estructuras más rígidas.

El modelo matemático aplicado al FHE, se basa en un modelo lineal estático que considera: la rigidez de la estructura, la cual debe ser consistente con los niveles de deformación al que puedan ser sometidos por los movimiento sísmicos de diseño; los efectos de los apoyos, es

decir, los movimientos de rotación y traslación que tiene cada eje y que determina como se transfieren las fuerzas dentro de la estructura hasta llegar al suelo; las variaciones de fuerzas axiales, las cuales pueden reducir la capacidad de soportar cargas si no se distribuyen uniformemente o si se convierten en fuerzas excéntricas para los elementos; efectos torsionales, los cuales ocasionan fuerzas y desplazamientos adicionales en algunos elementos de resistencia lateral provenientes de la incertidumbre en la localización de las masas dentro del piso o de la excentricidad entre el centro de masas y el centro de rigidez; efectos ortogonales, analizados en las dos direcciones principales de la estructura y combinados para obtener la mayor respuesta bidireccional.

En específico, para concreto reforzado se tiene en cuenta el grado de fisuración, las cuales son fisuras que se presentan en los elementos estructurales producidas cuando se sobrepasa la capacidad resistente a tensión o flexión o ante cambios de temperatura; y la capacidad de disipación de energía, R , la cual representa la cantidad de energía que puede disipar una estructura mediante sus deformaciones inelásticas, de forma que puede reducir las fuerzas sísmica para el diseño de una estructura y depende del tipo de material estructural y de las características del sistema de resistencia sísmica.

4. COMPARACIÓN DE LAS MICROZONIFICACIONES SÍSMICAS EN POPAYÁN

Para encontrar la respuesta de una estructura frente a un evento sísmico que sea la más fiel a la realidad es necesario conocer primero el posible comportamiento del suelo frente a estos eventos, ya que el nivel de demanda sísmica al que se enfrentan las estructuras depende, en parte, de la variabilidad de los depósitos del suelo (Errazuriz, 2012). Este comportamiento, conocido como efecto de sitio hace referencia a las modificaciones que el suelo introduce a la propagación de ondas sísmicas, este fenómeno, explicado en detalle en la sección 2.4.4., donde se mencionan los factores que condicionan el fenómeno, para su cuantificación se emplean los coeficientes de amplificación sísmica, en la normativa colombiana corresponden a F_a y F_v .

La NSR-10 establece factores F_a y F_v en función de la aceleración en roca (A_a y A_v) y del tipo de suelo en la obra. Aunque esta metodología es válida a nivel nacional, la Norma menciona que ciudades de más de 100 mil habitantes deben contar con estudios de microzonificación (AIS, 2010). Esto resalta la necesidad de análisis específicos que reflejen con mayor precisión las características dinámicas del suelo, complementando los parámetros generales de la Norma.

Si bien, las características detalladas del suelo difícilmente podrían ser exigibles a cada obra por un código de diseño, existen metodologías de microzonificación que pueden dar información más completa sobre las características dinámicas de los sitios en una ciudad, viendo la ciudad integralmente en su marco geológico (Errazuriz, 2012). Tal es el caso de los estudios de microzonificación realizados para la ciudad de Popayán.

Con el fin de contrastar los valores de F_a y F_v propuestos tanto por la Norma como por los estudios de microzonificación, en este capítulo se estudiaron estos tres informes destacando la información y características relevantes para esta investigación.

De acuerdo con lo anterior, se analizaron las microzonificaciones existentes para Popayán con el fin de determinar cual ofrece un mayor acercamiento a las condiciones sísmicas locales de acuerdo con las metodologías y datos que cada una de ellas tiene. Las microzonificaciones existentes se presentan a continuación:

- **Microzonificación sismogeotécnica de Popayán (1991):** Realizada por la CEE e INGEOMINAS. Este informe describe las características físicas, geofísicas y sismológicas de las principales fallas activas y determinar su influencia en la microzonificación de Popayán. A partir de esto, se determina nuevos factores de A_a y A_v para diferentes zonas de la ciudad.
- **Microzonificación sísmica de Popayán (2012):** Realizada por la Universidad de los Andes (UAN). A través de un estudio regional de amenaza se dimensiona la amenaza, y se evalúa la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a nivel urbano. Los mapas de riesgo representan escenarios, o la distribución espacial de los potenciales efectos que se

puedan presentar en la zona estudiada, de acuerdo con el grado de vulnerabilidad de los diferentes elementos.

- **Zonificación de respuesta sísmica de Popayán (2020):** Realizada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC). Se centra en realizar la actualización y armonización de la microzonificación sísmica para el municipio, describiendo el ambiente geológico, tectónico y sismológico de la región con fines de identificar y seleccionar los eventos que contribuyen con la amenaza sísmica del municipio, identificando en cada zona las funciones de amplificación para varios niveles de aceleración (periodos de retorno) y con ello elaborar espectros de diseño normativos para edificaciones, a partir de la modificación de los coeficientes F_a y F_v .

El estudio de 1991 se considera que ha perdido vigencia por el paso de los años, ya que el área de estudio no es siquiera la totalidad de la zona urbana construida, dejando por fuera una gran parte de la ciudad, además la Universidad de los Andes (2012) declaró que es necesario actualizar estos estudios y armonizarlos con estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico.

De esta forma se compararon únicamente las microzonificaciones del 2012 y 2020. Los parámetros que se revisaron y analizaron fueron metodología, eventos sísmicos, caracterización geotécnica, modelo de exposición catastral y tipologías estructurales presentes. La comparación completa se encuentra en el Anexo 1 y a continuación se presenta un consolidado de dicha información:

4.1. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Tradicionalmente, para establecer un mapa de microzonificación sísmica de una ciudad, se ha recurrido a definir una serie de zonas homogéneas en las cuales la respuesta sísmica se pueda describir mediante unos parámetros constantes. Sin embargo, la definición de estas zonas homogéneas normalmente es una labor difícil ya que involucra la información geológica, de elevación digital, geotécnica y las propiedades dinámicas asignadas cada uno de los perfiles de suelo y a los depósitos característicos (Universidad de los Andes, 2012).

Por esta razón el estudio de MS de la Universidad de los Andes (UAN) optó por una metodología diferente de isolíneas, las cuales son líneas que conectan los puntos en que los factores F_a y F_v tiene un mismo valor. La metodología que ellos siguieron consistió en construir un modelo tridimensional de la geología de la zona de estudio para obtener la respuesta de dinámica del suelo, asignar unas zonas de influencia a cada uno de los sondeos en que se dispone de información, particularmente del perfil de velocidad de onda, y caracterizar cada una de las formaciones geológicas principales con un comportamiento dinámico esperado de acuerdo con la información de ensayos dinámicos de laboratorio disponibles o con base en el comportamiento establecido para formaciones típicas.

Entre los resultados de este estudio se enfatizó en los mapas de variación de forma espectral F_a y F_v de diseño para la ciudad de Popayán, los cuales se presentan en las Figuras 28 y 29:

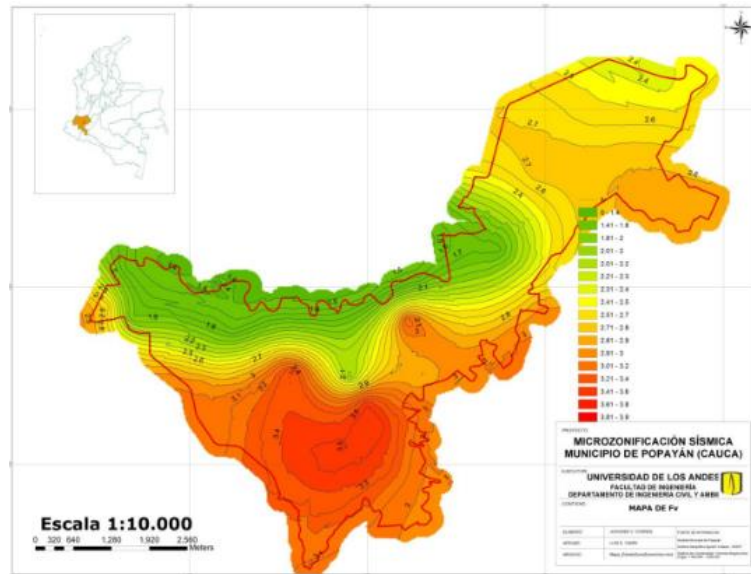


Figura 28. Mapa de variación de F_v de diseño para la ciudad de Popayán según el estudio de la UAN.

Fuente: (Universidad de los Andes. 2012).

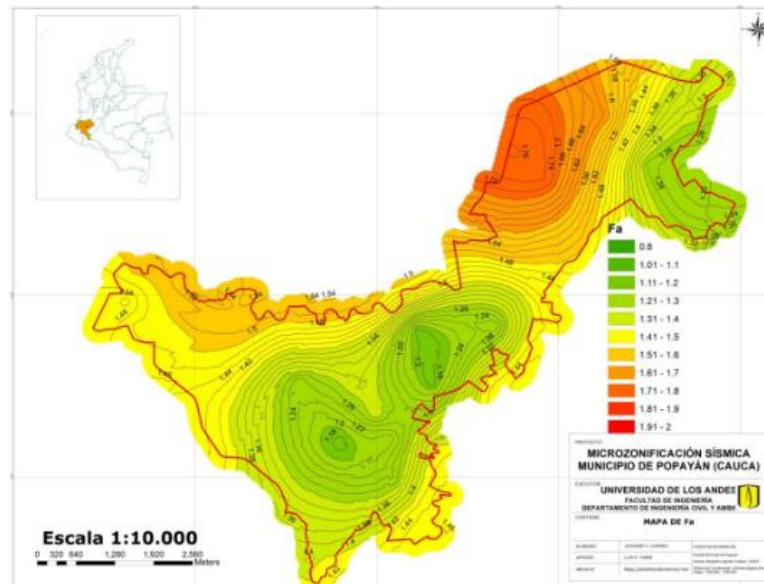


Figura 29. Mapa de variación de F_a de diseño para la ciudad de Popayán según el estudio de la UAN.

Fuente: (Universidad de los Andes. 2012).

Respecto a la caracterización geotécnica cabe destacar el ensayo de velocidad de onda de corte por ser uno de los parámetros más importantes para estimar el comportamiento del suelo frente a sismos. En la Figura 30 se presentan la ubicación de los puntos donde se realizaron los ensayos de velocidad de onda de corte V_s y en la Figura 31 sus respectivos valores.

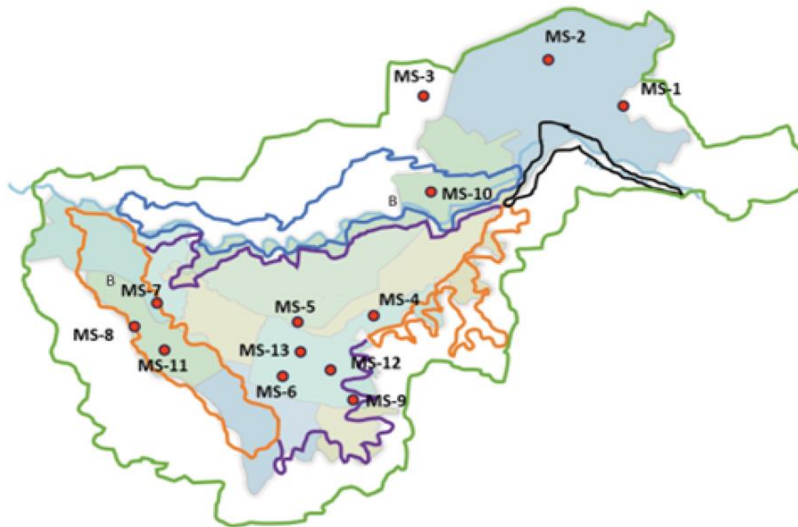


Figura 30. Ubicación de los puntos de sondeo de la MS del UAN.

Fuente: Mapa de Popayán modificado de (CafetoMH, 2023)

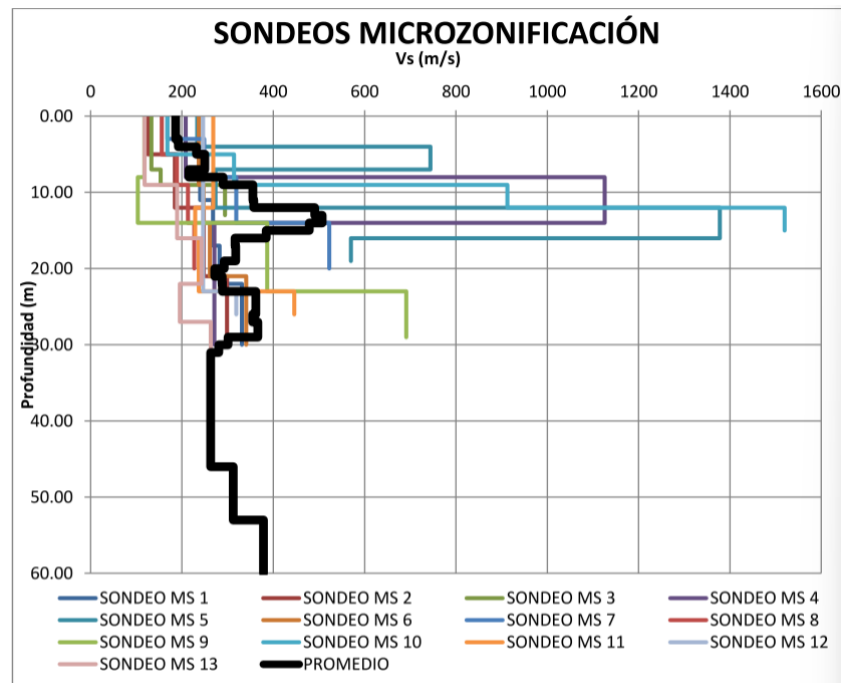


Figura 31. Resultados de velocidad de onda de corte de los ensayos realizados por la UAN.

Fuente: (Universidad de los Andes, 2012).

4.2. SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Por otro lado, el SGC definió cuatro pilares de trabajo para desarrollar su metodología: Amenaza sísmica, monitoreo sísmico, caracterización del subsuelo y respuesta sísmica local. Bajo estos pilares se determinó la amenaza sísmica en superficie y las zonas de respuesta sísmica homogénea. Con lo anterior, se lograron establecer los factores de amplificación y los espectros de diseño para cada una de las zonas en concordancia con la NSR-10.

Contrario al estudio de la UAN, la metodología planteada por el SGC estableció zonas de comportamiento sísmico homogéneo, ya que tiene la suficiente información geológica y geotécnica para hacerlo. Para definir estas zonas el SGC (2020) se tuvo en cuenta las variables que influyen en el comportamiento del suelo como tipo de suelo, rigidez, amortiguamiento, espesores y periodos de vibración. Como resultado final de los análisis geoestadísticos y heurísticos de la información geológica, geotécnica y geofísica, se definieron seis zonas de repuesta sísmica homogénea (ZRS) que se resumen en la Figura 32.

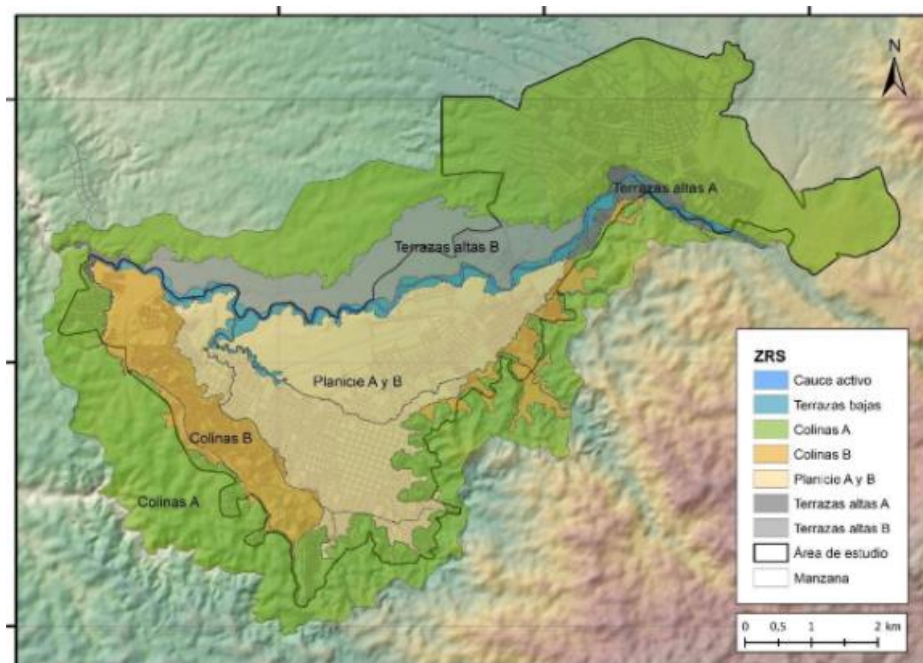


Figura 32. Mapa de zonas de respuesta sísmica homogénea de Popayán según el SGC.

Fuente: (Díaz et al., 2020).

Los valores de F_a y F_v , en concordancia con el espectro de diseño de la NSR-10 depende de la aceleración y velocidad en roca A_a y A_v y teniendo en cuenta que los valores para Popayán son 0.25 para A_a y 0.2 para A_v , los coeficientes de amplificación según la UAN para la ciudad se presentan en la Tabla 5:

Tabla 5. Factores de amplificación para las zonas de respuesta sísmica de Popayán.

Puntos de análisis del suelo	Fa	Fv
Terrazas A	1.39	1.5
Colinas A	1.58	2.37
Colinas B	1.55	2.47
Terrazas B	1.31	2.32
Planicie A	1.2	2.74
Planicie B	1.25	3.22

Fuente: (Díaz et. al., 2020).

Como resumen del estudio geotécnico se tiene los siguientes perfiles geotécnicos típicos de cada una de las zonas:

COLINAS A						COLINAS B							
USCS	Material	Espesor m		Vs m/s		Y kN/m³	USCS	Material	Espesor m		Vs m/s		Y kN/m³
		min	max	min	max				min	max	min	max	
MH	Limo arenoso amarillo	-	38	147	258	17,3	MH	Limo arenoso amarillo	-	38	210	263	17,3
ML	Limo arcilloso rojizo	0	12	130	249	16,7	MH	Limo arcilloso gris	0	4	264	340	18,0
ML o SM	Toba / Ignimbrita meteorizada	0	30	250	360	17,8	ML	Limo arcilloso rojizo	0	12	125	265	16,7
	Ignimbrita	0	11	350	490	19,6	ML	Limo arenoso café	2	18	250	390	18,9
	Aglomerado sedimentario	2	32	560	760	20,0	ML o SM	Toba / Ignimbrita meteorizada	14	46	290	400	19,1
	Arenita / Limolita	0	60	760	-	21,1		Ignimbrita gris	0	39	350	450	20,0
	Esquisto / Cuarzita	-	-	800	-	22,5		Aglomerado sedimentario	12	-	430	-	21,0
								Arenita / Limolita	-	-	760	-	21,1
								Esquisto / Cuarzita	-	-	800	-	22,5

PLANICIE A						PLANICIE B							
USCS	Material	Espesor m		Vs m/s		Y kN/m³	USCS	Material	Espesor m		Vs m/s		Y kN/m³
		min	max	min	max				min	max	min	max	
MH	Limo arcilloso gris / amarillo	1	4	117	300	15,4	MH	Limo arcilloso gris / amarillo	1	23	117	300	15,4
GP	Arena, Gravas, bolos	10	19	220	367	19,8	ML	Limo arenoso café	0	18	117	204	14,2
ML	Limo arenoso café	0	18	117	204	14,2	SM	Arena limosa	0	6	269	340	18,1
SM	Arena limosa	0	6	269	340	18,1	PT	Turba	0	7	-	244	13,6
PT	Turba	0	7	-	244	13,6	MH	Limo arenoso	0	36	256	398	18,7
MH	Limo arenoso	0	36	256	398	18,7	ML o SM	Toba / Ignimbrita meteorizada	0	130	340	490	19,1
ML o SM	Toba / Ignimbrita meteorizada	0	130	340	490	19,1		Ignimbrita	0	105	400	530	20,0
	Ignimbrita	0	105	400	530	20,0		Aglomerado sedimentario	9	42	430	-	21,6
	Aglomerado sedimentario	9	42	430	-	21,6		Arenita / Limolita	-	-	760	-	21,1
	Arenita / Limolita	-	-	760	-	21,1		Esquisto / Cuarzita	-	-	800	-	22,5
	Esquisto / Cuarzita	-	-	800	-	22,5							

TERRAZAS ALTAS A						TERRAZAS ALTAS B							
USCS	Material	Espesor m		Vs m/s		Y kN/m³	USCS	Material	Espesor m		Vs m/s		Y kN/m³
		min	max	min	max				min	max	min	max	
ML	Limo arenoso café	0	3	180	270	15,1	ML	Limo arenoso café	0	7	180	270	15,1
GM	Arenas, gravas, bolos	2	14	210	360	19,3	GM	Arenas, gravas, bolos	9	21	210	360	19,3
ML	Limo arenoso café	0	10	250	410	14,2	ML	Limo arenoso café	5	18	250	410	14,2
ML o SM	Toba / Ignimbrita meteorizada	0	9	400	600	19,1	ML o SM	Toba / Ignimbrita meteorizada	20	136	400	600	19,1
	Aglomerado sedimentario	8	31	430	-	21,6		Aglomerado sedimentario	8	31	430	-	21,6
	Arenita / Limolita	-	-	760	-	21,1		Arenita / Limolita	-	-	760	-	21,1
	Esquisto / Cuarzita	-	-	800	-	22,5		Esquisto / Cuarzita	-	-	800	-	22,5

Figura 33. Perfiles típicos geotécnicos encontrados en la microzonificación del SGC.

Fuente: (Díaz, et al., 2020).

4.3. RESUMEN DE COMPARACION DE LAS MICROZONIFICACIONES

A continuación, en la Tabla 6 se presenta un resumen de la información recolectada, la cual fue necesaria para comparar las microzonificaciones, identificar las diferencias que pudiesen existir y que pueden afectar los resultados finales, identificar los sistemas constructivos presentes en la ciudad, entre otros.

Tabla 6. Cuadro comparativo de la metodología usada por los estudios de microzonificación del SGC y UAN.

Parámetro de comparación	Microzonificación de la UAN	Microzonificación del SGC
Amenaza sísmica	Ambos estudios calculan la amenaza sísmica a partir de la identificación de registros sísmicos y fallas activas. Como resultado se obtiene los espectros de amenaza uniforme	
Caracterización geotécnica	Se realizó una caracterización geotécnica y geofísica a través de ensayos de campo y laboratorio, teniendo en común la mayoría de ellos. Destacan ensayos de clasificación del suelo, Velocidad de onda de corte, periodos de vibración, y curvas de degradación y amortiguamiento	
	Tienen 48 puntos de muestreo	Tienen 488 exploraciones
Monitoreo sísmico	Los dos toman como base registros de señales sísmicas de las estaciones de acelerógrafos presentes en la ciudad, pero además seleccionan nuevas señales compatibles con la amenaza de la región, pero de otras zonas del mundo	
	Tomó registros de sismos de Norteamérica y México	Tomó registros de sismos de Norteamérica, México y Asia
Respuesta dinámica local	A partir del modelo geotécnico se obtuvo la respuesta dinámica de los suelos	
	Para el análisis se empleó el software SHAKE91 utilizando un modelo lineal equivalente	Para el análisis se empleó el software Deepsoil (Versión 7.1.2.0) utilizando un modelo hiperbólico extendido
	Ambos modelos realizaron una calibración de la respuesta sísmica a partir de los registros acelerográficos locales	
	Se realizó una conformación del modelo digital en 3D	Se realizó un análisis geoespacial para zonificar la respuesta sísmica
Amenaza en superficie	Ambos estudios crearon espectros de amenaza uniforme en superficie	
Zonificación sísmica	A partir del modelo 3D se generó el mapa con isobaras	A partir de un análisis geoespacial se definieron las zonas homogéneas

Fuente: Elaborado por los autores.

Específicamente hablando de la caracterización geotécnica, en la Figura 34 se muestra la ubicación de los estratos de análisis en la ciudad y en la Tabla 7 se presenta el resumen de los estratos de suelo presentes en la ciudad de acuerdo con estos estudios.

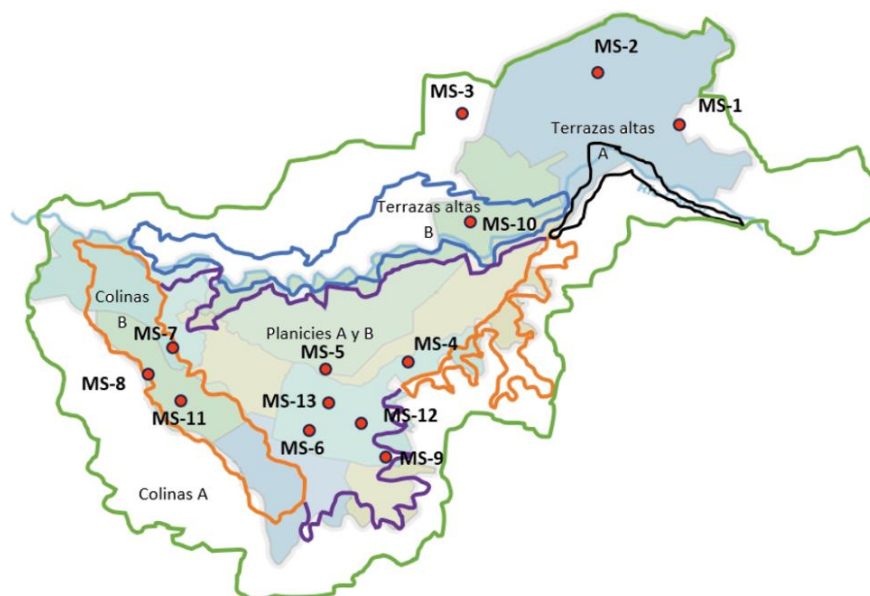


Figura 34. Ubicación de los puntos y zonas donde se obtuvieron los perfiles geotécnicos típicos.

Fuente: Mapa de Popayán modificado de (CafetoMH, 2023)

Tabla 7. Perfiles típicos geotécnicos de los estudios de microzonificación del SGC y UAN.

PERFILES TÍPICOS GEOTÉCNICOS		
	Zonas	Suelo (espesor en metros)
Suelos típicos según MZ del SGC	Colinas A	MH (38m), ML(12m), ML o SM (30m)
	Colinas B	MH (38m), MH(4m), ML (12m), ML o SM (14-46m)
	Planicie A	MH (4m), GP(19m), ML (18m), SM, PT, MH, ML o SM
	Planicie B	MH (38m), MH(4m), ML (12m), ML o SM (14-46m)
	Terrazas altas A	ML (3m), GM(14m), ML (10m), ML o SM (0-9m)
	Terrazas altas B	ML (7m), GM(21m), ML (18m), ML o SM (20-136m)
Perforaciones según MZ de la U. de los Andes	MS-1	MH (18m), SM(2m), MH (10m)
	MS-2	OL (2m), MH(10m), GP (2m), MH (15m)
	MS-3	MH (16m), ML(10m), MH (3m), ML(2m)
	MS-4	CH (2m), ML(5m), GP (9m), MH(7m), GP, CL, SM (2m)
	MS-5	OL (6m), MH(5m), CL (5m), MH(4m)
	MS-6	OL (1m), MH(18m), ML (10m)
	MS-7	OL (2m), MH(10m), CL (1m), MH(7m)
	MS-8	OL (3m), MH(13m), CL (4m)
	MS-9	OL (3m), MH(14m), SM(5m), MH, CH, SM (2m)
	MS-10	OL (2m), MH(8m), GP(7m)
	MS-11	OL (1m), ML(11m), MH(2m), CL(11m)
	MS-12	ML(3m), MH(4m), ML, CL, SC, ML, SC, ML(1m) CH (7m)
	MS-13	MH (18m), CH(12m)

Nota: Las celdas del mismo color en la tabla representan que los perfiles están ubicados en la misma zona para ambas microzonificaciones. Por ejemplo, las perforaciones MS-1, MS-2 y MS-3 de la UAN se encuentran en la misma zona que el SGC clasifica como Colinas A.

Fuente: Elaborado por los autores.

En la ciudad, respecto a las tipologías estructurales, la mayoría de las estructuras están conformadas por muros en mampostería (alrededor del 94%); de las cuales el 59% son confinadas (MC). Además, al comparar la exposición catastral de las dos microzonificaciones, se observó un incremento en las edificaciones de 5 y 8 pisos entre 2012 y 2020. Además de acuerdo con el último censo realizado por el DANE en el año 2018, las viviendas tipo apartamento representan el 20% del total de edificaciones, lo cual sugiere un crecimiento en la construcción de edificaciones de mayor altura. Esto resalta la importancia de incluir en los estudios de riesgo sísmico las estructuras más altas considerando el sistema estructura de pórticos en concreto reforzado.

5. METODOLOGIA

Para llevar a cabo esta investigación y obtener de la mejor manera posible el cumplimiento de los objetivos, se planeó y llevó a cabo el siguiente marco metodológico de la Figura 35.

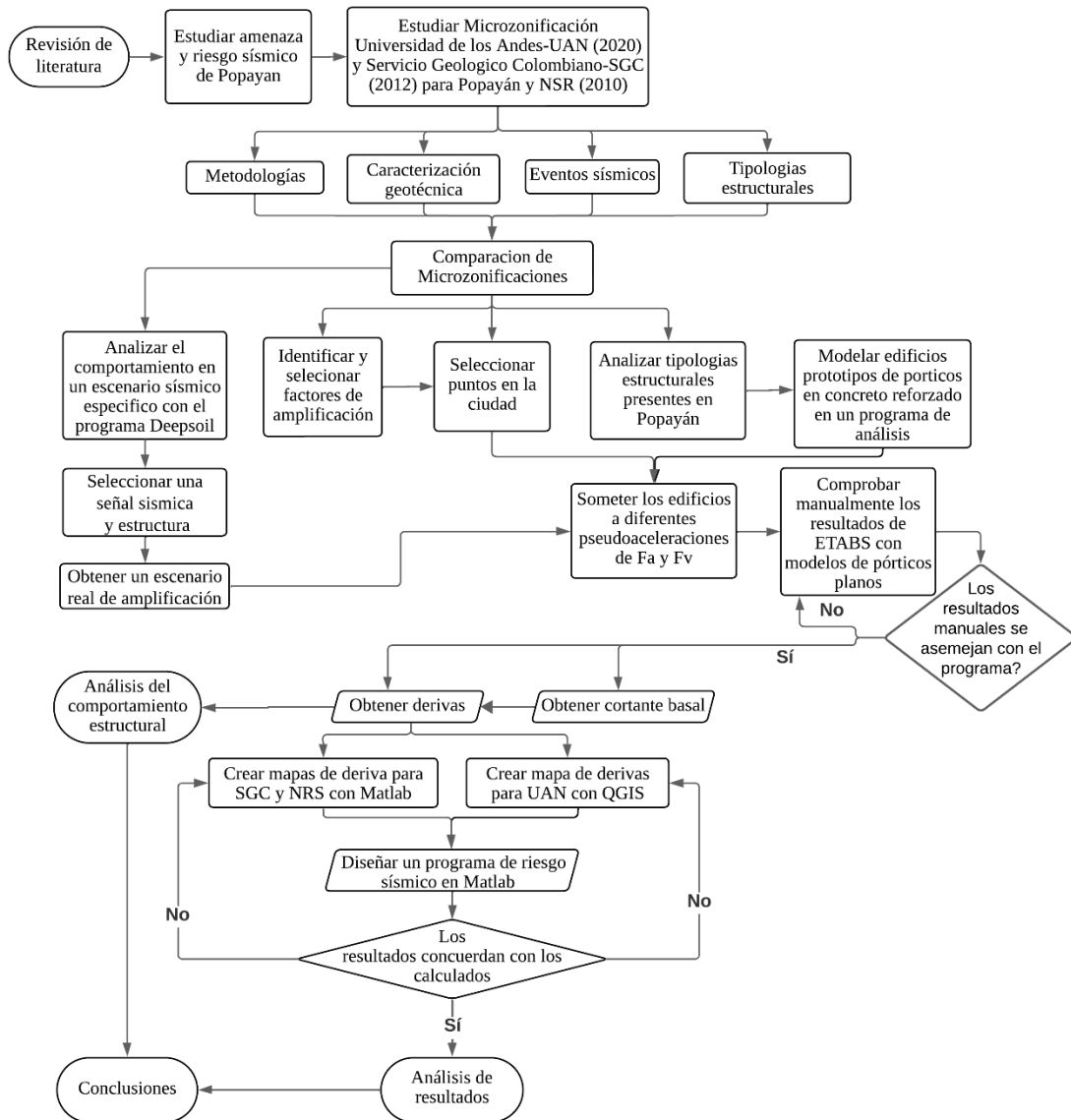


Figura 35. Marco metodológico.

Fuente: Elaborado por los autores.

Como se puede observar el primer paso para llevar a cabo esta investigación fue realizar una revisión detallada de literatura. Esto permitió entender cómo está actualmente el diseño estructural en Colombia, sobre todo en el caso de Popayán. Esta revisión es crucial para definir los objetivos y alcances del estudio. Un aspecto importante fue estudiar la Norma de

diseño sismorresistente NSR-10 y las microzonificaciones disponibles para Popayán, ya que, aunque existen estudios, ninguno está oficialmente activo. Por eso, se compararon los estudios existentes, revisando la metodología empleada, las señales sísmicas usadas, los tipos de suelo que se identificaron en cada caso y las tipologías estructurales sobresalientes.

Después de que se compararon las microzonificaciones, se centró la atención en los factores de amplificación sísmica del terreno, llamados F_a y F_v . Estos se compararon con los valores que propone la Norma de construcción de Colombia, con el objetivo de identificar si la normativa vigente realmente refleja la realidad sísmica de la ciudad, y determinar qué tanto varían los resultados al usar la microzonificación en lugar de la Norma actual. Posteriormente se escogieron puntos estratégicos de la ciudad para modelar las estructuras que representen adecuadamente los suelos de la ciudad con base en los puntos y zonas que define tanto la NSR-10 como las microzonificaciones.

En este estudio se realizaron pruebas con modelos estructurales prototipo que tuvieran una configuración con poca o nula irregularidad en planta o altura para comparar los resultados obtenidos manualmente con los que arrojaba el software, buscando que los datos mostrados en el programa sean correctos. Posteriormente, se modelaron los edificios prototipo en el software ETABS (Versión 21.2.0), asegurándose de cumplir con los parámetros de la NSR-10, especialmente en lo que se refiere a las derivas máximas permitidas, que no deben superar el 1% en pórticos. Es importante mencionar que no se incluyó el modelado del acero de refuerzo en las estructuras, ya que este no afecta directamente las derivas ni los cortantes basales, que son los puntos clave de esta investigación.

En seguida, se calcularon las pseudoaceleraciones correspondientes para cada uno de los factores de amplificación, tanto de la microzonificación como de la NSR-10 y se hallaron sus derivas y cortantes basales, con el fin de estimar el daño que un sismo podría causar en ellas.

Otro aspecto relevante fue buscar señales sísmicas reales para procesarlas en el programa Deepsoil (Versión 7.1.2.0), así se observó el efecto de amplificación de las señales sísmicas sobre las estructuras al llegar a la superficie. Esto ayudó a ver cómo las características del suelo influyen en la respuesta de los edificios de Popayán ante un sismo. De este proceso también se obtuvieron valores de pseudoaceleraciones, derivas y cortantes basales.

Con todos estos datos obtenidos, se realizó un programa en Matlab (Versión R2023b) que permitió visualizar el riesgo sísmico en la ciudad de Popayán según el tipo de edificio, su altura y las características del suelo. El programa permitió mostrar mapas de riesgo sísmico en función de la deriva para los 3 estudios y sus resultados fueron comprobados con los resultados de deriva encontrados con ETABS. Lo anterior se puede implementar para elaborar planes de mitigación de riesgo sísmico dado que ayuda a identificar zonas seguras para construir y para la planificación de la ciudad, de forma que mejora la seguridad de las personas.

6. DATOS

En este capítulo se presenta la recopilación de la información y documentación requerida para llevar a cabo el procesamiento de datos, tales como puntos de análisis del suelo, tipologías estructurales que se analizaron y las condiciones de diseño. Por otra parte, se muestra el procesamiento de datos que se tuvo que llevar a cabo para obtener los resultados de este informe, el cual consiste en la determinación de la deriva y cortante basal de forma manual y por medio del programa de ETABS (Versión 21.2.0), en el procesamiento de una señal sísmica por los diferentes estratos de suelo de la ciudad y la construcción de mapas de riesgo sísmico en función de la deriva de acuerdo con los tres estudios analizados.

6.1. SELECCIÓN DE DATOS

En esta sección en primer lugar, se recolectó información sobre las microzonificaciones realizadas para Popayán y se compararon los puntos más relevantes de cada una de ellas para comprender cuál de ellas ofrece mejores resultados a la región por su acercamiento a las condiciones reales. En segundo lugar, se definieron cuáles son los puntos de análisis del suelo que se tomarán a lo largo de la ciudad, buscando la mayor representatividad posible aplicable a la realidad de Popayán.

En tercer lugar, con esta información se procede a definir unas tipologías estructurales prototipo que sirven de base para obtener resultados preliminares del comportamiento de las estructuras en la ciudad. Se detalla la manera como se calculan los parámetros de relevancia de este estudio, los cuales son derivas y cortantes basales para los diferentes sistemas estructurales de análisis.

6.1.1. PUNTOS DE ANÁLISIS Y FACTORES DE AMPLIFICACIÓN

En esta sección se explicó el proceso de selección de los puntos o zonas del territorio donde se ubicaron los edificios para realizar el análisis, es decir, puntos en el mapa de Popayán en los cuales se analizaron el comportamiento de los edificios de acuerdo con los diferentes valores de F_a y F_v definidos por cada uno de los estudios, para obtener los resultados de derivas y cortantes como consecuencia de la aceleración sísmica (S_a) específica para dicha zona.

Como se mencionó en la Sección 4.2. la MS a cargo del SGC ha establecido 6 zonas homogéneas sísmicamente para cubrir el terreno correspondiente al casco urbano de la ciudad de Popayán, tal y como se mostró en la Figura 32. De esta forma se tomó un punto de análisis en cada una de las zonas, representando los primeros 6 puntos de análisis.

Por parte del estudio de la UAN se cuenta con un mapa de isolíneas como se mostró en las Figuras 28 y 29 por lo cual se tomaron 11 con el fin de que estos puntos estén distribuidos a lo largo de toda la ciudad siguiendo estos criterios: i) al menos un punto de la UAN este ubicado en cada una de las zonas establecidas por el SGC; ii) tomar los mínimos y máximos

valores de F_a y F_v que se presenten en el mapa de la UAN. Estos puntos y zonas de análisis se presentan en la Figura 36:

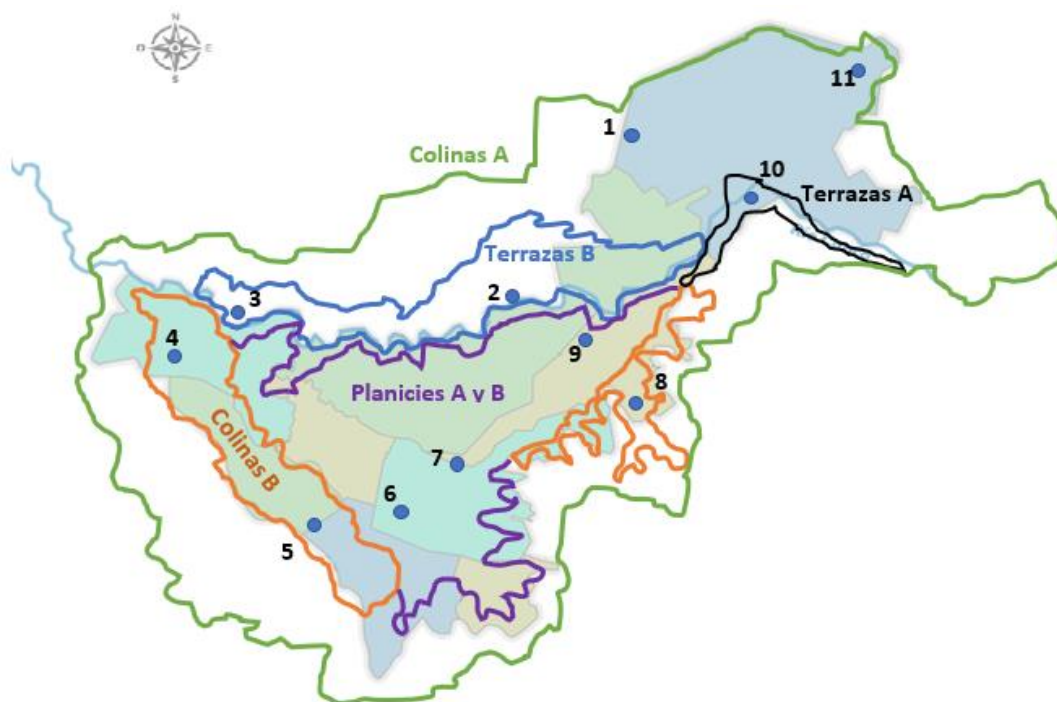


Figura 36. Ubicación de los puntos y zonas de análisis en el mapa de Popayán.

Fuente: (Modificado de CafetoMH, 2023).

Para establecer una relación con los métodos de diseño actuales, se usaron también los factores de amplificación correspondientes a la NSR-10, es decir, se realizó el análisis para cada uno de los suelos de la Norma presentes en la ciudad. Según Díaz et. al. (2020) cada una de las 6 zonas homogéneas descritas en MS del SGC son comparables a los tipos de suelos descritos por la NSR-10, específicamente, las zonas de Colinas A y B y Terrazas B corresponden a un suelo D, Planicies A y B a un suelo tipo E y Terrazas altas A a un suelo tipo C. De esta forma se analizaron los últimos 3 casos considerando los coeficientes para un suelo C, D y E.

Los puntos anteriores definen los parámetros F_a y F_v con un sismo probable, es decir lo que la NSR-10 presenta como sismo de diseño. Un sismo cuyos efectos tienen una probabilidad del 10% en ser excedidos en un lapso de 50 años, lo cual conduce a un periodo promedio de retorno de 475 años (AIS, 2010). Pero, adicionalmente se sometieron las estructuras a aceleraciones derivadas de otros sismos registrados, los cuales hayan sucedido en condiciones similares a las de Popayán. Para esta prueba se utilizaron dos señales sísmicas compatibles.

En resumen, se emplearon 22 pseudoaceleraciones diferentes para realizar el análisis en los edificios propuestos, 6 provenientes de los puntos de análisis del SGC, 11 de UAN, 3 de

NSR-10 y 2 de otros sismos diferentes al de la Norma. Esto es con el fin de abarcar la mayor cantidad de comportamientos y conocer tanto el comportamiento real de las edificaciones a lo largo del territorio frente a posibles sismos, como también realizar una comparación con las estructuras que se están diseñando en la actualidad de acuerdo con los parámetros elegidos por la NSR-10.

En ese orden de ideas, en la Tabla 8 se presentan los factores F_a y F_v necesarios para calcular la pseudoaceleración de los primeros 20 puntos de análisis, es decir, de los puntos provenientes de los informes del SGC, UAN y NSR-10.

Tabla 8. Factores de amplificación de los puntos de análisis del suelo.

Estudios referentes	Puntos de análisis del suelo	Identificación del punto de análisis	F_a	F_v
MZ SGC	1	Terrazas A	1.39	1.5
	2	Colinas A	1.58	2.37
	3	Colinas B	1.55	2.47
	4	Terrazas B	1.31	2.32
	5	Planicie A	1.2	2.74
	6	Planicie B	1.25	3.22
MS UAN	7	1	1.76	2.7
	8	2	1.5	1.5
	9	3	1.54	1.4
	10	4	1.49	1.9
	11	5	1.34	3.3
	12	6	1.18	3.5
	13	7	1.3	3.1
	14	8	1.41	3
	15	9	1.27	2.3
	16	10	1.48	2.7
	17	11	1.32	2.5
NSR -10	18	Tipo C	1.15	1.6
	19	Tipo D	1.3	2
	20	Tipo E	1.45	3.2

Fuente: Elaborado por los autores.

6.1.2. TIPOLOGIA ESTRUCTURAL TIPO

En esta sección se determina el tipo de estructuras que se analizan en este trabajo con base en el modelo de exposición de viviendas de las microzonificaciones presentado en la Sección 4.3. Además, se definen los parámetros y condiciones de diseño para las estructuras de análisis, es decir, la configuración estructural que se usa, los materiales, dimensiones de los elementos, entre otros.

Según la información catastral y de viviendas de los estudios de MS, es posible afirmar, que al igual que en todo Colombia, las edificaciones más presentes son de estructuras en mampostería, sin embargo, estas no se analizaron en el presente trabajo. Por otro lado, las estructuras de pórticos, aunque en porcentaje es mucho menor al sistema estructural de muros en mampostería (aprox. 56.2% menor), es una tipología que está creciendo desde el 2011 pasando de 0.19% a 0.51% en el año 2018, observando una tendencia ascendente en la actualidad, donde las construcciones tienen a tener una mayor altura para albergar así mismo más personas.

De esta manera, se evaluaron las estructuras de pórticos, ya que estas representan las nuevas edificaciones de la ciudad, y según Moreno González (2006) el diseño estructural se debe centrar en las nuevas edificaciones para que tengan un buen comportamiento frente a sismos resistiendo niveles de deformación más altos que los límites elásticos. Para este tipo de estructuras se determinó usar edificaciones prototipo para obtener resultados preliminares del comportamiento estructural en alturas correspondientes a 3, 5, 7 y 10 pisos.

6.1.3. CONDICIONES Y DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS

Para el diseño de las edificaciones de pórticos, se predimensionaron los elementos estructurales para que cumplieran los requisitos de la NSR-10 teniendo como condición que la deriva de las estructuras al ser sometidas a una fuerza sísmica (lateral) sea menor al 1% y que todas tienen un amortiguamiento del 5%. Es necesario recalcar que, en el predimensionamiento, no se consideró el acero de refuerzo, ya que se hizo un diseño preliminar para verificar la deriva, y ese chequeo no está condicionado por la cuantía de acero.

Para llegar a dichos límites de deriva se consideró que inicialmente las estructuras se encuentran en un suelo D, ya que este perfil de suelo es uno de los más representativos de la ciudad según Pérez et. al., (2020), por lo que se quiso mostrar la situación actual del municipio. Una vez dimensionadas, para cumplir el requisito de deriva máxima con la pseudoaceleración en el suelo D, se sometió esta misma edificación a las pseudoaceleraciones de los otros puntos de análisis.

En los pórticos la configuración estructural está basada en un modelo prototipo propuesto por Toro et. al. (2020), el cual tiene de 3 luces de 4m en cada dirección, medidos de eje a eje, con una altura de piso de 3m, una losa de espesor efectivo de 0.11m, con un vacío en la parte central de 4m x 2m en todos los entrepisos, excepto en el último, y una carga muerta adicional de 3.1KN/m² y una carga viva de 1.8KN/m² en todos los entrepisos. Los elementos se modelaron dentro del software ETABS (Versión 21.2.0) con las características que se presentan en la Tabla 9, para obtener los resultados respectivos como se observa en las Figuras 37 y 38:

Tabla 9. Características de los prototipos de edificios de pórticos.

Datos del edificio	Pórtico de 3 pisos	Pórtico de 5 pisos	Pórtico de 7 pisos	Pórtico de 10 pisos
Coefficiente de importancia	1 (Uso residencial)	1 (Uso residencial)	1 (Uso residencial)	1 (Uso residencial)
Peso del edificio (KN)	3659	6696	10249	15158
Periodo estructural (s)	0.33	0.54	0.77	1.07
Dimensiones de Columnas (cm ²)	40x40	50x50	50x50	55x55
Dimensiones de Vigas (cm ²)	35x35	35x45	45x45	45x45

Fuente: Elaborado por los autores.

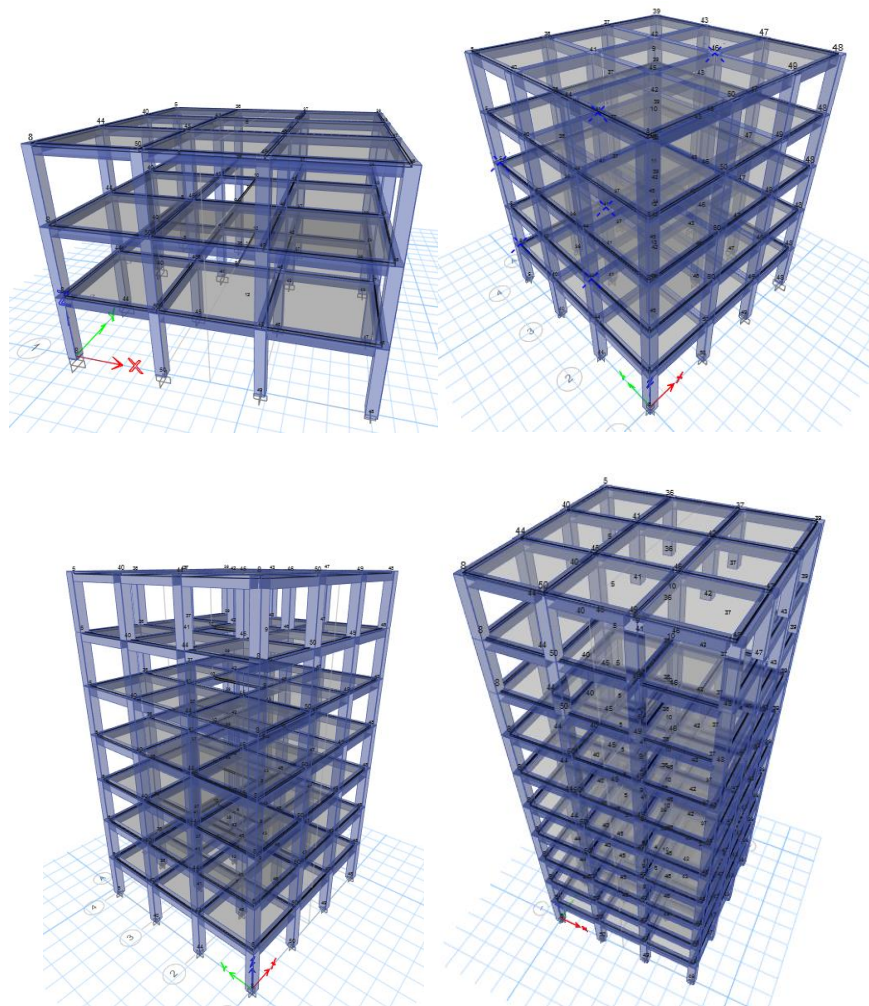


Figura 37. Prototipos de estructuras de pórticos de 3, 5, 7 y 10 pisos.

Fuente: Tomado de ETABS (Versión 21.2.0) por los autores.

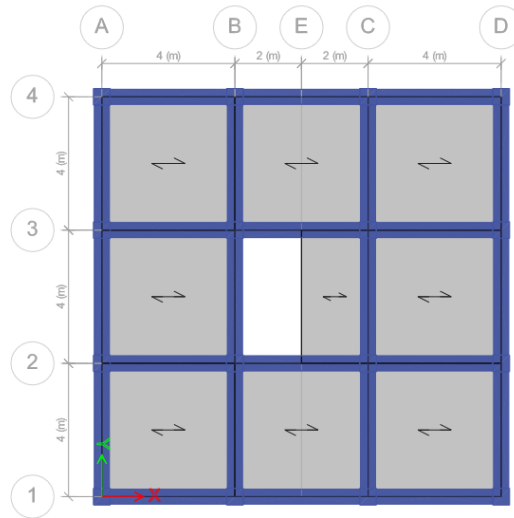


Figura 38. Planta típica de las estructuras prototipo de pórticos.

Fuente: Tomado de ETABS (Versión 21.2.0) por los autores.

6.2. PROCESAMIENTO DE DATOS

Con el fin de someter una señal sísmica probable a un estrato de suelo existente y evidenciar cuál sería la amplificación del suelo para compararlo con las amplificaciones de la Norma, se busca estudiar la forma en la que el software Deepsoil (Versión 7.1.2.0) trabaja y recoge información de las características sísmicas y se detalla los criterios que deben ser tomados en cuenta en este caso para un correcto uso del programa.

También, se estudió la forma como el software ETABS (Versión 21.2.0) trabaja y la gestión que se debe realizar en el programa para obtener los resultados de los parámetros de análisis. En último lugar, se proporciona la guía con la cual se construyó la propuesta de un programa que proporcione mapas de riesgo sísmico de la ciudad de Popayán en función de las derivas máximas de acuerdo con el sistema estructural y número de pisos y ubicación en el territorio.

6.2.1. DERIVA Y CORTANTE BASAL

En esta sección se presenta el procedimiento manual para calcular el cortante basal y la deriva, y se realiza unos cálculos tipo a partir de unos ejemplos preliminares con el fin de comparar dichos resultados con los del software ETABS (Versión 21.2.0) y comprobar la confiabilidad de los resultados. Este software fue usado para obtener los resultados finales del comportamiento estructural de los edificios prototipo.

6.2.1.1. PROCEDIMIENTO PARA EL CORTANTE BASAL

Para iniciar, el cortante de piso es la sumatoria de fuerzas laterales ubicadas en el diafragma, a nivel de vigas, por encima del piso. Este cortante se puede obtener por medio del método de Fuerza Horizontal Equivalente de la siguiente forma:

1. Definir los parámetros sísmicos y de efecto de sitio: De acuerdo con la NSR-10 estos factores dependen de la ubicación de la estructura dentro del país (municipio) y del tipo de suelo sobre el que se construirá. Estos factores se encuentran en las Tablas A.2.2-1, A.2.3-2 para Aa y Av, y en A.2.4-3 y A.2.4.4 para Fa y Fv.
2. Definir el coeficiente de importancia (I): Según el grupo de uso de la edificación se asigna el valor de I
3. Cálculo del periodo natural de la estructura: La NSR-10 ofrece métodos para calcular un periodo aproximado, los cuales se presentan a continuación:
 - Esta primera fórmula es aplicada solo para edificios de menos de 12 pisos en concreto reforzado con una altura de piso menor a 3m.

$$Ta_1 = 0.10N$$

Ecuación 3. Primera fórmula del periodo aproximado de la estructura

Donde, N es el número de pisos

- La segunda fórmula es aplicada para todo tipo de estructura.

$$Ta_2 = Ci * h^\alpha$$

Ecuación 4. Segunda fórmula del periodo aproximado de la estructura

Donde, h es la altura de la edificación, y los coeficientes C_i y α se obtienen de la Tabla A.4.2-1 de la NSR-10 que se presenta en la Figura 39:

Sistema estructural de resistencia sísmica	C_t	α
Pórticos resistentes a momentos de concreto reforzado que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.	0.047	0.9
Pórticos resistentes a momentos de acero estructural que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.	0.072	0.8
Pórticos arriostrados de acero estructural con diagonales excéntricas restringidas a pandeo.	0.073	0.75
Todos los otros sistemas estructurales basados en muros de rigidez similar o mayor a la de muros de concreto o mampostería	0.049	0.75
Alternativamente, para estructuras que tengan muros estructurales de concreto reforzado o mampostería estructural, pueden emplearse los siguientes parámetros C_t y α , donde C_w se calcula utilizando la ecuación A.4.2-4.	$\frac{0.0062}{\sqrt{C_w}}$	1.00

Figura 39. Valores de los parámetros C_t y α para el cálculo de periodo aproximado.

Fuente: (AIS, 2010).

4. Cálculo de la pseudoaceleración (S_a): De acuerdo con el espectro de diseño de la NSR-10, primero se debe definir los límites de periodo corto (T_c) y periodo largo (T_l), y se debe ubicar el periodo aproximado (T_a) a partir de estos límites para saber

que fórmula de pseudo aceleración corresponde de acuerdo con el espectro, tal como se muestra en la Figura 40:

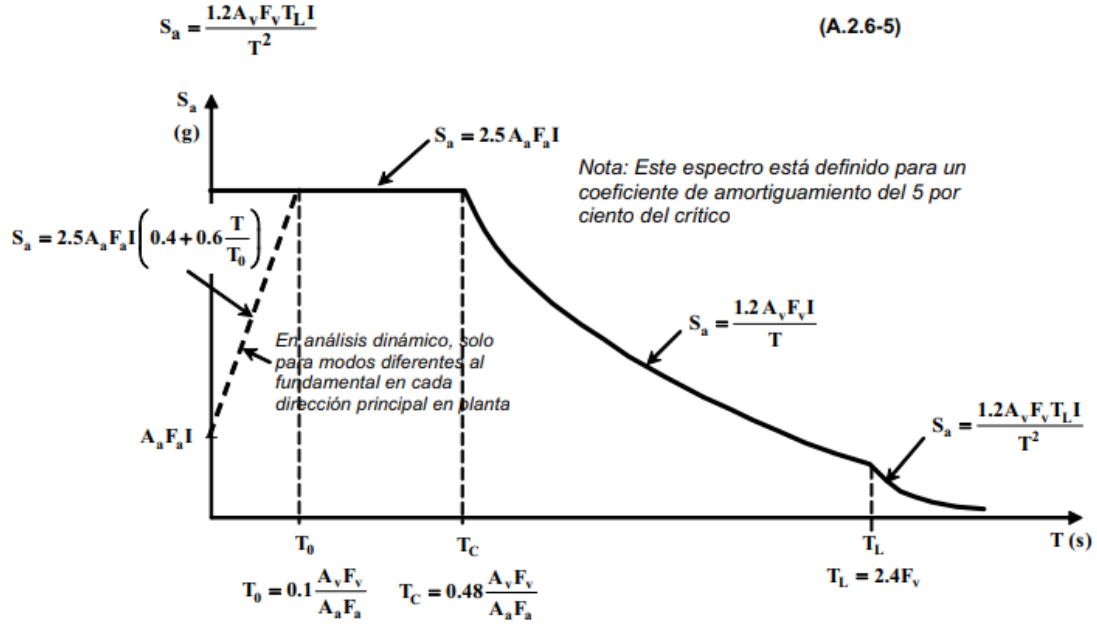


Figura 40. Espectro de diseño de la NSR-10.

Fuente: (AIS, 2010).

- Calcular el cortante basal: Como se muestra en la Ecuación 9 este depende del peso sísmico total de la estructura (W_T) y de S_a . Para calcular el peso sísmico es necesario tener en cuenta que se considera un modelo que concentra la masa de la estructura en los entrepisos, por tanto, el peso se debe distribuir a cada uno de los ellos, en el caso de los elementos verticales se distribuyen a cada uno de los entrepisos a los que están unidos.

$$Vb = W_T * S_a$$

Ecuación 5. Cortante basal, NSR-10.

- Determinar el factor de distribución C_{vx} : Este factor esta dado por la siguiente formula:

$$C_{vx} = \frac{W_i * h_i^k}{\sum W_i * h_i^k}$$

Ecuación 6. Coeficiente de reparto, NSR-10.

Donde,

- W_i es el peso de cada entrepiso (KN)
- h_i es la altura acumulada desde la base hasta ese nivel (m)

- k es un coeficiente que depende del periodo de la estructura:

$$\begin{aligned} T \leq 0.5s &\rightarrow K = 1.0 \\ 0.5s < T < 2.5s &\rightarrow K = 0.75 + 0.5T \\ T \geq 2.5s &\rightarrow K = 2.0 \end{aligned}$$

Ecuación 7. Coeficiente que depende del periodo de la estructura definido por intervalos.

7. Finalmente, el cortante de cada piso se obtiene de la acumulación de fuerza sísmicas de cada piso (F_i) que estén por encima de él, así:

$$F_i = Cvx * Vb$$

Ecuación 8. Fuerza de piso, NSR-10.

$$V_i = \sum F_i = F_i + F_{i+1} + F_{i+2} + F_{i+n}$$

Ecuación 9. Cortante basal.

6.2.1.2. PROCEDIMIENTO DE DERIVA PARA PÓRTICOS

En esta sección se presentó el método usado para calcular las derivas de los pórticos, el cual corresponde a la sumatoria de desplazamientos por movimiento traslacional, rotacional y efectos de segundo orden. Es pertinente hacer la aclaración de que la deriva se puede medir en 2 direcciones: la dirección Norte-Sur (NS) semejante a la dirección en el eje Y, y la dirección Este-Oeste (EW) semejante a la dirección en el eje X. Para obtener la deriva de piso de un pórtico se puede optar por distintos métodos como el método de pendiente deformación, método de la carga virtual, método matricial, entre otros. Para este caso se chequeó la deriva total en ambas direcciones la cual depende de:

Deriva por movimiento traslacional (Δcm_x): Se calcula a partir de la relación entre el cortante y la rigidez de piso:

$$\Delta cm_x = \frac{Vp_i}{\sum Kp_x}$$

Ecuación 10. Deriva por movimiento traslacional.

- Vp_i : Cortante de piso
- Kp_x : Rigidez de pórticos en la dirección X

Deriva por movimiento rotacional (Δt_{cm_x}): Considera los efectos torsionales y se mide a partir del centro de rigidez. Para estructuras regulares es posible calcular a partir del centro de masa, y por medio de la teoría de pequeñas deformaciones es posible afirmar que:

$$\Delta t_x = \theta_T * ed_x$$

Ecuación 11. Derivas por movimiento rotacional.

Donde,

- ed_x es la excentricidad de diseño
- θ_T es la distorsión angular para pórticos

$$\theta_T = \frac{Mt}{S} + \frac{M0}{S}$$

Ecuación 12. Distorsión angular para pórticos.

- Mt es el momento indirecto
- $M0$ es el momento ortogonal
- S es la Rigidez torsional del sistema, dado por:

$$S = \sum Kx_i(yi')^2 + \sum Ky_i(xi')^2$$

Ecuación 13. Rigidez torsional.

Siendo yi' y xi' las distancias desde el centro de rigidez al pórtico analizado

Deriva por efecto de segundo orden o P-Delta (Δpd_x): Es el momento generado por el desplazamiento de la fuerza gravitacional del primer piso cuando se le ha aplicado una carga.

$$\Delta pd_x = \Delta cm_x * \frac{Qi}{1 - Qi}$$

Ecuación 14. Deriva por efecto de segundo orden.

- Qi : Es el índice de estabilidad

La NSR-10 considera el efecto de segundo orden cuando el índice Qi es mayor o igual a 0.10, ya que menor a él las deformaciones son muy pequeñas. En este caso se considera que la estructura es muy rígida.

Finalmente, la deriva de piso para una dirección sea en Y o X es:

$$\Delta piso_x = \Delta cm_x + \Delta t_x + \Delta pd_x$$

Ecuación 15. Deriva total de piso para pórticos.

Como para el desarrollo de este trabajo se efectuaron cálculos de deriva, se realizó un cálculo tipo de la estructura prototipo en 2 dimensiones de 3 pisos, con el fin de comparar la información presentada en el programa con cálculos manuales. El cálculo manual de la deriva se centró en el movimiento traslacional, ya que es el desplazamiento que predomina en la estructura ya que por ser regular los efectos torsionales son pequeños. Por esta razón se profundiza en los procedimientos para calcular esta deriva, es decir, el cálculo de la rigidez.

Para encontrar la rigidez de piso existen diversos métodos entre los que se encuentra las fórmulas de Wilbur. Este método define la rigidez como la relación entre las fuerzas cortantes absorbidas por una estructura y el desplazamiento relativo entre los dos niveles que lo limitan, y se aplica a estructuras regulares formadas por elementos con inercia constante en los que se considera que las deformaciones axiales son despreciables. Estas fórmulas se fundamentan en las siguientes hipótesis (Rupay, 2023):

- Los giros en los nudos de un nivel y de los niveles adyacentes son iguales, salvo por el nivel inicial, en el que se considera el empotramiento o articulación.
- En los dos pisos adyacentes, sus cortantes actuantes son del mismo valor al de éste

Para el primer entrepiso, suponiendo columnas empotradas en la cimentación:

$$K1 = \frac{48E}{h1 * \left[\frac{4h1}{\sum Kc1} + \frac{h1 + h2}{\sum Kv1 + \frac{\sum Kc1}{12}} \right]}$$

Ecuación 16. Rigidez del primer piso, método de Wilbur.

Para el segundo entrepiso, suponiendo columnas empotradas en la base:

$$K2 = \frac{48E}{h2 * \left[\frac{4h2}{\sum Kc2} + \frac{h1 + h2}{\sum Kv1 + \frac{\sum Kc1}{12}} + \frac{h2 + h3}{\sum Kv2} \right]}$$

Ecuación 17. Rigidez del segundo piso, método de Wilbur.

Para pisos intermedios:

$$Kn = \frac{48E}{hn * \left[\frac{4hn}{\sum Kcn} + \frac{h_{n-1} + hn}{\sum Kv_{n-1}} + \frac{hn + h_{n+1}}{\sum Kv_n} \right]}$$

Ecuación 18. Rigidez de pisos intermedios, método de Wilbur.

Donde:

- Kn : rigidez del piso “n”
- kvn : rigidez relativa (Iv/L) de las vigas del nivel sobre el piso “n”
- kcn : rigidez relativa (Ic/L) de las columnas del piso “n”
- E : módulo de Elasticidad
- hn : altura de los entrepisos

Gutiérrez (2016) afirma que, para el último entrepiso, si se acepta la suposición de que el cortante del penúltimo entrepiso es el doble que el último, se puede utilizar la fórmula para entrepisos intermedios, poniendo $2h_{n-1}$ en vez de h_{n-1} .

Con esta información es posible realizar el cálculo tipo de deriva para los pórticos.

6.2.1.3. PROCEDIMIENTO DE CORTANTE BASAL Y DERIVA PARA LA ESTRUCTURA PROTOTIPO DE 3 PISOS

A modo de ejemplo y con el fin de comparar los cálculos realizados por el software ETABS (Versión 21.2.0) se realizaron cálculos manuales para la estructura prototipo 3 pisos que se muestra en la Figura 41, el cual se ubica un suelo tipo D de la ciudad de Popayán, y cuyos parámetros de análisis se presentan en la Tabla 10.

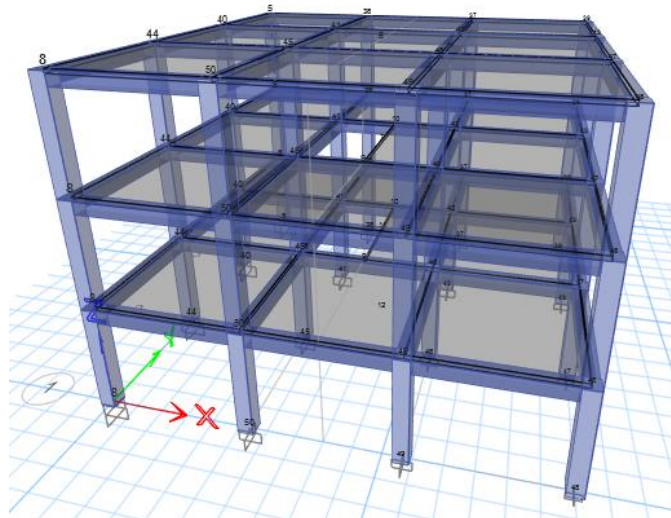


Figura 41. Modelo de la estructura de 3 pisos en ETABS.

Fuente: Tomado de ETABS (Versión 21.2.0) por los autores.

Tabla 10. Parámetros de diseño para estructura de 3 pisos.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Dimensiones viga (m ²)	0.35x0.35	Aa	0.25
Dimensiones columna (m ²)	0.4x0.4	Av	0.20
Altura (m)	3	Fa	1.3
Longitud de vanos (m)	4	Fv	2
Número de vanos en cada dirección	3	Espesor de la losa maciza (m)	0.11
f'c (Mpa)	21	Coefficiente de importancia I	1
Peso concreto (KN/m ³)	24	Modulo de elasticidad E (Mpa)	21538.107

Fuente: Elaborado por los autores.

1. Calcular Sa con base en el espectro de diseño de la NSR-10:

$$Ta = Ci * h^{\alpha}$$

De la Tabla A.4.2-1 de la NSR-10 se obtiene que $Ci = 0.047$ y $\alpha = 0.9$.

$$Ta = 0.047 * 9^{0.9} = 0.34s$$

Calculado el periodo aproximado se calcula el límite de periodos cortos:

$$Tc = 0.48 * \frac{Av * Fv}{Aa * Fa} = 0.48 * \frac{0.2 * 2}{0.25 * 1.3} = 0.59s$$

Como Ta es menor a Tc, se utiliza la siguiente formula de Sa:

$$Sa = 2.5 * Aa * Fa * I$$

$$Sa = 2.5 * 0.25 * 1.3 * 1 = 0.8125 (\%g)$$

2. Calcular el peso de la estructura:

$$\text{Área de entrepiso} = 12.35 * 12.35 - (3.65 * 1.825) = 145.861m^2$$

$$W_{col \text{ entrepiso}} = \gamma_{concreto} * Volumen \text{ columnas} * \text{Número de columnas}$$

$$W_{col \text{ entrepiso}} = 24 * 0.4 * 0.4 * 3 * 16 = 184.32KN$$

$$Q_{col \text{ entrepiso}} = \frac{W_{col \text{ entrepiso}}}{A_{entrepiso}}$$

$$Q_{col \text{ entrepiso}} = \frac{184.32}{145.861} = 1.264KN/m^2$$

$$W_{vigas\ entrepiso} = \gamma_{concreto} * Volumen\ vigas$$

$$W_{vigas\ entrepiso} = 24 * 0.35 * 0.35 * (3.6 * 3 * 8) = 254.016KN$$

$$Q_{vigas\ entrepiso} = \frac{W_{vigas\ entrepiso}}{A_{entrepiso}}$$

$$Q_{vigas\ entrepiso} = \frac{254.016}{145.861} = 1.741KN/m^2$$

$$W_{losa\ entrepiso} = \gamma_{concreto} * Volumen\ losa$$

$$W_{losa\ entrepiso} = 24 * 0.11 * (4 * 4 * 8 + 4 * 2) = 359.040KN$$

$$Q_{losa\ entrepiso} = \frac{W_{losa\ entrepiso}}{A_{entrepiso}}$$

$$Q_{losa\ entrepiso} = \frac{359.040}{145.861} = 2.462KN/m^2$$

$$\text{Área de cubierta} = 12.35 * 12.35 = 152.523m^2$$

$$W_{col\ cubierta} = \gamma_{concreto} * Volumen\ columnas * \text{Número de columnas}$$

$$W_{col\ cubierta} = 24 * 0.4 * 0.4 * 3/2 * 16 = 92.160KN$$

$$Q_{col\ cubierta} = \frac{W_{col\ cubierta}}{A_{cubierta}}$$

$$Q_{col\ cubierta} = \frac{92.160}{152.523} = 0.604KN/m^2$$

$$W_{vigas\ cubierta} = \gamma_{concreto} * Volumen\ vigas$$

$$W_{vigas\ cubierta} = 24 * 0.35 * 0.35 * (3.6 * 3 * 8) = 254.016KN$$

$$Q_{vigas\ cubierta} = \frac{W_{vigas\ cubierta}}{A_{cubierta}}$$

$$Q_{vigas\ cubierta} = \frac{254.016}{152.523} = 1.665KN/m^2$$

$$W_{losa\ cubierta} = \gamma_{concreto} * Volumen\ losa$$

$$W_{losa\ cubierta} = 24 * 0.11 * (4 * 4 * 9) = 380.160KN$$

$$Q_{losa\ cubierta} = \frac{W_{losa\ cubierta}}{A_{cubierta}}$$

$$Q_{losa\ cubierta} = \frac{380.160}{152.523} = 2.492KN/m^2$$

$$W_{adicional} = 3.1KN/m^2$$

$$Q_{Total\ entrepiso} = Q_{col\ entrepiso} + Q_{vigas\ entrepiso} + Q_{losa\ entrepiso} + Q_{adicional}$$

$$Q_{Total\ entrepiso} = 1.264 + 1.741 + 2.462 + 3.1 = 8.567KN/m^2$$

$$W_{total\ entrepiso} = Q_{Total\ entrepiso} * A_{entrepiso}$$

$$W_{total\ entrepiso} = 8.567 * 145.861 = 1249.546KN$$

$$Q_{Total\ cubierta} = Q_{col\ cubierta} + Q_{vigas\ cubierta} + Q_{losa\ cubierta} + Q_{adicional}$$

$$Q_{Total\ cubierta} = 0.604 + 1.665 + 2.492 + 3.1 = 7.862KN/m^2$$

$$W_{total\ cubierta} = Q_{Total\ cubierta} * A_{cubierta}$$

$$W_{total\ cubierta} = 7.862 * 152.523 = 1199.156KN$$

$$W_{total} = W_{total\ entrepiso} * 2 + W_{total\ cubierta}$$

$$W_{total} = 1249.546 + 1249.546 + 1199.156 = 3698.248KN$$

3. Calcular el cortante de piso o fuerza sísmica:

$$Vb = Sa * W_{Total}$$

$$Vb = 0.8125 * 3698.248 = 3004.827KN$$

Para determinar el coeficiente de reparto (C_{vx}) se debe tener en cuenta que el valor de K es igual a 1 porque el periodo de la estructura es menor 0.5s.

$$C_{vx1} = \frac{W_i * h_i^k}{\sum W_i * h_i^k}$$

$$C_{vx1} = \frac{1249.546 * 3^1}{(1249.546 * 3^1) * (1249.546 * 6^1) * (1199.156 * 9^1)} = 0.17$$

$$C_{vx2} = \frac{1249.546 * 6^1}{(1249.546 * 3^1) * (1249.546 * 6^1) * (1199.156 * 9^1)} = 0.34$$

$$C_{vx3} = \frac{1199.156 * 9^1}{(1249.546 * 3^1) * (1249.546 * 6^1) * (1199.156 * 9^1)} = 0.49$$

Con lo anterior es posible calcular la fuerza lateral de cada piso

$$F_i = V_b * C_{vx}$$

$$F_1 = 3004.827 * 0.17 = 511.110 \text{ KN}$$

$$F_2 = 3004.827 * 0.34 = 1022.220 \text{ KN}$$

$$F_3 = 3004.827 * 0.49 = 1471.496 \text{ KN}$$

Por último, se calcula el cortante de cada piso:

$$V_3 = F_3 = 1471.496 \text{ KN}$$

$$V_2 = F_2 + F_3 = 1471.496 + 1022.220 = 2493.716 \text{ KN}$$

$$V_1 = F_1 + F_2 + F_3 = 1471.496 + 1022.220 + 511.110 = 3004.827 \text{ KN}$$

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 11. Resumen de los resultados de FHE para un pórtico de 3 pisos.

Nivel	W (KN)	hi (m)	Wi*hi^k	Cvx	Fi (KN)	Vi (KN)
Entrepiso 1	1249.546	3	3748.638	0.170	511.110	3004.827
Entrepiso 2	1249.546	3	7497.275	0.340	1022.220	2493.716
Entrepiso 3	1199.156	3	10792.402	0.490	1471.496	1471.496
Sumatorias	3698.248		22038.315	1	3004.827	

Fuente: Elaborado por los autores.

4. Calcular la rigidez del pórtico: Por medio del método de Wilbur y suponiendo columnas empotradas, se obtiene que:

$$E = 21538.105 \text{ MPa}$$

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

$$I_c = 0.00213 \text{ m}^4$$

$$I_v = 0.00125 \text{ m}^4$$

$$K_c = \frac{I_c}{L_c}$$

$$K_c = 0.002844 \text{ m}^3$$

$$K_v = \frac{I_v}{L_v}$$

$$K_v = 0.000938 \text{ m}^3$$

Para el primer entrepiso la rigidez de un pórtico es:

$$K1 = \frac{48E}{h1 * \left[\frac{4h1}{\sum K_{c1}} + \frac{h1 + h2}{\sum K_{v1} + \frac{\sum K_{c1}}{12}} \right]}$$

$$K1 = \frac{48 * 21538105}{3 * \left[\frac{4 * 3}{0.002844 * 2} + \frac{3 + 3}{0.000938 + \frac{0.002844}{12}} \right]}$$

$$K1 = 36953.690 \text{ KN/m}$$

Para el segundo entrepiso:

$$K2 = \frac{48E}{h2 * \left[\frac{4h2}{\sum K_{c2}} + \frac{h1 + h2}{\sum K_{v1} + \frac{\sum K_{c1}}{12}} + \frac{h2 + h3}{\sum K_{v2}} \right]}$$

$$K2 = \frac{48 * 21538105}{3 * \left[\frac{4 * 3}{0.002844} + \frac{3 + 3}{0.000938 + \frac{0.002844}{12}} + \frac{3 + 3}{0.000938} \right]}$$

$$K2 = 21917.858 \text{ KN/m}$$

Para el tercer entrepiso:

$$K_n = \frac{48E}{h_n * \left[\frac{4h_n}{\sum Kc_n} + \frac{2 * h_{n-1} + h_n}{\sum Kv_{n-1}} + \frac{h_n + h_{n+1}}{\sum Kv_n} \right]}$$

$$K3 = \frac{48 * 21538105}{3 * \left[\frac{4 * 3}{0.002844} + \frac{2 * 3 + 3}{0.000938} + \frac{3}{0.000938} \right]}$$

$$K3 = 20255.170KN/m$$

Como en cada entrepiso existen 4 pórticos iguales los resultados de rigidez por piso son:

$$K_{piso\ 1} = 36953.690 * 4 = 147814.76KN/m$$

$$K_{piso\ 2} = 21917.858 * 4 = 87671.44KN/m$$

$$K_{piso\ 3} = 20255.170 * 4 = 81020.68KN/m$$

5. Con estos datos es posible calcular la deriva por efectos traslacionales del pórtico en cada piso, así:

$$\Delta i = \frac{Vi}{Ki}$$

$$\Delta_1 = \frac{3004.827}{147814.476} = 0.0203m$$

$$\Delta_2 = \frac{2493.716}{87671.44} = 0.02844m$$

$$\Delta_3 = \frac{1471.496}{81020.68} = 0.01816m$$

A continuación, en la Figura 42 se presentan los resultados obtenidos en ETABS (Versión 21.2.0) para el suelo tipo D con el fin de ser comparados posteriormente con los cálculos manuales en la Tabla 12:

E Story Stiffness								
File Edit Format-Filter-Sort Select Options								
Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None Story Stiffness								
Filter: None								
	Story	Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	Shear X kN	Drift X m	Stiff X kN/m
►	Story3	FHEx	LinStatic	Step By Step	1	1497.7927	0.019085	78481.89
	Story2	FHEx	LinStatic	Step By Step	1	2535.6923	0.028019	90498.837
	Story1	FHEx	LinStatic	Step By Step	1	3054.642	0.02046	149301.145

Figura 42. Datos arrojados por el software ETABS para el ejemplo de estructura de 3 pisos en suelo tipo D.

Fuente: Tomada de ETABS (Versión 21.2.0) por los autores.

Tabla 12. Comparación de los datos obtenidos manualmente y con el programa de la estructura de 3 pisos.

Parámetros	Resultados manuales	Resultados ETABS
Cortante basal (KN)	3004.827	3051.642
Deriva entrepiso 1 (m)	0.0203	0.0246
Deriva entrepiso 2 (m)	0.0284	0.0280
Deriva entrepiso 3 (m)	0.0182	0.0191

Fuente: Elaborado por los autores.

Con estos resultados se puede observar que el valor de cortante basal y las derivas halladas manualmente son aproximados a los del programa. Las variaciones pueden deberse al nivel de exactitud con el que trabaja ETABS, además las derivas en este caso pueden variar por las diferencias en la rigidez del piso, ya que estos datos si bien son cercanos, son calculados por métodos diferentes, ya que los datos calculados manualmente fueron hallados por las fórmulas de Wilbur, el cuál es un método aproximado para hallar la rigidez.

Por tanto, de esta misma manera con ayuda del programa, se obtuvieron los resultados de deriva de piso y de cortante basal para las estructuras prototipo presentadas en la Sección 6.1.2, los cuales fueron analizados para evaluar el comportamiento estructural en la ciudad.

6.2.2. ANÁLISIS DEL EFECTO DE SITIO Y AMPLIFICACIÓN

Con el fin de analizar el efecto de sitio, se buscó encontrar la amplificación para sitios específicos en Popayán, para ello, se sometieron las estructuras a la aceleración en superficie producto de un sismo real y de gran magnitud y así obtener resultados del comportamiento estructural frente a este evento, para posteriormente compararlo con los resultados obtenidos a partir del sismo de diseño calculado con los factores de amplificación de ambas microzonificaciones y de la NSR-10.

Las MS encontraron esta amplificación de distinta manera, por ejemplo, el SGC emplea modelos unidimensionales no lineales y lineales equivalentes mediante el software Deepsoil y la UAN utiliza el modelo lineal equivalente por medio del programa SHAKE91. En el caso de esta investigación se siguió el procedimiento descrito por el SGC, donde seleccionando

una señal sísmica en roca y procesando esa información en los diferentes perfiles de suelo se encontró la aceleración en superficie, valores los cuales se usaron para calcular derivas y cortantes basales en edificio prototipos.

Deepsoil es una plataforma de análisis de respuesta del suelo que permite evaluar cualitativamente la influencia de las capas de suelo de distinta rigidez en el movimiento del suelo propagado durante un evento sísmico. Para poder obtener la respuesta del suelo, es decir, la aceleración en superficie se debe tener en cuenta parámetros como el tipo de análisis, propiedades del perfil del suelo, selección del movimiento sísmico, entre otros. Para ello, se requiere definir el evento sísmico teniendo en cuenta la sismicidad de la zona y condiciones tectónicas de modo que sean similares a las características de la región en estudio, con el fin de acercarse a un escenario cercano a la realidad. Además, para realizar el análisis de derivas y cortantes basales se determinaron las edificaciones a analizar y su ubicación dentro la ciudad. Cada uno de los aspectos fueron abordados en las siguientes secciones, proporcionando una base para interpretar los resultados y la aplicabilidad en la evaluación del riesgo sísmico.

6.2.2.1. ESTRATOS DE SUELO REPRESENTATIVOS

Para analizar la amplificación por efecto de sitio se necesita procesar una señal sísmica en roca a través de un estrato de suelo de forma que se pueda hallar la aceleración en superficie como se muestra en la Figura 43.

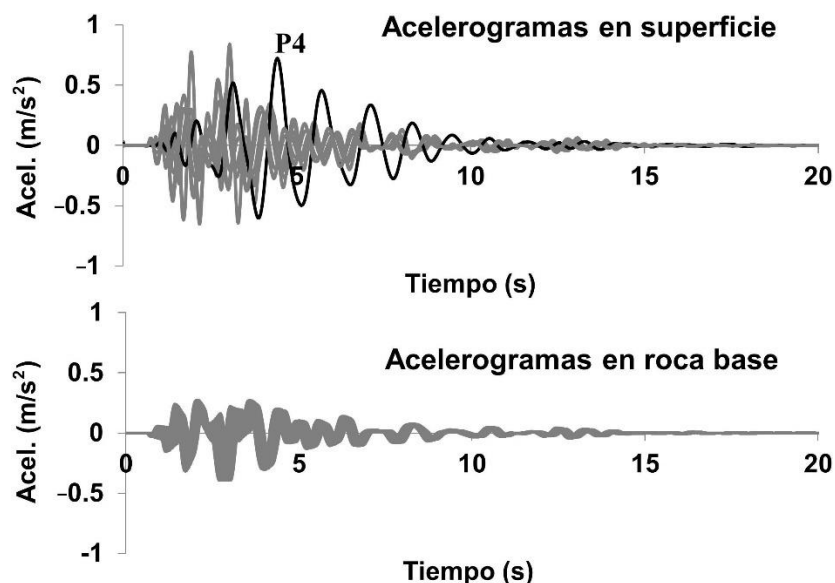


Figura 43. Aceleraciones del terreno en la roca base y en superficie.

Fuente: (Kagermanov, 2017).

Para ello, se requiere de los perfiles del suelo, incluyendo las características y propiedades de cada capa presente en el terreno. De esta forma se ha seleccionado un estrato de suelo representativo para cada una de las zonas de la MS del SGC; los estratos modelados en

Deepsoil (Versión 7.1.2.0) se obtuvieron del informe de Diaz et al. (2020). Específicamente, los perfiles escogidos son: UVO-v2 (Colinas A, Figura 45), Bmirados-v2 (Colinas B, Figura 46), PCaldas-v2 (Planicies A y B, Figura 47), BGonzales-v2rev (Terrazas Altas A, Figura 48) y Campobello (Terrazas Altas B, Figura 49), la ubicación de cada uno de esto perfiles se presenta en la Figura 44.

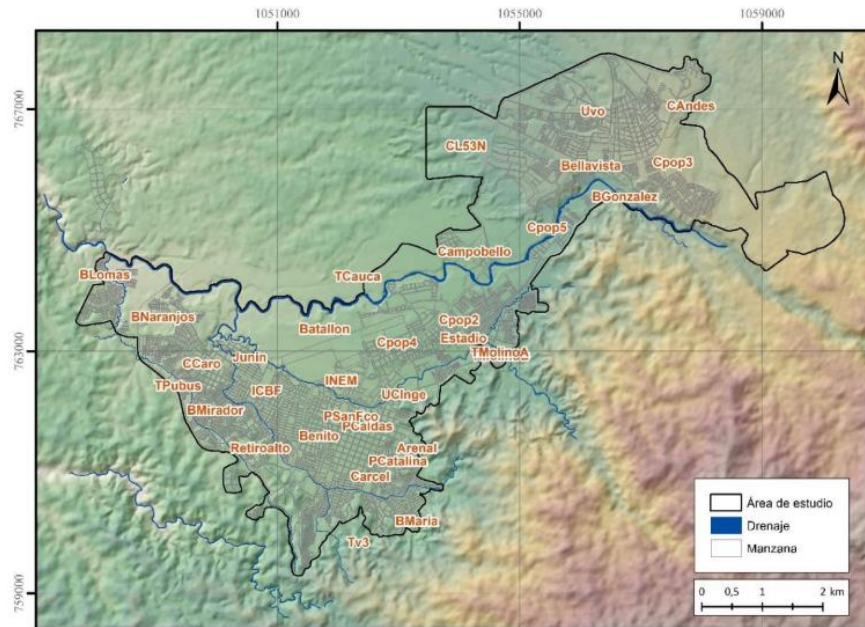


Figura 44. Localización de sitios modelados por el SGC.

Fuente: (Diaz et. al., 2020).

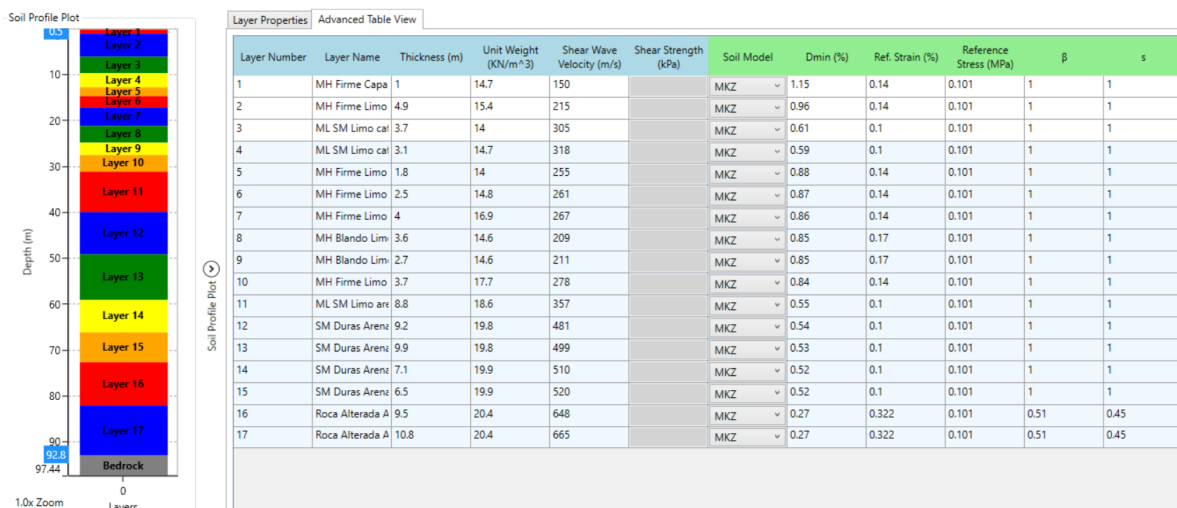


Figura 45. Perfil de suelo correspondientes a UVO-v2 (COLINAS A, zona homogénea definida por MS a cargo de SGC).

Fuente: (Diaz, et. al., 2020).

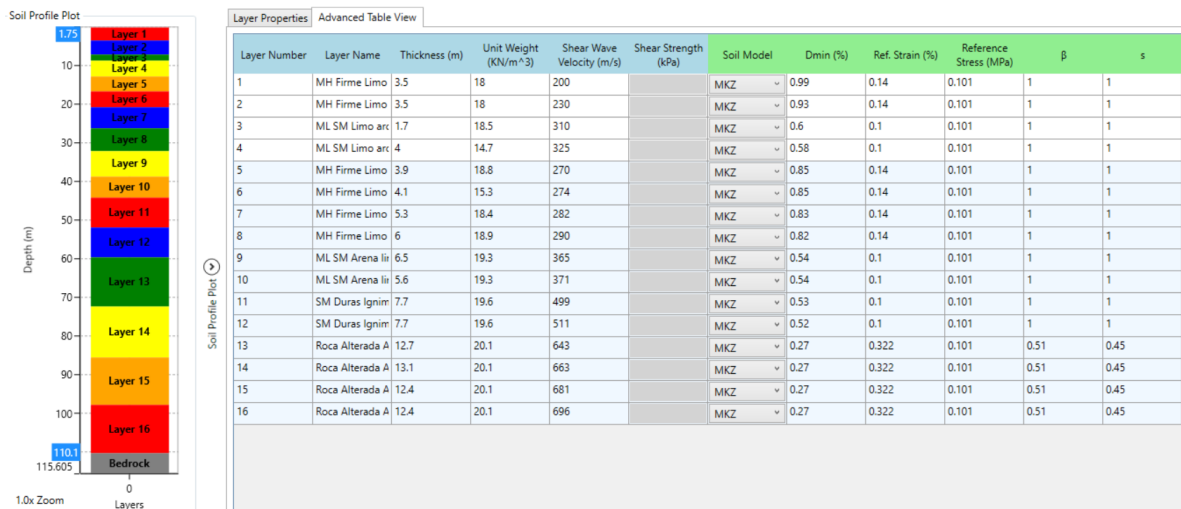


Figura 46. Perfil de suelo correspondientes a BMirador-v2 (COLINAS B, zona homogénea definida por MS a cargo de SGC).

Fuente: (Diaz, et. al., 2020).

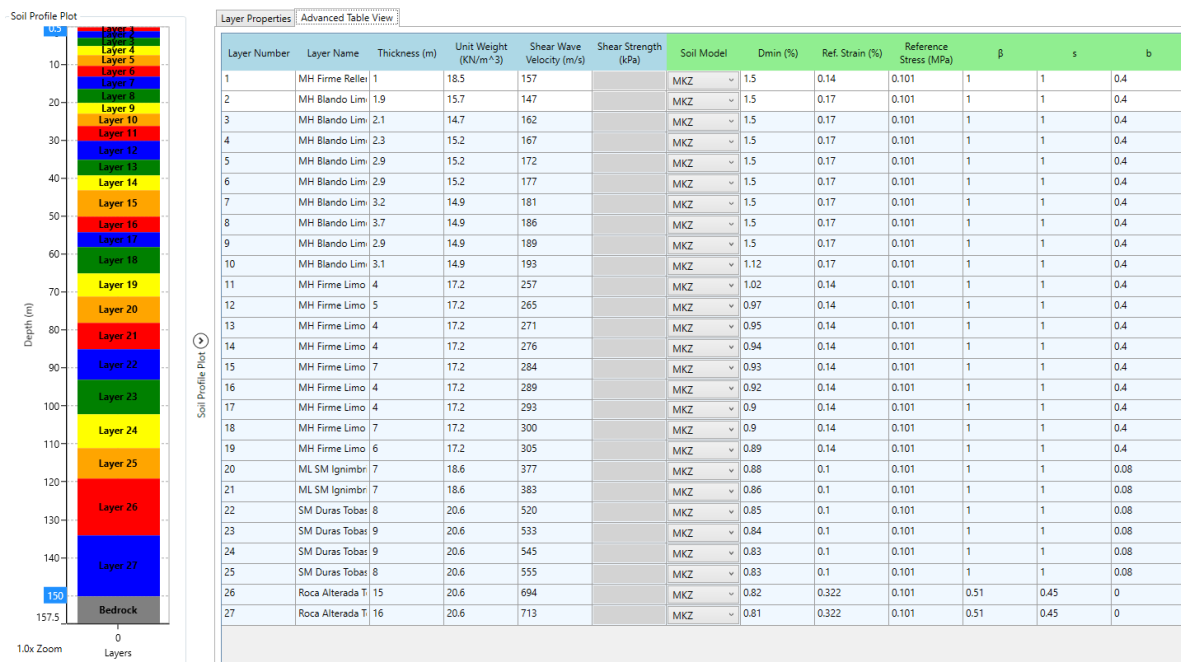


Figura 47. Perfil de suelo correspondientes a PCaldas-v2 (PLANICIES A y B, zona homogénea definida por MS a cargo de SGC).

Fuente: (Diaz, et. al., 2020).

Soil Profile Definition

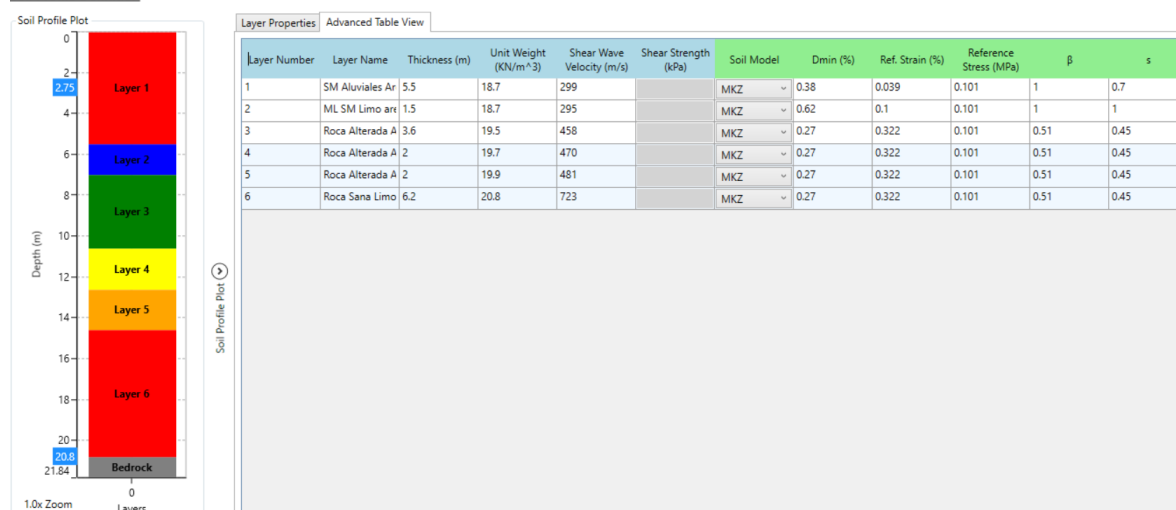


Figura 48. Perfil de suelo correspondientes a BGonzales-v2rev (Terrazas Altas A, zona homogénea definida por MS a cargo de SGC).

Fuente: (Diaz, et. al., 2020).

Soil Profile Definition

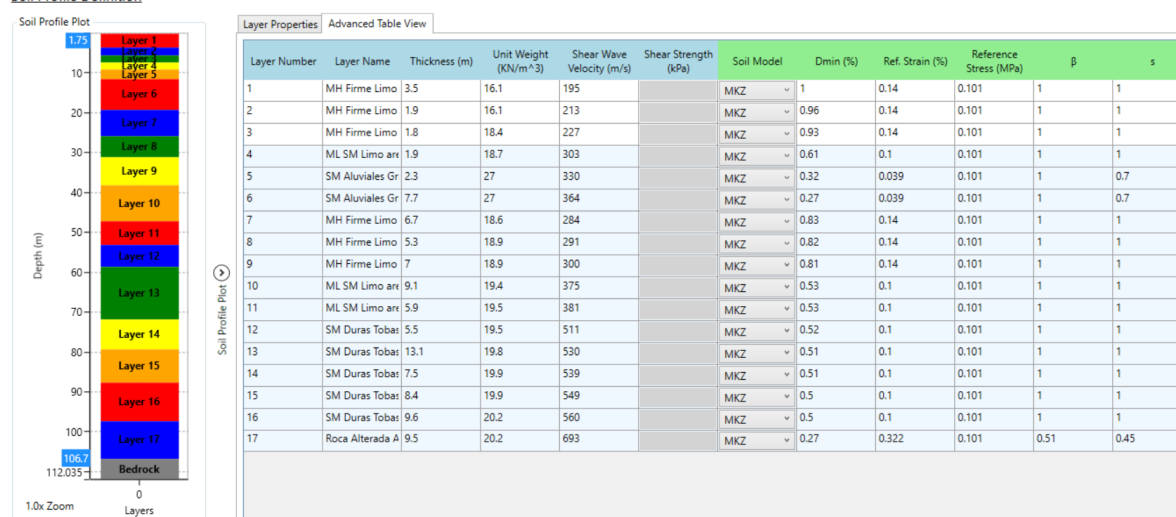


Figura 49. Perfil de suelo correspondientes a Campobellos-v2 (Terrazas Altas b, zona homogénea definida por MS a cargo de SGC).

Fuente: (Diaz, et. al., 2020).

Como se mencionó anteriormente es necesario definir las características del suelo, métodos de análisis, modelo de suelo, entre otros para poder obtener los espectros de respuesta según cada estrato frente a una señal sísmica. Para ello, es necesario elegir un método de análisis, entre los cuales se encuentra el Análisis Lineal, Equivalente lineal y No lineal, ya que este método considera de manera explícita propiedades no lineales del suelo, la relación entre el

suelo y las deformaciones es completamente no lineal y las propiedades del suelo cambian con cada incremento de carga. Es adecuado usarlo donde se esperan grandes deformaciones y el comportamiento no lineal del suelo es significativo, siendo crucial para la evaluación de riesgos en zonas sísmicas, proporcionando una comprensión detallada del comportamiento del suelo durante eventos extremos (Flores, et al., 2014).

Con este método de análisis, el tipo de solución (Solution Type) permite una única opción: Dominio de frecuencia (Frequency domain), esto se refiere al desarrollo de historias temporales de movimientos del terreno. Ya que en ocasiones los parámetros del terreno no describen los efectos de sacudidas de forma representativa, para analizar problemas no lineales se necesitan historias de tiempo de movimiento. El método de dominio de frecuencia (Frequency domain) genera movimientos que pueden generarse de manera conveniente en el dominio de la frecuencia combinando un espectro de amplitud y uno de fase de Fourier (Kramer, 1996).

La configuración de los parámetros sobre la determinación del análisis como lo son la definición de esquiempo eficaz ($SSR=0.65$) la formulación del módulo de cizallamiento complejo (Frecuencia independiente), el dominio del tiempo (Flexible), el esquema de integración (Implícito) y el método de interpolación de la historia del tiempo (Lineal en el dominio del tiempo) se hicieron según las recomendaciones del software.

6.2.2.2. SELECCIÓN DE SEÑALES SÍSMICAS

En cuanto a la selección de señales sísmicas necesarias para hallar la respuesta del suelo en superficie, los estudios de microzonificación de la Universidad de los Andes (2012) y Servicio Geológico Colombiano (2020) concuerdan en que en el país no se dispone de registro sísmicos confiables compatibles con los criterios de selección de amenaza relacionados con la magnitud, distancia, nivel de intensidad y aceleración. Por esta razón, tal como se mostró en la Sección 4.3 se tomaron sismos de diferentes partes del mundo que fueran compatibles con las condiciones sísmicas de la región.

A partir de las señales sísmicas recopiladas por las MS, las cuales se presentan en el Anexo 1 se investigaron nuevos escenarios sísmicos que fueran consistentes con las condiciones sismológicas, pero que fueran más críticas para la ciudad y así por medio del software Deepsoil (Versión 7.1.2.0) obtener espectros de respuesta del suelo que muestre aceleración requerida para determinar el cortante basal y la deriva y compararla con lo obtenido de los estudios. Para ello, se buscaron nuevas señales sísmicas que hubieran ocurrido en puntos cercanos al de los sismos seleccionados por las microzonificaciones, pero con una magnitud mayor y/o profundidad menor, con tal de incrementar los efectos que tendrían sobre las estructuras.

De acuerdo con las bases de datos de la Universidad de los Andes (2012) y SGC (Díaz et al., 2020), los sismos fueron seleccionados a partir de las bases de datos de movimiento fuerte Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) de la Universidad de California,

Berkeley; e Instituto de Ingeniería de la UNAM (provenientes de la Red de Acelerógrafos de Guerrero). Estos sismos cumplieron con características tectónicas similares a las de la zona de estudio identificando dos grupos de señales a elegir: uno con magnitudes entre 5.25 y 6.75 [Mw] con distancias menores a 25 Km, de ambientes tectónicos corticales, tal y como se caracterizó el sismo de 1983 de Popayán; y otro con magnitudes entre 6.25 a 7.25 [Mw] con distancias alrededor de 125 Km de ambientes tectónicos de subducción.

El sismo del 31 de marzo de 1983 de Popayán ha sido uno de los más graves en la región, con una profundidad de 15 Km, con una magnitud de 5.6 Mw y una intensidad máxima de VIII en la escala de Mercalli Modificada, causando una destrucción severa donde 4.964 construcciones quedaron destruidas, 13.796 viviendas presentaron daños muy graves (SGC, 2023). Este sismo fue causado en las fallas que hacen parte del sistemas Romeral, cuyo trazo se encuentra a pocos kilómetros de la ciudad de Popayán en dirección Norte-Sur. Sin embargo, no es posible utilizarlo directamente para obtener la respuesta del suelo, por no existir los registros de señales sísmicas adecuados, debido a la poca o nula instrumentación que existía en la ciudad para ese entonces.

De este modo, de las bases de datos PEER y UNAM se obtuvieron la ubicación, fecha, profundidad y magnitud de sismos que cumplían con las características tectónicas similares de mayor magnitud y/o menor profundidad y se presentan en las Figura 50 al 53. En las tablas presentadas en las Figuras 50 y 52 se presenta una columna de “Sismo utilizado por la MS” que corresponde al sismo de la base de datos de la microzonificación y en la columna de “Sismo próximo al usado en la MS” se presenta la información de los sismos que fueron encontrados cerca al sismo de la base de datos de la MS. De los sismos próximos se seleccionó la señal sísmica para ser analizada en este trabajo.

Datos del sismo	Sismo utilizado por la MS: NUXCO	Sismo próximo al usado en la MS
Fecha	15/07/1996	18/04/2014
Profundidad (Km)	20	10
Magnitud	6.5	7.2
Distancia entre sismos	30.22 Km	

Datos del sismo	Sismo utilizado por la MS: OCOTITO	Sismo próximo al usado en la MS
Fecha	14/09/1995	20/03/2012
Profundidad (Km)	22	16
Magnitud	7.2	7.4
Distancia entre sismos	38.91 Km	

Datos del sismo	Sismo utilizado por la MS: LAS VIGAS	Sismo próximo al usado en la MS
Fecha	25/04/1989	24/10/1993
Profundidad (Km)	19	19
Magnitud	6.5	6.5
Distancia entre sismos	45 Km	

Datos del sismo	Sismo utilizado por la MS: COPALA	Sismo próximo al usado en la MS
Fecha	24/10/1993	14/09/1995
Profundidad (Km)	19	22
Magnitud	6.2	6.4
Distancia entre sismos	27.74 Km	

Figura 50. Sismos cercanos a los sismos utilizados por la UAN.

Fuente: Elaborado por los autores.

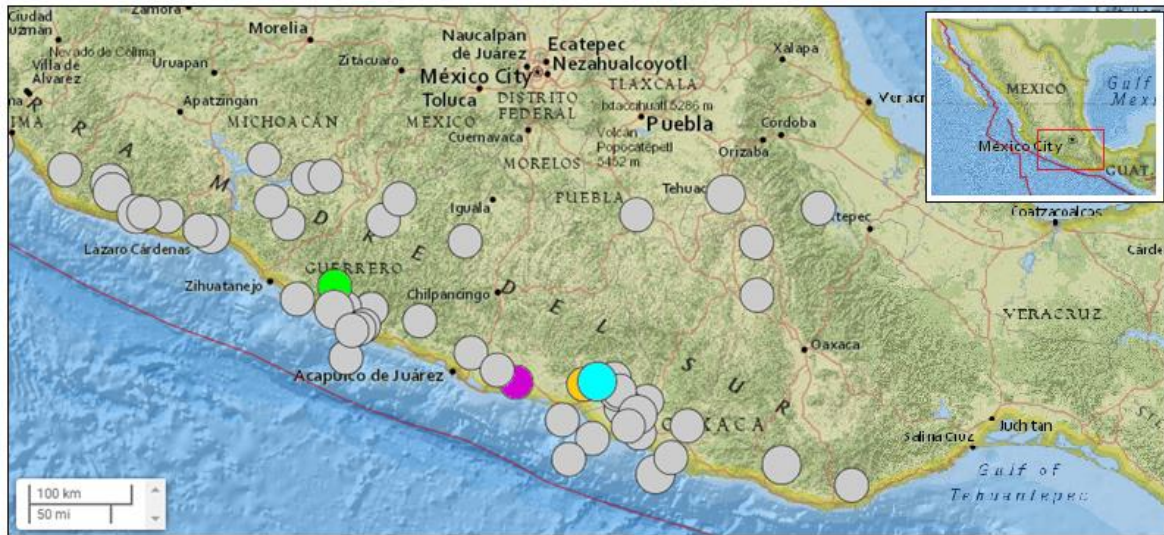


Figura 51. Ubicación de los sismos utilizados por la UAN.

Nota: En color verde: Sismo de Nuxco. Cian: Sismo de Ocotito. Morado: Sismo de Las vigas. Naranja: Sismo de Copala.

Fuente: Tomada de USGS por los autores.

Datos del sismo	Sismo utilizado por la MS: Imperial Valley	Sismo próximo al usado en la MS
Fecha	15/10/1979	4/04/2010
Profundidad (Km)	15	10
Magnitud	6.5	7.2
Distancia entre sismos	42.8 Km	

Datos del sismo	Sismo utilizado por la MS: San Fernando	Sismo próximo al usado en la MS
Fecha	9/02/1971	17/01/1994
Profundidad (Km)	8.9	18.2
Magnitud	6.6	6.7
Distancia entre sismos	27.32 Km	

Datos del sismo	Sismo utilizado por la Ms: Palm Springs	Sismo próximo al usado en la MS
Fecha	8/07/1986	28/06/1992
Profundidad (Km)	9.5	7
Magnitud	6	7.3
Distancia entre sismos	27.37 Km	

Figura 52. Sismos cercanos a los sismos utilizados por el SGC.

Fuente: Elaborado por los autores.



Figura 53. Ubicación de los sismos utilizados por el SGC.

Nota: En color Cian: Sismo San Fernando. Naranja: Sismo Palm Springs. Verde: Sismo Imperial Valley.

Fuente: Tomada de USGS por los autores.

De todos los sismos cercanos encontrados sobresale el sismo cerca al de PALM SPRINGS que se muestra en la Figura 54, por tratarse de un sismo con magnitud mayor en una profundidad menor. Este evento se denomina sismo de LANDERS y fue el usado en el desarrollo de este trabajo, para lo cual su señal sísmica se llevó al programa Deepsoil (Versión 7.1.2.0) para su respectivo análisis como se observa en la Figura 55.



Figura 54. Ubicación de los sismos seleccionados de la UAN.

Fuente: Tomada de USGS por los autores.

Nota: En color verde el sismo de Palm Springs. Cian: Sismo de California.

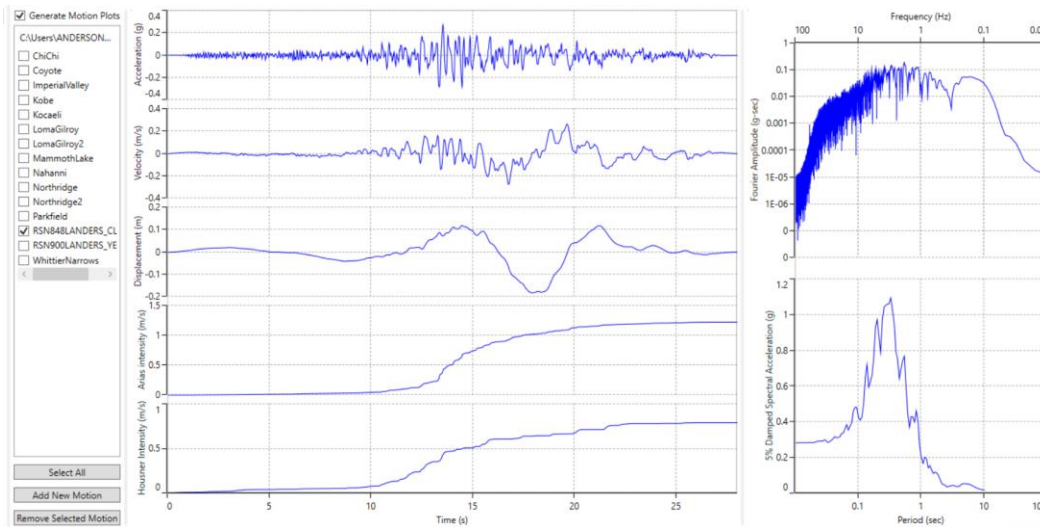


Figura 55. Gráficos espectrales y señal sísmica del sismo de PALM SPRINGS. Nombre de la estación: RSN848 LANDERS_CLW-LN.

Fuente: Tomada de Deepsoil (Versión 7.1.2.0) por los autores.

6.2.2.3. SELECCIÓN DE ESTRUCTURAS

En este análisis se seleccionaron estructuras de pórticos de 3 y 7 pisos con el propósito de evaluar un escenario sísmico. La elección se fundamenta en las observaciones en campo realizadas por Pérez et al (2020), quienes identificaron que la mayoría de las edificaciones con pórticos de concreto en la ciudad tenían 3 pisos. Además, se buscó analizar el comportamiento de una estructura de mayor altura dentro del contexto urbano por lo cual se escogió la estructura de 7 pisos.

Punto de Obs.	Material	Característica material	Sistema resistente	Característica sistema	Cubierta	Pisos									
						1	2	3	4	5	6	7-10	10-15	>15	
1	Mampostería	Arcilla, ladrillo bloque hueco	Muro	Confinada	Liviana		35.0%								
2	Mampostería	Arcilla, ladrillo bloque hueco	Muro	No reforzado	Liviana		5.0%								
3	Concreto	in situ, concreto	Pórtico	Dúctil	Pesada		10.0%								
4	Mampostería	Arcilla, ladrillo macizo	Muro	Confinada	Liviana			7.5%							
5	Concreto	in situ, concreto	Pórtico	Dúctil	Liviana			25.0%							
6	Concreto	in situ, concreto	Pórtico	Dúctil	Pesada				15.0%						
7	Mampostería	Arcilla, ladrillo macizo	Muro	Confinada	Liviana				2.5%						

Figura 56. Distribución espacial del número de edificaciones construidas en pórticos de concreto con muros de mampostería.

Fuente: (Universidad de los Andes, 2012).

6.2.3. CÁLCULO DE DERIVA Y CORTANTE BASAL CON ETABS

Para obtener resultados de deriva y cortante basal en todas las condiciones planteadas en la Sección 6.1.3. se hizo uso del software ETABS (Versión 21.2.0), en el cual se modelaron las estructuras prototipo y se sometieron a un análisis estático lineal (FHE).

En las estructuras de pórticos se modelaron los elementos estructurales de vigas y columnas y las losas de entrepiso, todas ellas en concreto reforzado, además se consideró una carga adicional correspondiente a elementos no estructurales de 3.1KN/m². Las propiedades de los materiales se presentan a continuación:

$$f'c = 21MPa = 3000psi$$

$$Ec = 4700 \sqrt{f'c}$$

$$Ec = 4700 \sqrt{21} = 21538.10577Mpa$$

$$\gamma c = 24KN/m^3$$

En el software se configuraron estas propiedades de los materiales y se crearon las secciones de los elementos correspondientes a las vigas, columnas y losas. Así se crearon los respectivos edificios definiendo apoyos empotrados en las columnas del nivel cero, para simular la cimentación y se definieron los diafragmas rígidos para cada entrepiso como se indica en la Figura 57.

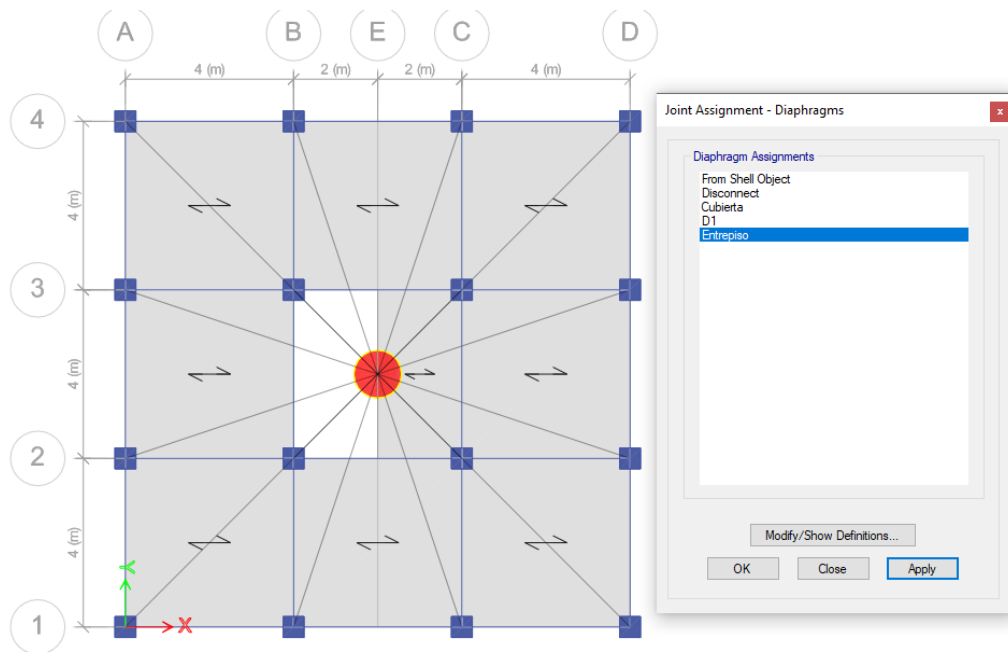


Figura 57. Creación del diafragma de piso en el software ETABS.

Fuente: Elaborado en ETABS (Versión 21.2.0) por los autores.

Dentro del software se definieron los patrones de carga, los cuales corresponden a carga muerta (Dead), carga viva (Live), carga muerta adicional (Superdead), carga lateral de sismo en la dirección X (FHEx) y carga lateral de sismo en la dirección Y (FHEy). Estas dos últimas cargas son definidas por el método de la Fuerza Horizontal Equivalente (FHE) en ellas se debe especificar: la dirección de la fuerza y una excentricidad en la misma dirección con un valor del 5% la longitud del edificio en esa dirección, el valor de la pseudoaceleración (Base Shear Coefficient, C), el valor del coeficiente K (Building Height Exp., K); y el rango de pisos a los cuales se les aplica la fuerza, que son todos los pisos. Esta información se presenta en la Figura 58:

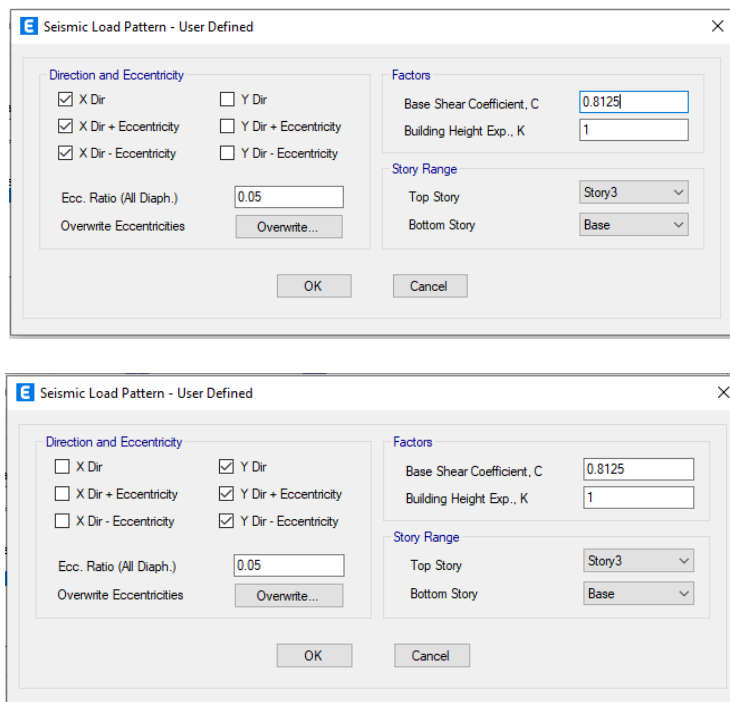


Figura 58. Configuración de las cargas sísmicas usadas en ETABS.

Fuente: Elaborado en ETABS (Versión 21.2.0) por los autores.

Para realizar el análisis, el software únicamente considera la masa propia de la estructura, ignorando las cargas muertas adicionales, sin embargo, estas últimas también influyen en la realidad en el análisis sísmico del edificio porque hacen parte del peso sísmico que debe ser considerado, por lo cual, se debe especificar las fuentes de masa adicionales que hacen parte del análisis, en este caso, la carga Superdead, como se indica en la Figura 59.

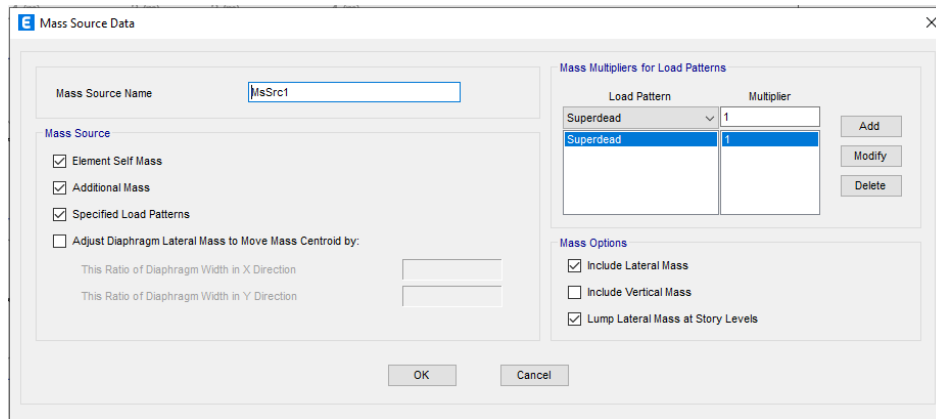


Figura 59. Consideración de la carga adicional dentro del peso del análisis sísmico.

Fuente: Elaborado en ETABS (Versión 21.2.0) por los autores.

Durante la ocurrencia de un sismo las ondas pueden provenir de cualquier dirección, por tanto, muchos códigos recomiendan analizar las estructuras en forma independiente en las dos direcciones ortogonales para obtener la máxima respuesta unidireccional. Bajo esta premisa, se busca combinar las máximas respuestas unidireccionales calculadas mediante los métodos espectrales para estimar la máxima respuesta bidireccional. En el caso de la NSR-10 se utiliza la regla de las combinaciones donde la máxima respuesta bidireccional se estima combinando los efectos del 100% de la máxima respuesta causada por la acción del sismo en una dirección y el 30% de la máxima respuesta causada por la acción del sismo en la dirección ortogonal. Por esta razón se crea las siguientes combinaciones de carga:

$$\begin{aligned}
 &S_x + 0.3S_y \\
 &S_x - 0.3S_y \\
 &-S_x + 0.3S_y \\
 &-S_x - 0.3S_y \\
 &S_y + 0.3S_x \\
 &S_y - 0.3S_x \\
 &-S_y + 0.3S_x \\
 &-S_y - 0.3S_x
 \end{aligned}$$

Donde, S_x es el sismo en dirección en X, y S_y en dirección Y.

Como se busca encontrar la máxima respuesta bidireccional, se debe crear una combinación de carga de tipo envolvente como se presenta en la Figura 60, donde considere los máximos efectos de todas las combinaciones de efectos ortogonales propuestos.

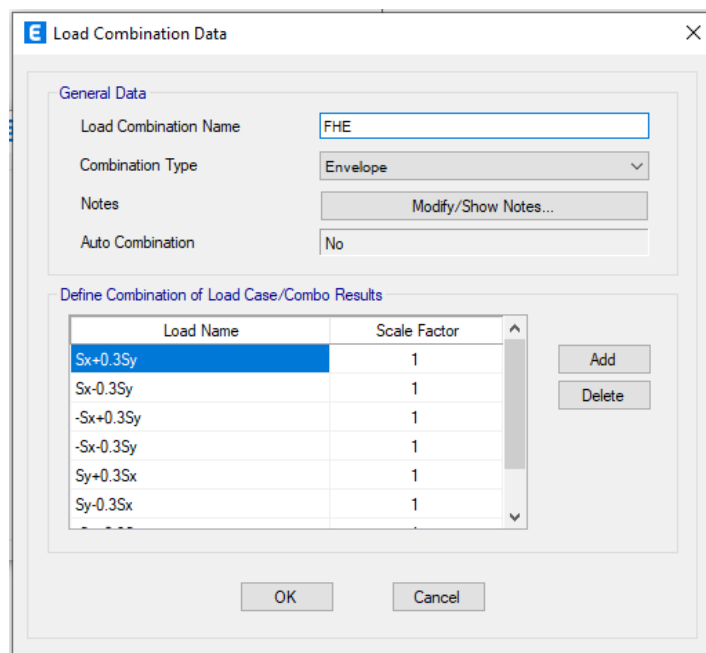


Figura 60. Creación de la envolvente de combinaciones de sismo en ETABS.

Fuente: Elaborado en ETABS (Versión 21.2.0) por los autores.

Con estos datos se procede a correr el programa y esperar los resultados del análisis estático. Los resultados se pueden observar en la opción “Show Tables” o “Story Response Plots”. En estas ventanas es posible observar todo tipo de resultados, desde datos del modelo, hasta análisis y diseño. Para este caso de comprobación de derivas y cortantes basales, existen varias tablas y gráficas que muestran los resultados, pero en este trabajo como se cuenta con una estructura regular se usara la tabla de “Story Drifts” y “Base Reactions”. Esta información se puede observar gráficamente con la opción “Story Response Plots”, como se muestran en la Figura 61:

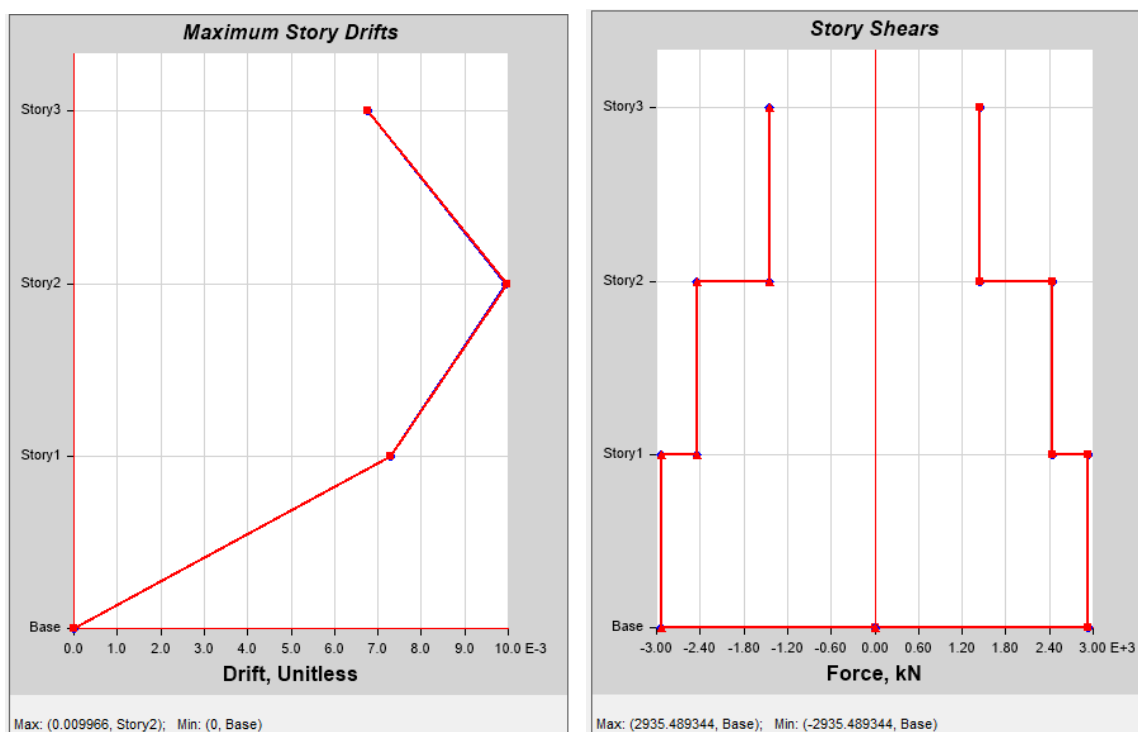


Figura 61. Visualización de los resultados de derivas de piso y cortantes de piso en ETABS.

Fuente: Elaborado en ETABS (Versión 21.2.0) por los autores.

6.2.4. CONSTRUCCIÓN DEL MAPA PARA RESULTADOS DE LA UAN

Como se describe en la Sección 4.1., la Microzonificación de la Universidad de los Andes está construida a partir de isolíneas que conectan los puntos de la ciudad donde se espera haya un factor de F_a o F_v igual. Por tanto, existen muchos puntos en el mapa para evaluar los factores de amplificación y comprobar el comportamiento estructural. Esta cantidad de puntos no es posible abordarlas a través del análisis de FHE en el software ETABS porque no es un proceso eficiente.

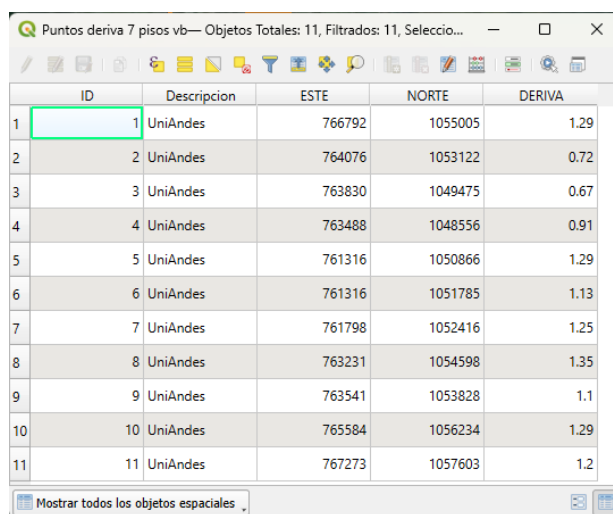
Por esta razón, con el fin de abordar el comportamiento de toda la ciudad, se decidió construir un mapa con el mismo formato de isolíneas, pero teniendo como variables la deriva. Para ello, se usó el software QGIS (Versión 3.34.9), el cual es un Sistema de Información Geográfica profesional de código abierto, que posibilita la creación, visualización, análisis, edición y publicación de información geoespacial. QGIS permite la creación de mapas con numerosas capas que pueden ser unidas en diferentes formatos (Ceupe, 2024).

En QGIS, la construcción del mapa de isolíneas se realizó mediante un proceso de interpolación espacial, específicamente, utilizando el método de ponderación inversa a la distancia (IDW, por sus siglas en inglés). Este método asigna un peso a cada punto de muestra de manera que la influencia de un punto en la estimación de un nuevo valor disminuye a

medida que la distancia entre ellos aumenta, en otras palabras, los valores más cercanos tienen mayor peso en la predicción de nuevos datos en comparación a los más alejados.

Para este estudio, la interpolación IDW se aplicó a los valores de deriva máxima obtenidos en los análisis estructurales permitiendo generar un modelo continuo reflejando la variación de este parámetro a lo largo de toda el área de la ciudad de Popayán, este enfoque es beneficioso ya que permite identificar tendencias en los resultados y las zonas más vulnerables proporcionando una herramienta visual para los distintos análisis posteriores.

Una vez identificados los puntos que se usaron para la interpolación, se les asignó las coordenadas correspondientes para que el lugar en el mapa satelital sea el mismo que la perforación en campo realizada por la UAN para su microzonificación, el sistema de referencia de coordenadas fue MAGNA-SIRGAS / Colombia West Zone EPSG:3115, la georeferenciación de cada uno de los puntos se presenta en la Figura 62.



ID	Descripcion	ESTE	NORTE	DERIVA
1	1 UniAndes	766792	1055005	1.29
2	2 UniAndes	764076	1053122	0.72
3	3 UniAndes	763830	1049475	0.67
4	4 UniAndes	763488	1048556	0.91
5	5 UniAndes	761316	1050866	1.29
6	6 UniAndes	761316	1051785	1.13
7	7 UniAndes	761798	1052416	1.25
8	8 UniAndes	763231	1054598	1.35
9	9 UniAndes	763541	1053828	1.1
10	10 UniAndes	765584	1056234	1.29
11	11 UniAndes	767273	1057603	1.2

Figura 62. Coordenadas de los puntos seleccionados para la construcción de los mapas de isolíneas partir de derivas máximas, caso de derivas específicas para el edificio de pórticos de 7 pisos.

Fuente: Elaborado en QGIS (Versión 3.34.9) por los autores.

La interpolación se hizo sobre una imagen ráster que abarca toda el área del casco urbano de Popayán, permitiendo representar de manera continua la variación espacial del parámetro de deriva máxima de las edificaciones, garantizando que sean consideradas todas las zonas de la ciudad sin limitarse únicamente a los puntos de muestreo originales Figura 63.

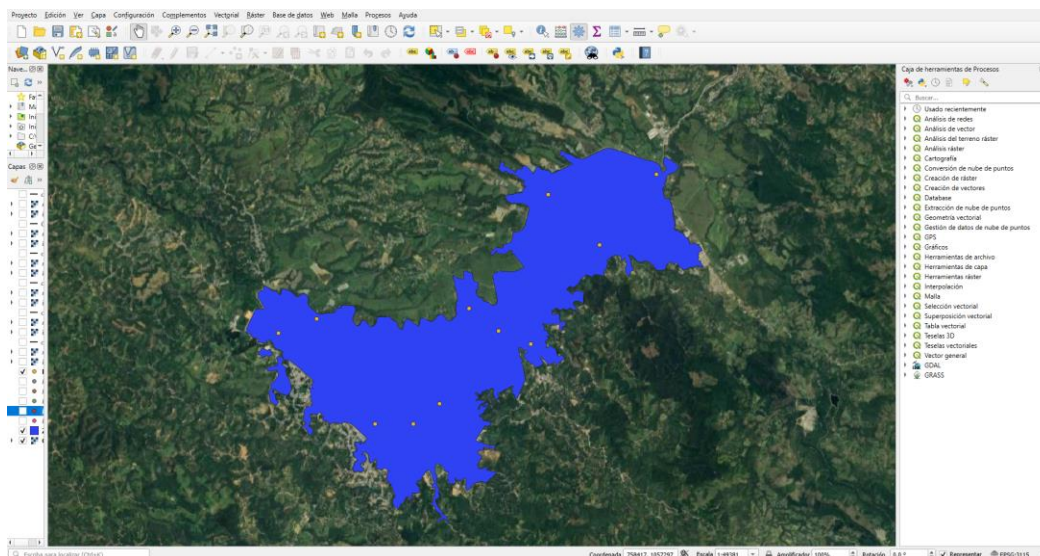


Figura 63. Imagen ráster de la morfología urbana de Popayán sobre mapa satelital de Google.

Fuente: Base cartográfica: Google satélite. Datos ráster: Elaborado en QGIS (Versión 3.34.9) por los autores.

Al aplicar la interpolación sobre el ráster se obtuvo un modelo espacial detallado que refleja la distribución de los valores de deriva, convirtiéndose en una herramienta visual clave para la evaluación del riesgo sísmico. Además, este enfoque permite superponer la información con otros mapas, mejorando la contextualización de los resultados. El anterior proceso se repitió con cada una de las estructuras analizadas para visualizar el comportamiento estructural de cada una de ellas en función de la ubicación como se muestra en la Figura 64. Se adicionaron elementos los cuales permiten entender el grafico de una forma más sencilla haciendo posible conocer el valor de deriva en cualquier lugar de la ciudad como se presenta en la Figura 65.

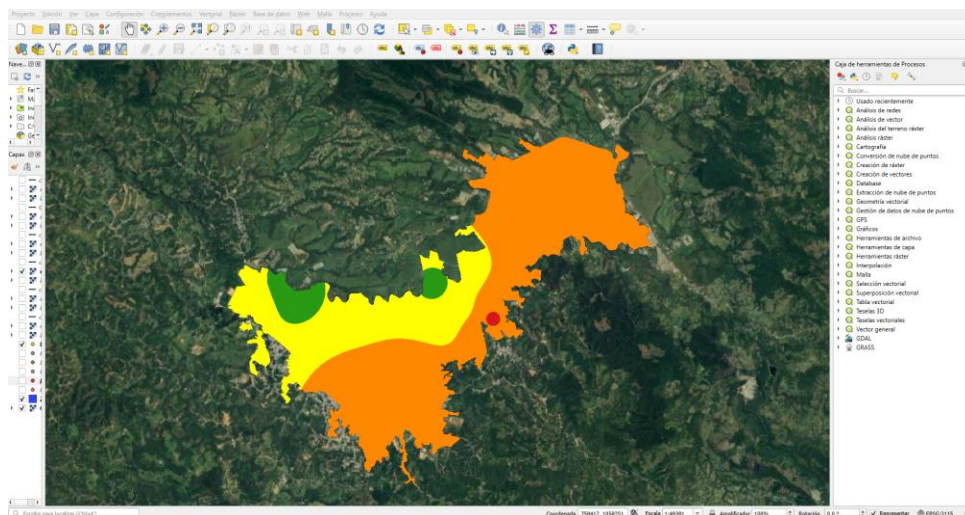


Figura 64. Interpolación IDW sobre imagen ráster, caso de derivas específicas para el edificio de pórticos de 7 pisos con los datos de la UAN.

Fuente: Elaborado en QGIS (Versión 3.34.9) por los autores.

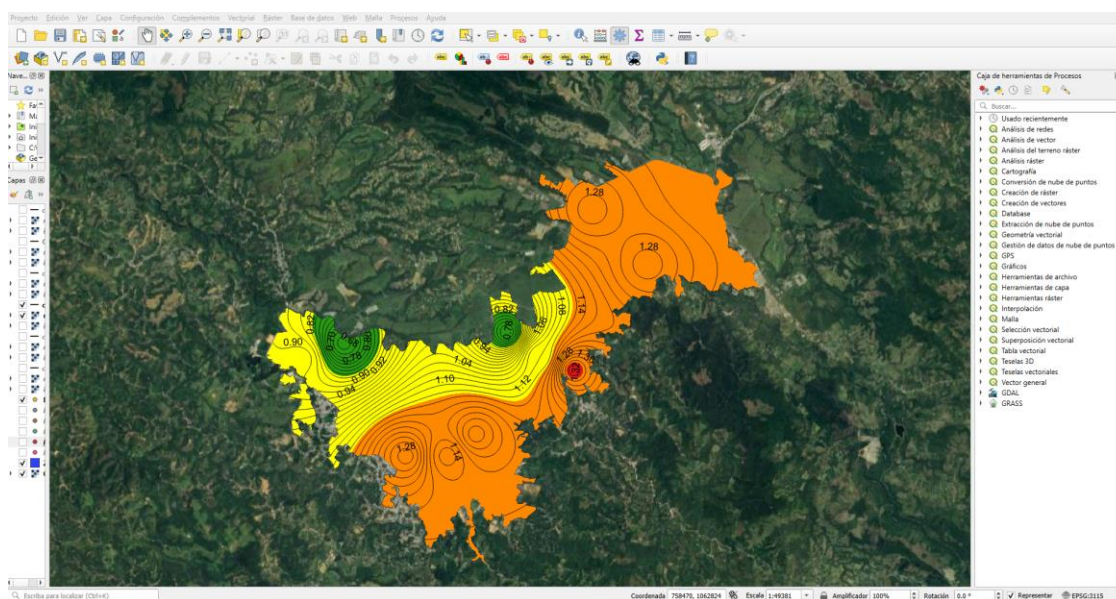


Figura 65. Resultado de la interpolación con valores e isolíneas, caso de derivas específicas para el edificio de pórticos de 7 pisos con los datos de la UAN.

Fuente: Elaborado en QGIS (Versión 3.34.9) por los autores.

6.2.5. DESARROLLO DEL PROGRAMA DE MAPA DE DERIVAS

Con el fin de analizar los resultados de derivas de manera más clara se creó un programa que muestra el impacto en el comportamiento estructural de la amplificación sísmica del suelo por medio de los niveles de daño estructural determinados por la deriva. Para ello, el programa muestra un mapa de la ciudad de Popayán, en la cual para cada uno de los tres

estudios analizados: NSR-10, MS del SGC (2020) y MS de la UAN (2012), se puede ver el comportamiento estructural de las edificaciones prototipo respecto a la deriva y el nivel de daño estructural, indicando a través de una escala de colores el nivel de daño al que pueden llegar las estructuras en cada una de las zonas de la ciudad. Esto facilita al usuario final la comprensión y aplicación de los resultados.

Como se describió en la Sección 2.3, existen diversas metodologías para medir el daño estructural, sin embargo, para este trabajo se optó por utilizar como base la metodología realizada por la FEMA (1997), la cual presenta como parámetro de evaluación la deriva de piso (véase Tabla 1.). Esta metodología es destacada por basarse en los datos disponibles de más de 8 autores, de forma que, según Andrade Insúa (2004), se considera lo suficientemente robusta.

De esta forma, la construcción del programa se realizó totalmente por los autores en el software de Matlab (Versión R2023b) y se apoyó en el componente App Designer para realizar la interfaz gráfica de usuario. Matlab es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada para analizar datos y crear modelos y para este caso se usó como herramienta para procesar los datos de deriva obtenidos durante este trabajo y construir mapas de la ciudad de Popayán en función de niveles de daño de forma automática.

La forma como se desarrolló el funcionamiento interno del programa se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 66 y el código completo desarrollado en Matlab se presenta en el Anexo 3.

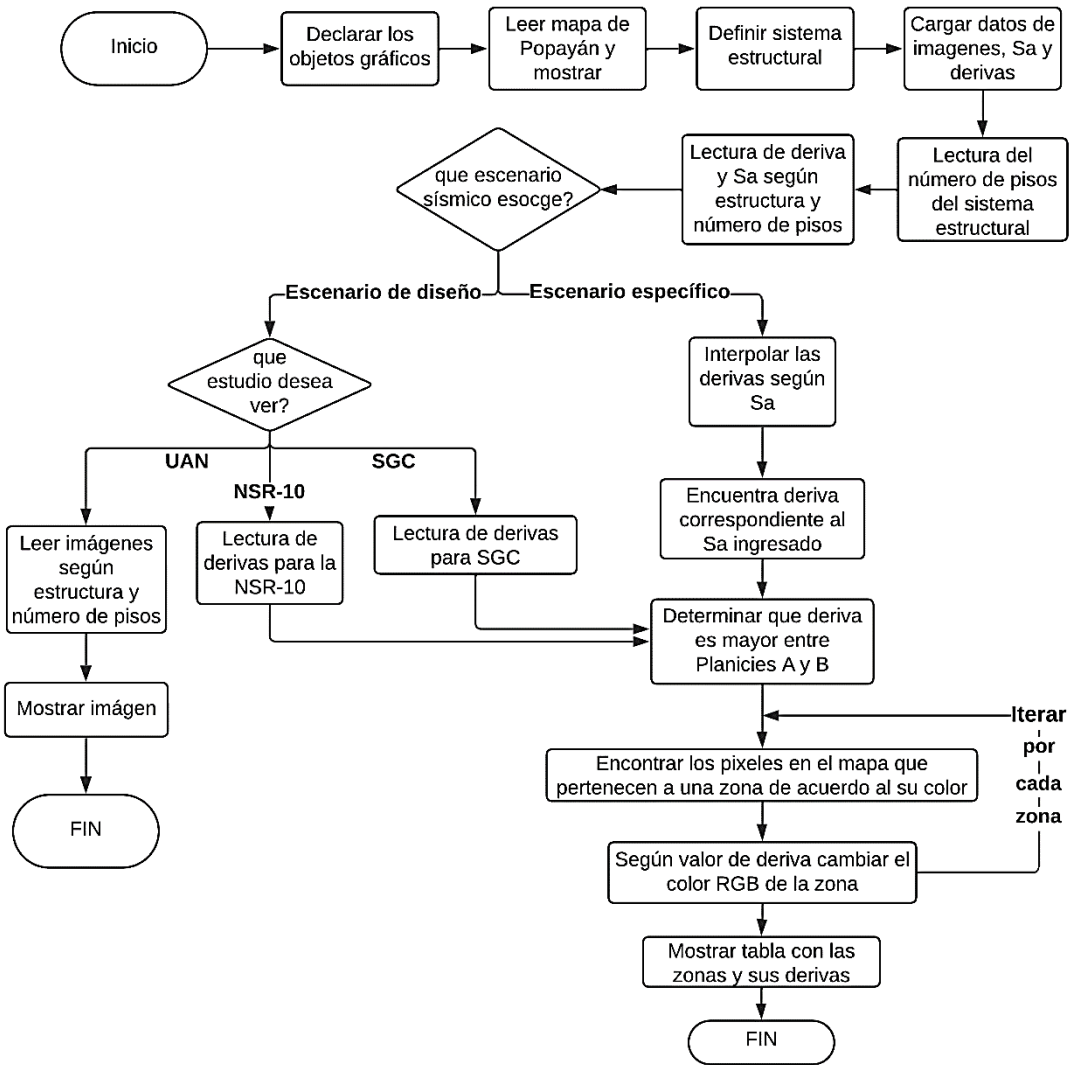


Figura 66. Diagrama de flujo del desarrollo del programa en Matlab

Fuente: Elaborado por los autores

De acuerdo con el diagrama anterior, para iniciar el usuario debe definir el sistema estructural que desea analizar, que para los alcances de esta investigación solo se encuentra disponible la opción de “Pórticos”; además se debe escoger el número de pisos que tendría la estructura que para el caso de los pórticos cuenta con opciones de 3, 5, 7 y 10 pisos. Una vez el usuario ha escogido estas opciones, puede elegir entre dos funcionalidades que se presentan enmarcadas en rojo en la Figura 67.

Riesgo sísmico en Popayán según microzonificación del SGC (2020)

Edificios prototipo diseñados con una deriva de 1% en suelo tipo D de la NSR-10

Sistema estructural

Niveles

☐ Comportamiento bajo escenario sísmico de diseño

Factores Fa y Fv provenientes de:

☐ MS de SGC ☐ MS de UAN ☐ NSR-10

☐ Comportamiento bajo escenario sísmico específico

Sa (%g) Terrazas A

Sa (%g) Colinas A

Sa (%g) Colinas B

Sa (%g) Terrazas B

Sa (%g) Planicies A

Sa (%g) Planicies B

Figura 67. Menú de opciones del programa de Riesgo Sísmico diseñado en Matlab

Fuente: Elaborado por los autores en Matlab (Versión R2023b)

En primer lugar, se tiene la funcionalidad del “Comportamiento bajo escenario sísmico de diseño” el cual utiliza los valores de deriva considerando los coeficientes de efecto de sitio de la NSR-10, la MS del SGC (2020) y la Ms de la UAN (2012), traídos como resultado del procesamiento de datos en el software ETABS (Versión 21.2.0) de acuerdo con la Tabla 20 a 21 que se presentarán más adelante. Para los estudios de la NSR-10 y del SGC (2020) el programa define las zonas de la ciudad considerando las zonas homogéneas que propone el estudio del SGC. Para lograr este análisis por zonas, Matlab lee la imagen del mapa de Popayán dado en el estudio de Pérez et. al., (2020), toma de referencia el color base de cada zona en el mapa y a través de una búsqueda del respectivo código RGB, pigmenta estas zonas con nuevos valores de RGB para representar el nivel de daño estructural según los rangos de las derivas.

En el caso del estudio de la UAN, como no cuenta con zonas definidas, los mapas donde se muestran los resultados de nivel de daño fueron construidos en el programa QGIS (Versión 3.34.9) como se presentó en la Sección 6.2.4. Estos mapas son traídos al programa en forma de imagen para ser mostrados ante las distintas posibilidades de sistema estructural y número de pisos.

Para observar los resultados de esta primera función, es necesario seleccionar la casilla “Comportamiento bajo escenario sísmico de diseño” y seleccionar el estudio del que se quiere obtener información. Luego se debe presionar el botón de “*CALCULAR*” y los resultados se actualizan en pantalla según el código de colores respectivos y se muestra en la parte inferior una tabla con los valores de derivas máximo para cada zona.

La segunda funcionalidad se denomina “Comportamiento bajo escenario sísmico específico” y consiste en ingresar manualmente valores de pseudoaceleración para cada una de las zonas establecidas por el SGC con el objetivo de que el programa entregue el valor probable de deriva apoyado en una interpolación de datos. Basándose en la información ya recolectada de ETABS se busca interpolar datos de deriva a partir de su correspondiente pseudoaceleración, ya que estos se comportan linealmente, con el fin de que se cubran la mayor cantidad de condiciones de aceleración sísmica y observar el comportamiento de la ciudad para cada una de las zonas homogéneas del SGC.

Para realizar esta interpolación se subieron los datos de pseudoaceleración y de deriva obtenidos de los tres estudios y con la función “*Interp1*” de Matlab (Versión R2023b) se interpoló para el rango de derivas del cual había información buscando valores cada 0.01 %g, es decir, que no se extrapoló la información, por tanto, los valores de pseudoaceleraciones que se deseen ingresar deben estar dentro de un rango especificado por el programa para cada configuración estructural dada. Luego de ingresar los valores de pseudo aceleración para cada una de las zonas, se debe presionar el botón de “*CALCULAR*” y se obtendrá un nuevo mapa reflejando este comportamiento.

La escala de colores y rango de derivas correspondientes para estructuras de pórticos se presenta en la Tabla 13, y también se muestran en la esquina inferior derecha del mapa en la interfaz del programa:

Tabla 13. Convenciones de escala de color para niveles de daño para estructuras de pórticos.

Número de pisos	Daño Leve	Daño Moderado 1	Daño Moderado 2	Daño Moderado 3	Daño Severo	Daño completo
1 a 3	0.005	0.008	0.010	0.015	0.020	0.05
4 a 7	0.0033	0.0053	0.0083	0.0113	0.0133	0.033
8 a más	0.0025	0.004	0.007	0.010	0.012	0.025
Color	Verde claro	Verde	Amarillo	Naranja	Rojo	Rojo Oscuro

Fuente: Elaborado por los autores.

Para validar el correcto funcionamiento del programa en las dos funcionalidades se compararon los datos de deriva entregados para cada estudio y número de pisos con los datos encontrados con el programa de ETABS y se verificó que fueran los mismos valores. Así también se verificaron que las zonas estuvieran pigmentadas del color correcto de acuerdo con la deriva arrojada como se mostró en la Tabla 19. En los casos donde algún valor de deriva o color de zona fuera inconsistente se volvieron a revisar los rangos y condiciones dados en el programa para cada zona y estructura para identificar en donde se estaban presentado errores y corregirlos.

Finalmente, esta herramienta enlazada con un programa de procesamiento de señales sísmicas que permita obtener la respuesta a nivel del suelo, como el programa de Deepsoil,

puede brindar un acercamiento del comportamiento estructural, en cuestión de derivas, frente a un evento sísmico específico y considerando la respuesta de los suelos que existen realmente en cada punto de la ciudad.

7. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo, iniciando con la comparación de las microzonificaciones de estudio, luego se presentan los resultados del análisis estático relacionado con pseudoaceleración, deriva máxima y cortante basal de las estructuras prototipo. Después de ello se muestran los resultados producto del uso del software Deepsoil (Versión 7.1.2.0) y la construcción de mapas a través de las herramientas QGIS (Versión 3.34.9) y Matlab (Versión R2023b) considerando tanto los coeficientes de amplificación de la UAN como del SGC para observar el comportamiento a lo largo de la ciudad.

7.1. COMPARACIÓN DE F_a Y F_v

Para comparar los factores F_a y F_v se construyeron espectros elásticos de diseño a partir de las ecuaciones entregadas por el espectro de la NSR-10 (Véase Figura 24), pero teniendo como factor diferenciador entre cada uno de ellos, los factores F_a y F_v pertenecientes a cada uno de los estudios. En la Figura 68, se presentan los espectros de diseño de cada una de las zonas del SGC y la NSR-10. Para obtener los espectros correspondientes a los puntos NSR, se usó los factores correspondientes para Popayán en un suelo C, D y E, ya que estos suelos están presentes a lo largo de todo el municipio. Así mismo, en la Figura 69 se realizaron espectros para los 11 puntos analizados en la MS a cago de la UAN.

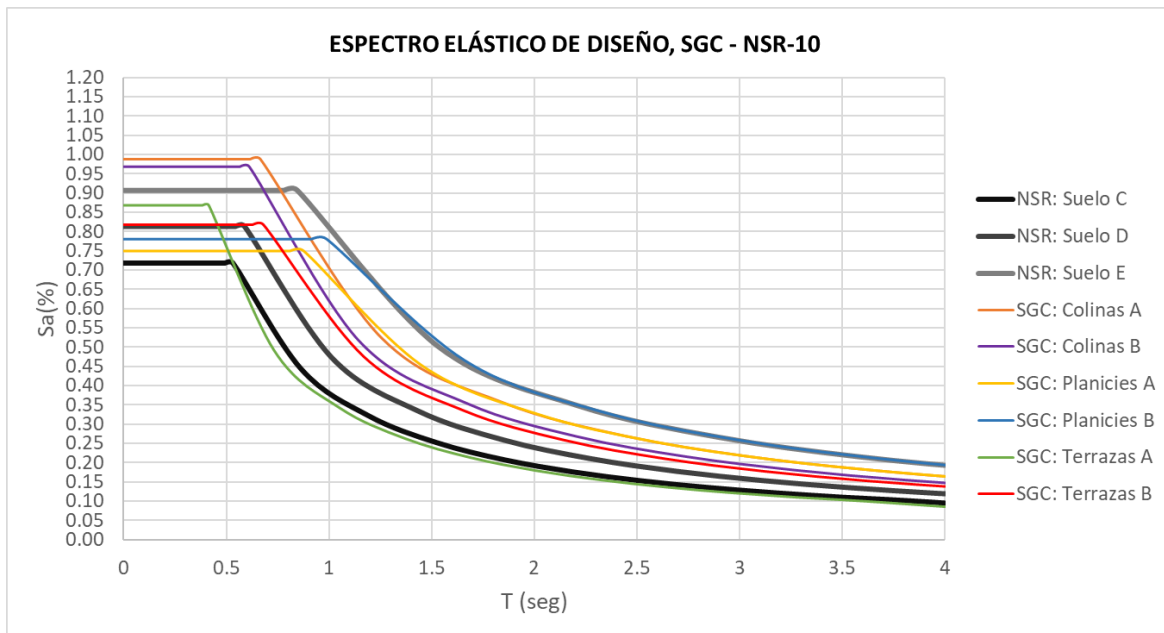


Figura 68. Espectro de diseño correspondientes a las zonas de la MS del SGC y puntos de la NSR.

Fuente: Elaborado por los autores.

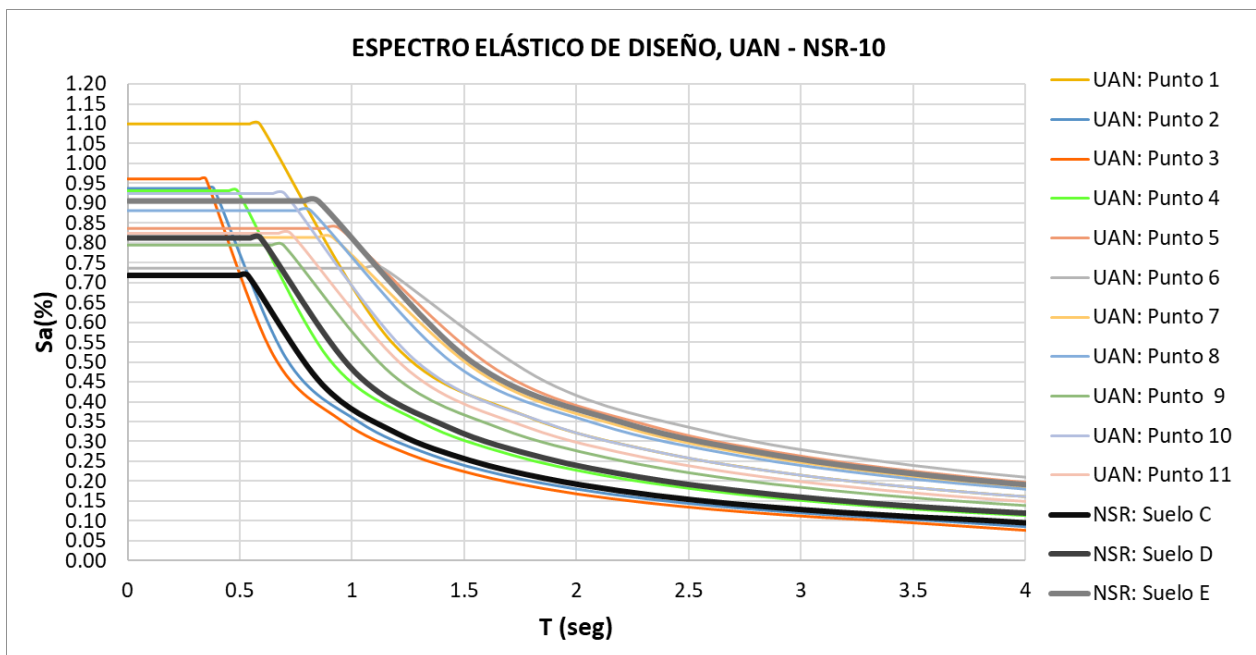


Figura 69. Espectro de respuesta correspondientes a los puntos de la MS del UAN y puntos de la NSR

Fuente: Elaborado por los autores.

7.2. RESULTADOS DE DERIVA Y CORTANTE BASAL

En esta sección se presentan los resultados del análisis estático lineal FHE provenientes del software ETABS (Versión 21.2.0). En las Tablas 14 al 16 se presentan los resultados de los edificios prototipo de pórticos en concreto reforzado de pseudoaceleración (S_a (%g)), deriva máxima (%) y cortante basal (KN) respectivamente.

Tabla 14. Resultados de pseudoaceleraciones para edificios prototipos de pórticos.

Sa (%g)					
Estudio referente	Identificación del punto de análisis	Pórtico 3 pisos	Pórtico 5 pisos	Pórtico 7 pisos	Pórtico 10 pisos
MS SGC	Terrazas A	0.869	0.667	0.468	0.336
	Colinas A	0.988	0.988	0.739	0.532
	Colinas B	0.969	0.969	0.770	0.554
	Terrazas B	0.819	0.819	0.723	0.520
	Planicie A	0.750	0.750	0.750	0.615
	Planicie B	0.781	0.781	0.781	0.722
MS Uniandes	1	1.100	1.100	0.842	0.606
	2	0.938	0.620	0.468	0.336
	3	0.963	0.622	0.436	0.314
	4	0.931	0.844	0.592	0.426
	5	0.838	0.838	0.838	0.740
	6	0.738	0.738	0.738	0.738
	7	0.813	0.813	0.813	0.695
	8	0.881	0.881	0.881	0.673
	9	0.794	0.794	0.717	0.516
	10	0.925	0.925	0.842	0.606
	11	0.825	0.825	0.779	0.561
NSR-10	Suelo tipo C	0.719	0.711	0.499	0.359
	Suelo tipo D	0.813	0.813	0.623	0.449
	Suelo tipo E	0.906	0.906	0.906	0.718

Fuente: Elaborado por los autores.

Tabla 15. Resultados de deriva máxima para edificios prototipos de pórticos.

Deriva máxima (%)					
Estudio referente	Identificación del punto de análisis	Pórtico 3 pisos	Pórtico 5 pisos	Pórtico 7 pisos	Pórtico 10 pisos
MS SGC	Terrazas A	1.05%	0.79%	0.72%	0.73%
	Colinas A	1.20%	1.17%	1.11%	1.16%
	Colinas B	1.17%	1.15%	1.14%	1.21%
	Terrazas B	0.99%	0.97%	1.18%	1.14%
	Planicie A	0.91%	0.89%	1.15%	1.34%
	Planicie B	0.94%	0.93%	1.20%	1.58%
MS Uniandes	1	1.33%	1.30%	1.29%	1.32%
	2	1.13%	0.74%	0.72%	0.73%
	3	1.18%	0.74%	0.67%	0.69%
	4	1.13%	1.00%	0.91%	0.93%
	5	1.01%	0.99%	1.29%	1.62%
	6	0.90%	0.87%	1.13%	1.61%
	7	0.98%	0.96%	1.25%	1.52%
	8	1.07%	1.04%	1.35%	1.47%
	9	0.96%	0.94%	1.10%	1.13%
	10	1.12%	1.10%	1.29%	1.32%
	11	1.00%	0.98%	1.20%	1.23%
NSR-10	Suelo tipo C	0.87%	0.84%	0.77%	0.78%
	Suelo tipo D	0.98%	0.96%	0.97%	0.98%
	Suelo tipo E	1.10%	1.07%	1.39%	1.57%

Fuente: Elaborado por los autores.

Tabla 16. Resultados de cortante basal para edificios prototipos de pórticos.

Cortante basal (KN)					
Estudio referente	Identificación del punto de análisis	Pórtico 3 pisos	Pórtico 5 pisos	Pórtico 7 pisos	Pórtico 10 pisos
MS SGC	Terrazas A	3100.97	4372.12	4730.47	5035.87
	Colinas A	3525.62	6476.25	7307.98	7973.46
	Colinas B	3457.82	6351.71	7469.70	8303.19
	Terrazas B	2922.55	5368.47	7783.04	7793.61
	Planicie A	2676.33	4916.18	7580.89	9217.44
	Planicie B	2786.95	5119.38	7894.23	10821.12
MS Uniandes	1	3925.28	7210.40	8510.81	9082.55
	2	3347.19	4077.15	4730.47	5035.87
	3	3477.09	4077.15	4407.02	4706.14
	4	3322.21	5532.34	5983.85	6384.76
	5	2990.35	5493.01	8470.38	11090.90
	6	2664.69	4837.52	7459.59	11060.93
	7	2901.14	5309.48	8217.68	10416.45
	8	3143.79	5774.87	8905.02	10086.72
	9	2833.34	5204.60	7247.33	7733.66
	10	3300.80	6063.29	8510.81	9082.55
	11	2943.96	5407.80	7874.02	8408.10
NSR-10	Suelo tipo C	2565.71	4660.54	5043.82	5380.59
	Suelo tipo D	2901.14	5309.48	6388.16	6729.48
	Suelo tipo E	3233.00	5938.75	9157.71	10761.17

Fuente: Elaborado por los autores.

A continuación, en las Figuras 70 al 73 se presentan los resultados de deriva máxima de forma gráfica ubicando cada uno de los puntos de los estudios de las microzonificaciones en el mapa de Popayán para observar preliminarmente el comportamiento estructural a lo largo de la ciudad.



Figura 70. Valores de deriva para el edificio prototipo de pórticos de 3 pisos en los puntos de análisis de acuerdo con los estudios de SGC y UAN.

Fuente: Elaborado por los autores. Mapa de Popayán modificado de (CafetoMH, 2023).

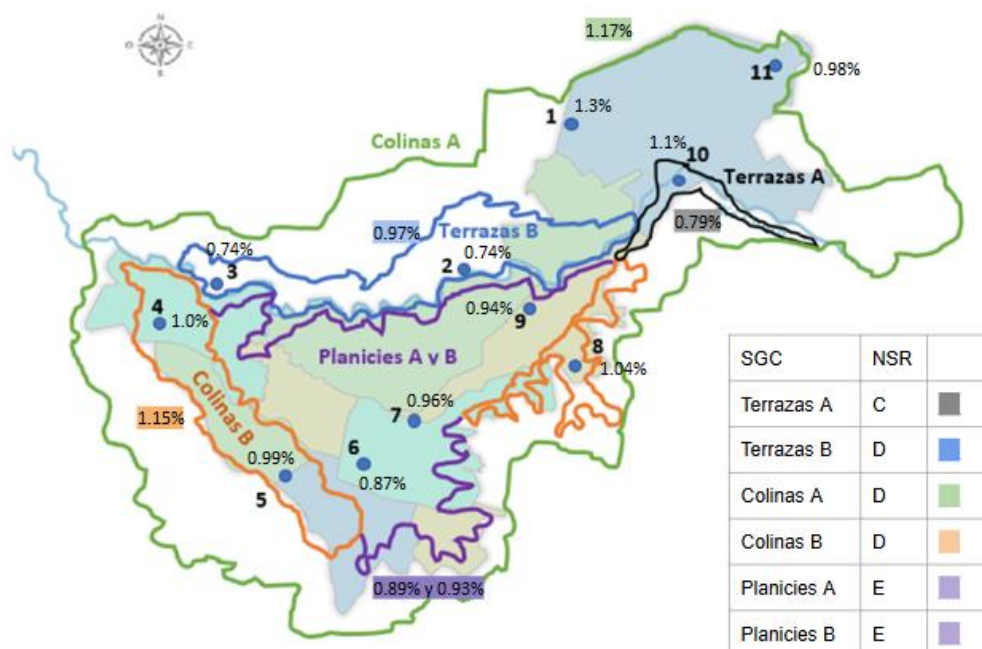


Figura 71. Valores de deriva para el edificio prototipo de pórticos de 5 pisos en los puntos de análisis de acuerdo con los estudios de SGC y UAN.

Fuente: Elaborado por los autores. Mapa de Popayán modificado de (CafetoMH, 2023).

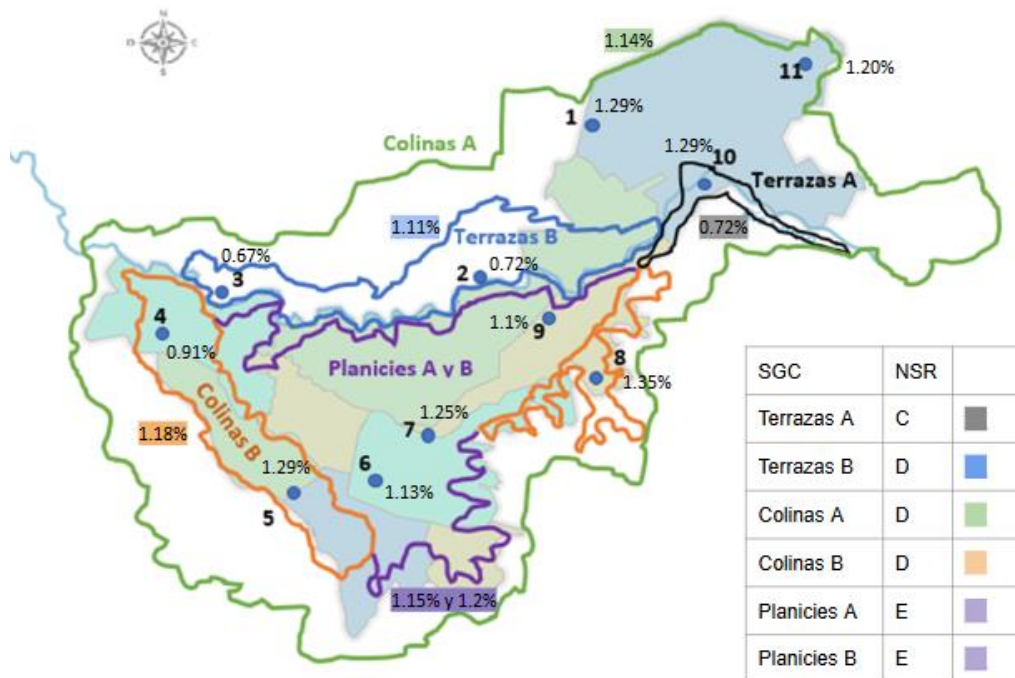


Figura 72. Valores de deriva para el edificio prototipo de pórticos de 7 pisos en los puntos de análisis de acuerdo con los estudios de SGC y UAN.

Fuente: Elaborado por los autores. Mapa de Popayán modificado de (CafetoMH, 2023).

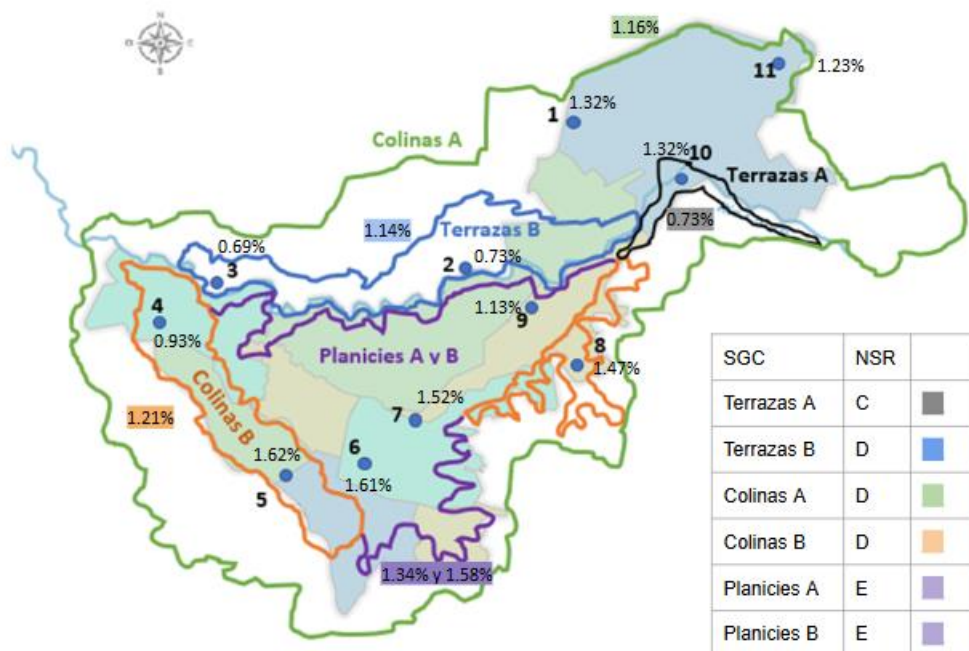


Figura 73. Valores de deriva para el edificio prototipo de pórticos de 10 pisos en los puntos de análisis de acuerdo con los estudios de SGC y UAN.

Fuente: Elaborado por los autores. Mapa de Popayán modificado de (CafetoMH, 2023).

Para comparar los resultados de deriva, se tomó como base el estudio realizado por Toro et. al. (2020) en el cual los autores presentan la estructura prototipo de 5 pisos y evalúan derivas frente a diferentes factores de F_a y F_v de acuerdo con la microzonificación sísmica de Ibagué. En este estudio, para la zona “Suelo D” la estructura presenta las mismas dimensiones de columnas y vigas que las mostradas en este trabajo, como se muestra en la Figura 74, sin embargo, se desconocen el peso de las cargas vivas y muertas de los entrepiso; de acuerdo con los factores A_a de 0.20 y F_a de 1.4 del lugar de estudio se obtiene una pseudoaceleración de 0.70%g.

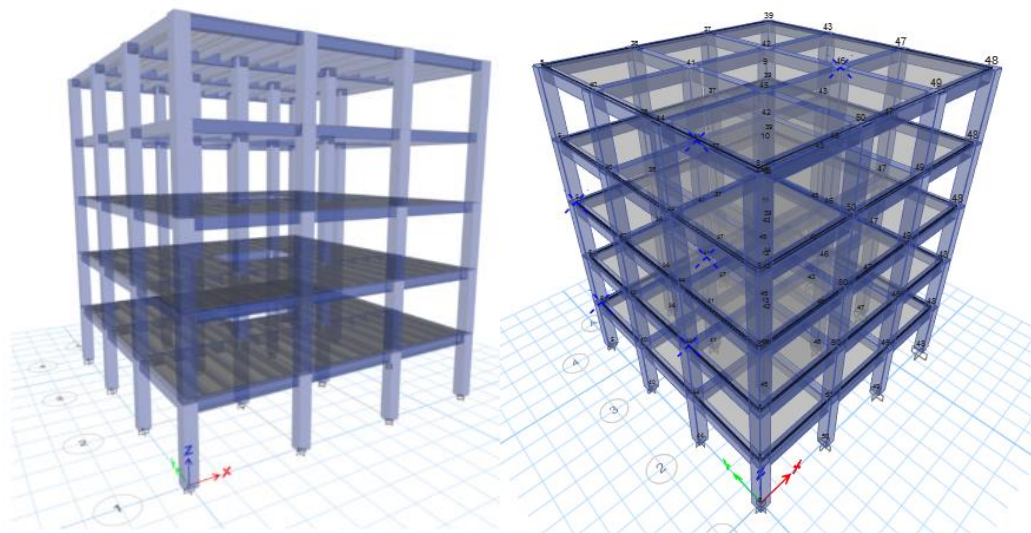


Figura 74. Estructuras de 5 pisos. A la izquierda estructura del estudio de Toro et. al. (2020). A la derecha estructura realizada por los autores en ETABS (Versión 21.2.0)

Fuente: Elaborado por los autores en ETABS (Versión 21.2.0)

Con esta pseudoaceleración también se realizó el análisis sísmico en ETABS obteniendo los resultados de la Tabla 17 con un valor de 0.83% de deriva máxima en los resultados propios y una deriva de 0.90% en el caso del estudio de Toro et. al. (2020). Los resultados obtenidos de esta comparación permitieron ver que se tienen valores de deriva aproximadas, tal como se esperaba, ya que, aunque los edificios tienen una configuración estructural similar, se desconoce datos como el peso de la losa, vacíos en la losa y el peso de carga muerta y viva de los entrepisos, los cuales afectan los resultados de la deriva. Por tal razón la similitud de los resultados sugirió que los valores de deriva encontrados en este estudio son correctos.

Tabla 17. Comparación de la deriva encontrada por los autores con la deriva del estudio de Toro et. al. (2020) para la estructura de 5 pisos

Parámetros	Resultados encontrados por los autores	Resultados de Toro et. al. (2020)
Deriva	0.83%	0.90%

Fuente: Elaborado por los autores

7.3. RESULTADOS DE UN ESCENARIO SÍSMICO

Siguiendo la metodología descrita en la Sección 6.2.2. se obtuvieron los resultados de la amplificación de la aceleración sísmica a través de los 5 estratos de suelo escogidos en la Sección 6.2.2.1. En las Figuras 75 al 79 se muestra el mayor desplazamiento de cada una de las capas de suelo durante el evento sísmico Landers de los 5 perfiles estratigráficos seleccionados, específicamente para la señal captada por la estación RSN848 LANDERS_CLW-LN.

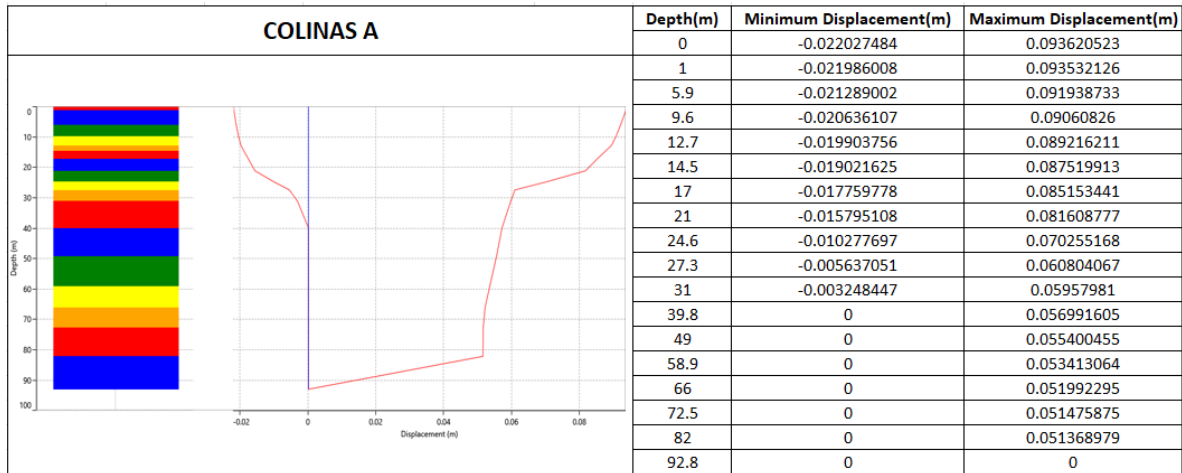


Figura 75. Desplazamiento del suelo correspondiente a COLINAS A por efectos del sismo del sismo LANDERS

Fuente: Tomada de Deepsoil (Versión 7.1.2.0) por los autores.

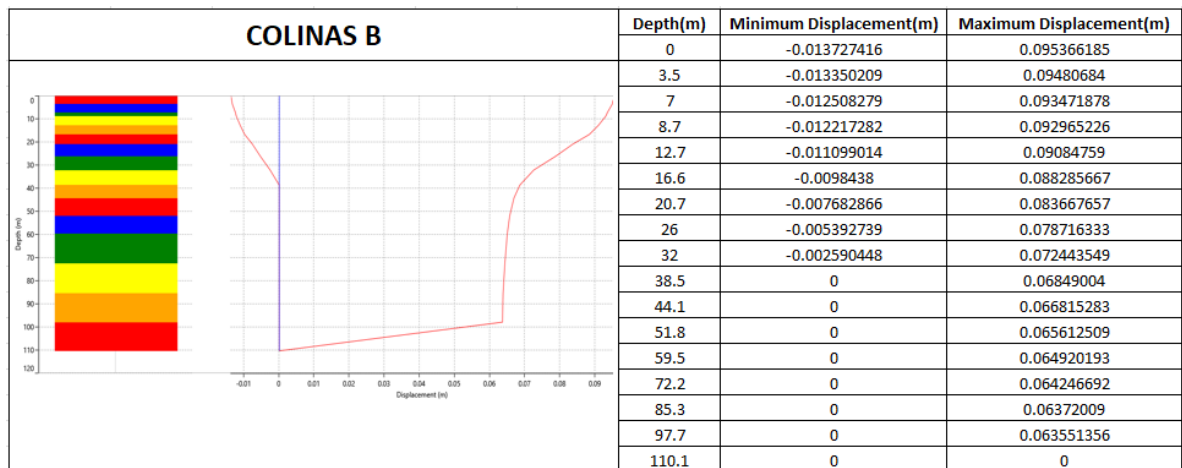


Figura 76. Desplazamiento del suelo correspondiente a COLINAS B por efectos del sismo del sismo LANDERS

Fuente: Tomada de Deepsoil (Versión 7.1.2.0) por los autores.

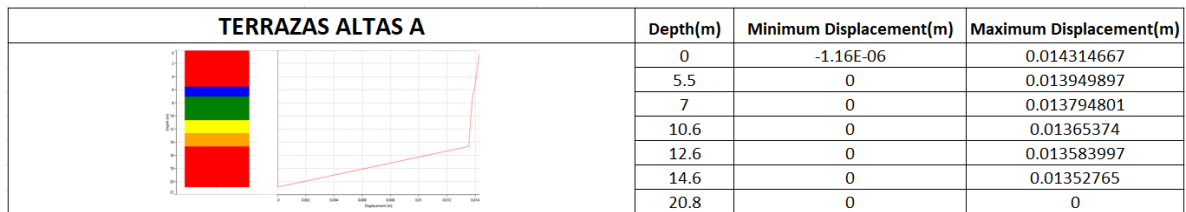


Figura 77. Desplazamiento del suelo correspondiente a TERRAZAS ALTAS A por efectos del sismo del sismo LANDERS

Fuente: Tomada de Deepsoil (Versión 7.1.2.0) por los autores.

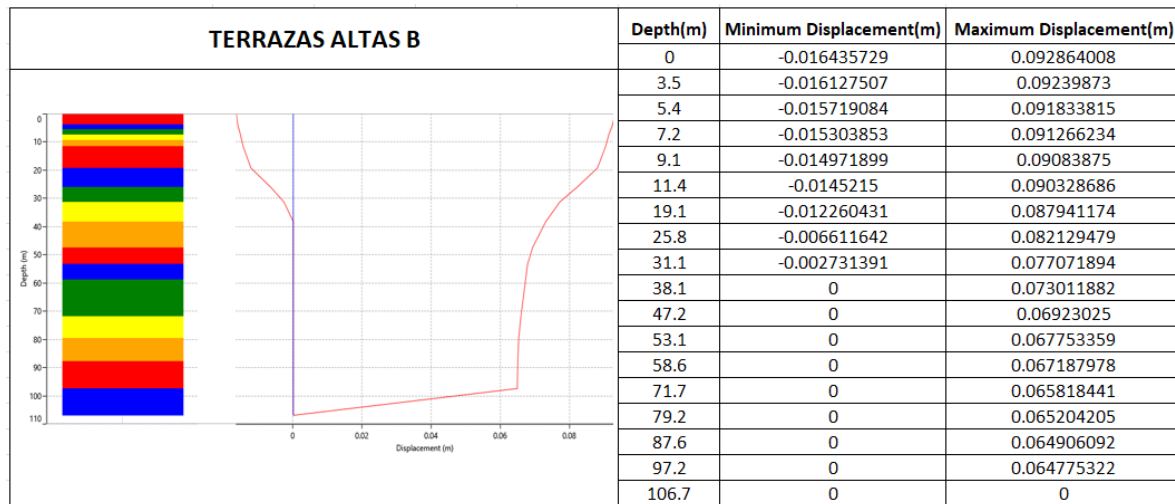


Figura 78. Desplazamiento del suelo correspondiente a TERRAZAS ALTAS B por efectos del sismo del sismo LANDERS

Fuente: Tomada de Deepsoil (Versión 7.1.2.0) por los autores.

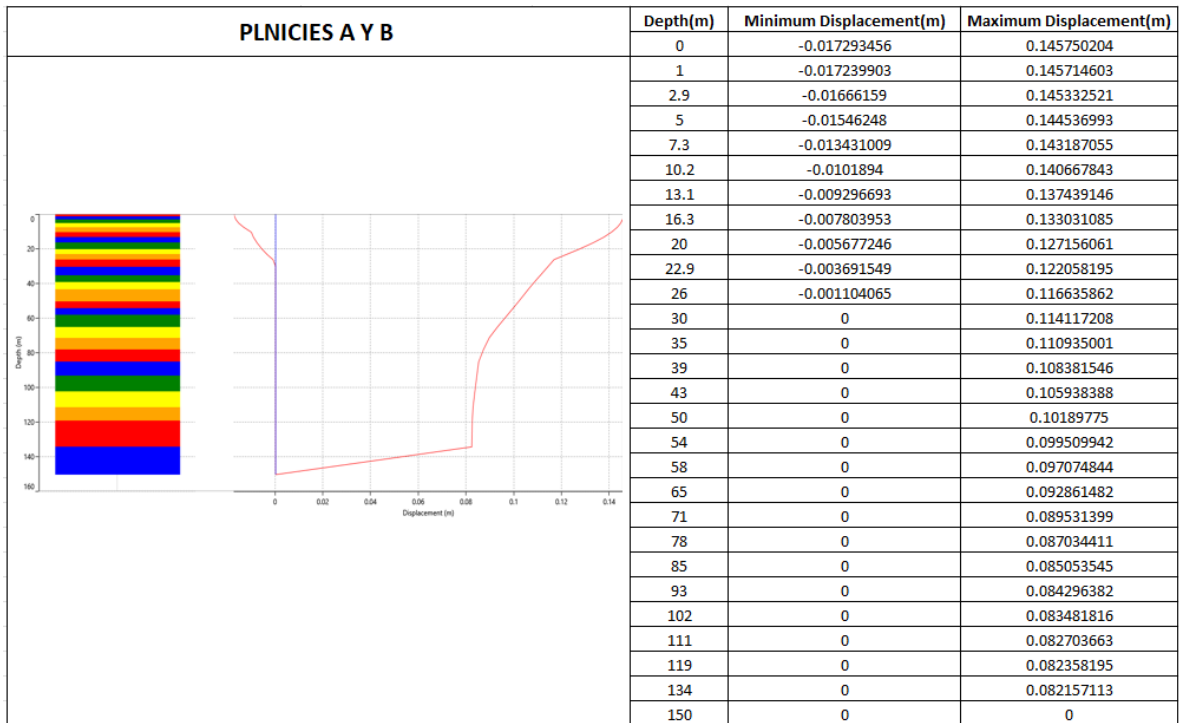


Figura 79. Desplazamiento del suelo correspondiente a PLANICIES A Y B por efectos del sismo del sismo LANDERS

Fuente: Tomada de Deepsoil (Versión 7.1.2.0) por los autores.

En la Figura 80 se muestra la aceleración en roca del sismo de LANDERS en la estación RSN848, donde se muestran las aceleraciones específicas para los periodos de los edificios de 3 y 7 pisos ($T=0.33S$ y $0.77s$ respectivamente). En la Figura 81 se presenta el espectro de aceleración en roca (línea negra) como también, el espectro de aceleración en superficie (línea verde). El espectro en superficie se obtuvo para los 5 perfiles analizados para cada una de las zonas de la MS del SGC, los cuales se presentan a forma de resumen en la Figura 82.

Motion:		RSN848 LANDERS_CLW-LN					
Time (s)	Acceleration (g)	Period (sec)	PSA (g)		Frequency (H)	Fourier Amplitude (g-sec)	
0.2145	0.00149578	0.305094	1.06281406		0.43820112	0.019246918	
0.2184	0.00148473	0.324656	1.09531049		0.44602614	0.022606454	
-	-	0.33	1.07741084		-	-	
0.2223	0.00146803	0.345472	1.02558759		0.45385116	0.024767426	
0.2652	0.00149391	0.684384	0.43055907		0.53992638	0.035825985	
0.2691	0.00151202	0.728265	0.4286993		0.5477514	0.031825289	
-	-	0.77	0.40299211		-	-	
0.273	0.00152514	0.774959	0.39993755		0.55557642	0.027323916	

Figura 80. Pseudo aceleraciones según el periodo, resultados de Deepsoil.

Fuente: Elaborado por los autores.

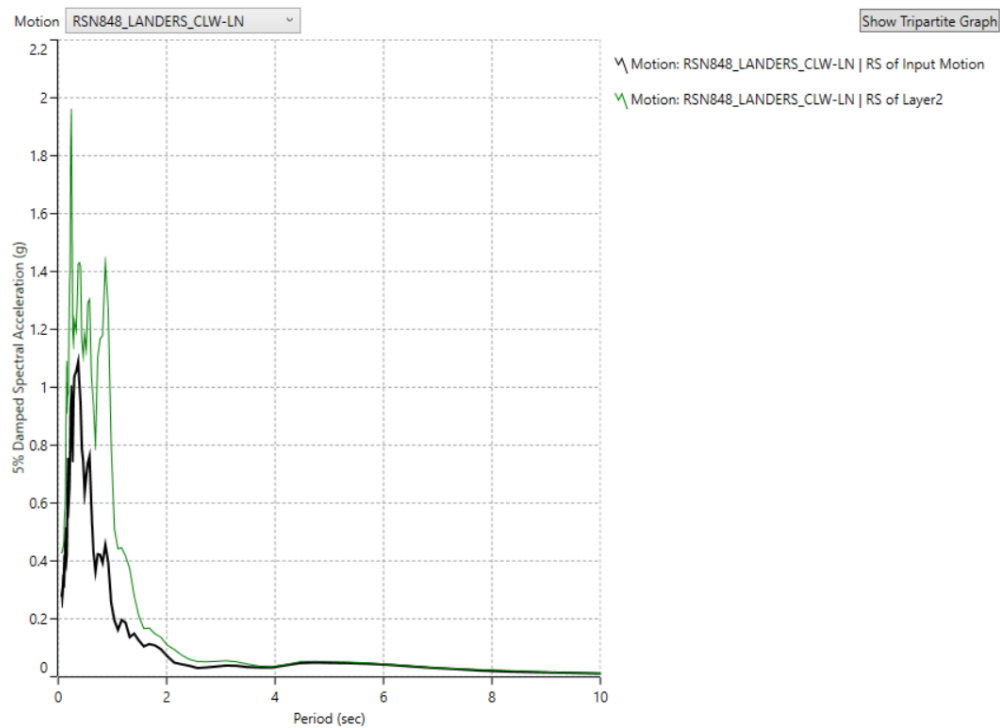


Figura 81. Gráficos espectrales que arroja el software Deepsoil, a partir de los datos de entrada de la sección 6.1.

Fuente: Tomada de Deepsoil (Versión 7.1.2.0) por los autores.

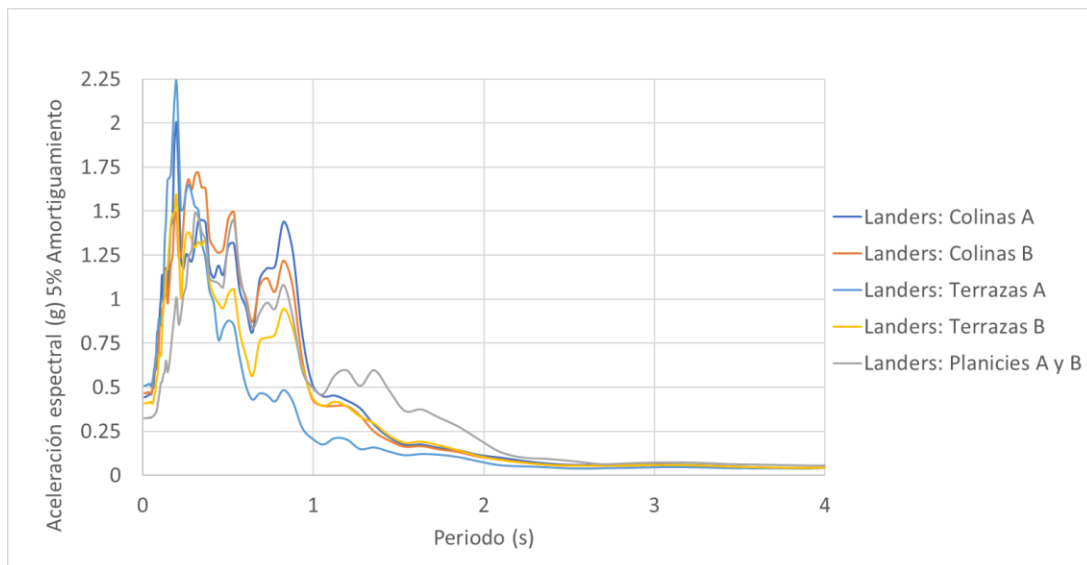


Figura 82. Espectro de aceleración para perfiles en las zonas definidas en la MS a cargo del SGC con la señal sísmica de Landers

Fuente: Elaborado por los autores.

Después de tener las pseudoaceleraciones para cada uno de los edificios, se procedió a hacer el análisis sísmico en el modelo de ETABS (Versión 21.2.0) tal como se hizo en la Sección 6.2.3, obteniendo la deriva y el cortante basal para cada uno, estos resultados se muestran en la Tabla 18, junto a las pseudoaceleraciones de cada zona obtenidas con Deepsoil.

Tabla 18. Resultados de deriva y cortante basal a partir de los resultados de Deepsoil.

Respuesta de las estructuras de pórticos al sismo LANDERS						
Punto de análisis del SGC	Edificio de 3 pisos			Edificio de 7 pisos		
	Sa para T=0.33	Deriva máx (%)	Vb (KN)	Para T=0.77	Deriva máx (%)	Vb (KN)
Colinas A	1.4332678	1.75%	5163.284	1.18452408	1.81%	11927.263
Colinas B	1.6983209	2.08%	6138.170	1.05174017	1.61%	10613.242
Terrazas A	1.4611323	1.79%	5271.605	0.42301677	0.65%	4245.297
Terrazas B	1.3202962	1.62%	4766.108	0.79830997	1.23%	8086.280
Planicies A y B	1.4415803	1.77%	5199.391	0.94816046	1.44%	9501.379

Fuente: Elaborado por los autores.

Los resultados de la deriva para este sismo en la estación RSN848 se presentan en mapas en la Figura 83:

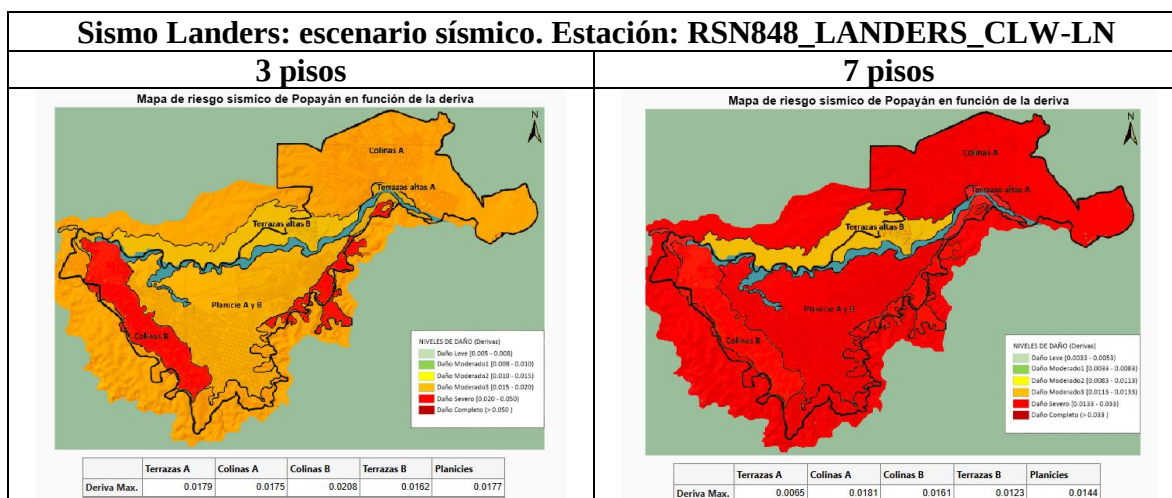


Figura 83. Resultados de deriva obtenidos con el programa de Matlab (Versión R2023b) con los factores de amplificación del escenario sísmico usando Deepsoil con el registro sísmico de Landers 848.

Fuente: Elaborado por los autores.

EL mismo procedimiento se realizó para otras señales sísmicas provenientes de otras estaciones que también captaron la señal sísmica del sismo de Landers. De las otras señales analizadas cabe destacar la estación RDN850 LANDERS_DSP000, la cual arrojó valores de deriva cercanas a los que se obtuvieron en la Sección 7.2 y cuyo mapa de derivas se presenta a continuación:

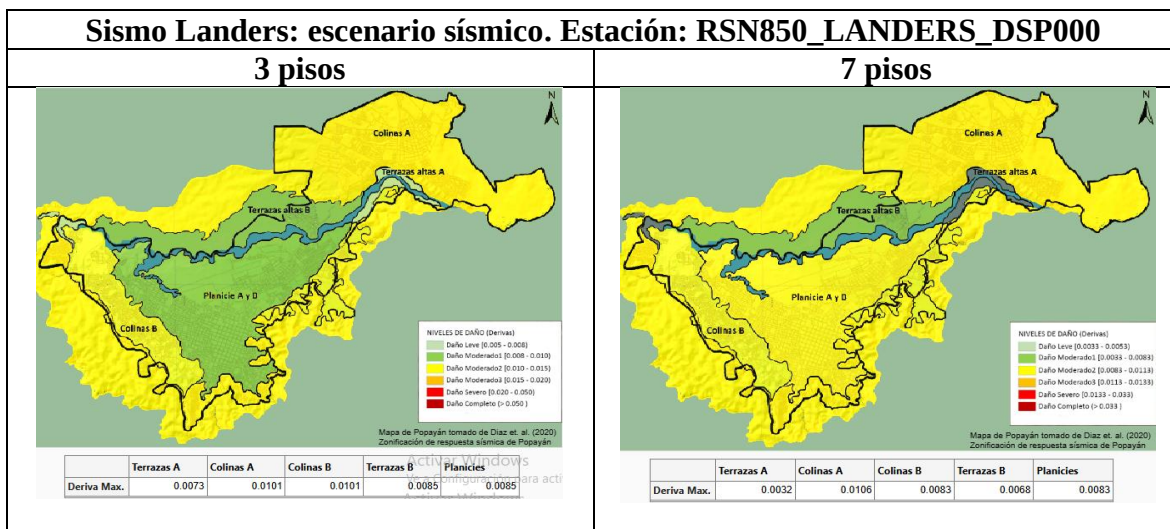


Figura 84. Resultados de deriva obtenidos con el programa de Matlab (Versión R2023b) con los factores de amplificación del escenario sísmico usando Deepsoil con el registro sísmico de Landers 850.

Fuente: Elaborado por los autores.

7.4. MAPA DE DERIVAS CON LOS DATOS DE LA UAN

Para observar el comportamiento estructural en toda la ciudad de Popayán considerando los coeficientes propuestos por la UAN fue necesario construir mapas de isolíneas en función de las variables de estudio, en este caso, de la deriva, ya que este es el formato en el que el mismo informe presenta sus coeficientes de F_a y F_v . Estos mapas fueron construidos considerando cada sistema estructural y número de pisos evaluado como se muestra en las Figuras 85 al 88:

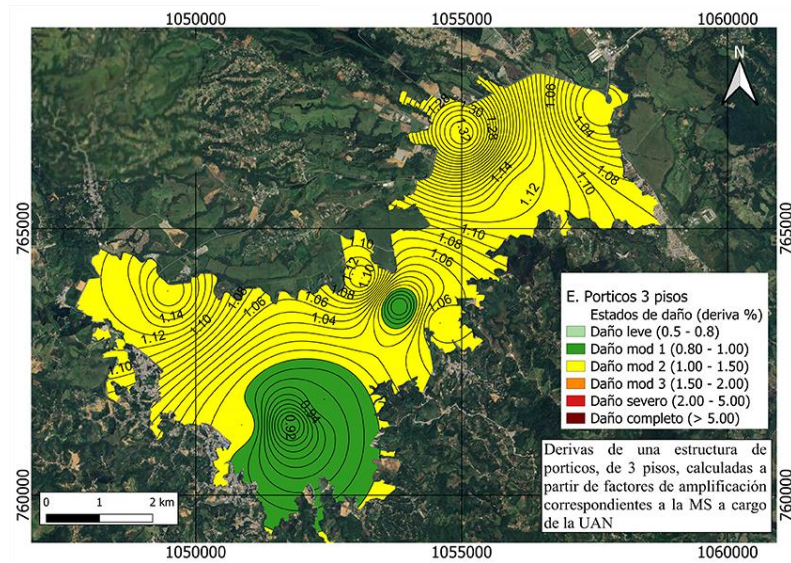


Figura 85. Mapa de derivas según MS de la UAN con los estados de daño para un edificio en pórticos de 3 pisos.

Fuente: Elaborado con QGIS (Versión 3.34.9) por los autores.

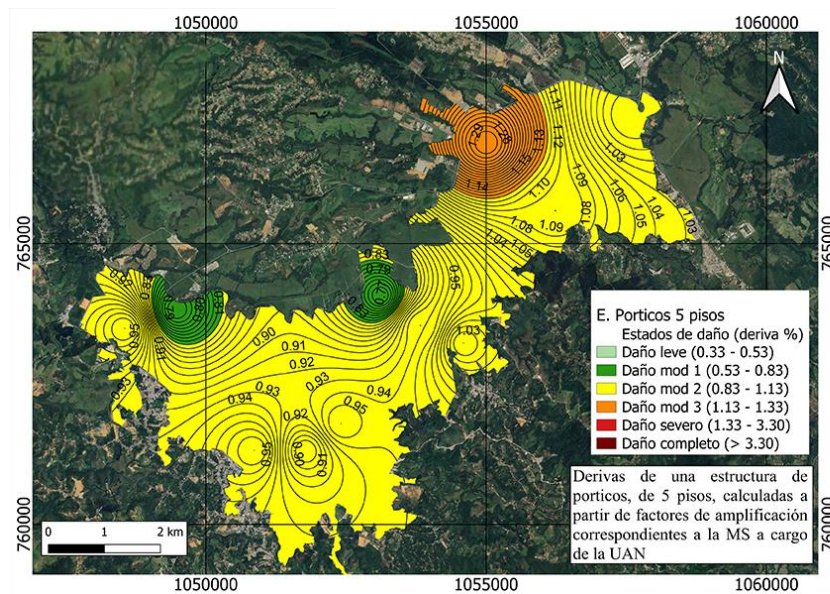


Figura 86. Mapa de derivas según MS de la UAN con los estados de daño para un edificio en pórticos de 5 pisos.

Fuente: Elaborado con QGIS (Versión 3.34.9) por los autores.

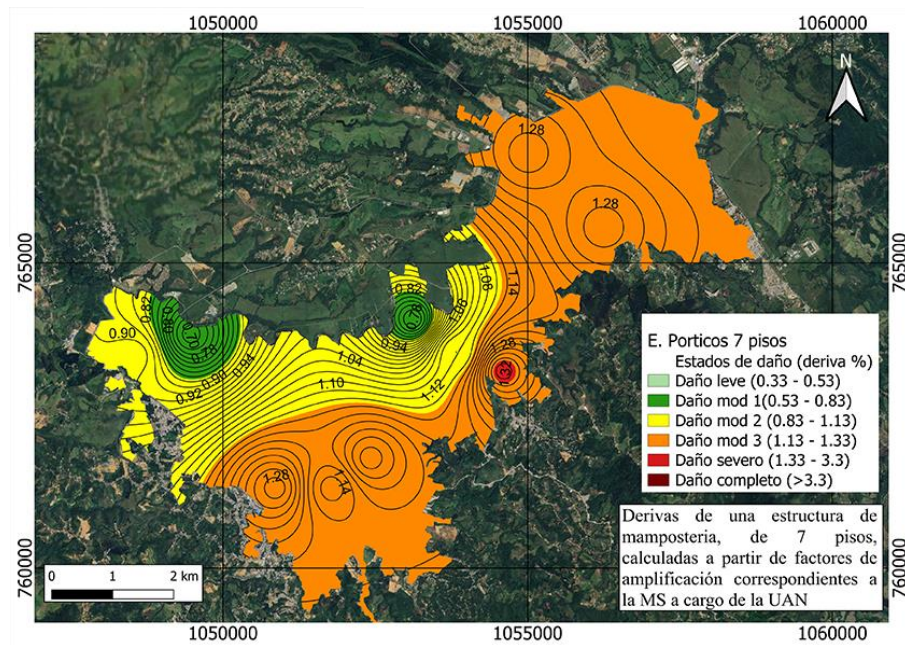


Figura 87. Mapa de derivas según MS de la UAN con los estados de daño para un edificio en pórticos de 7 pisos.

Fuente: Elaborado con QGIS (Versión 3.34.9) por los autores.

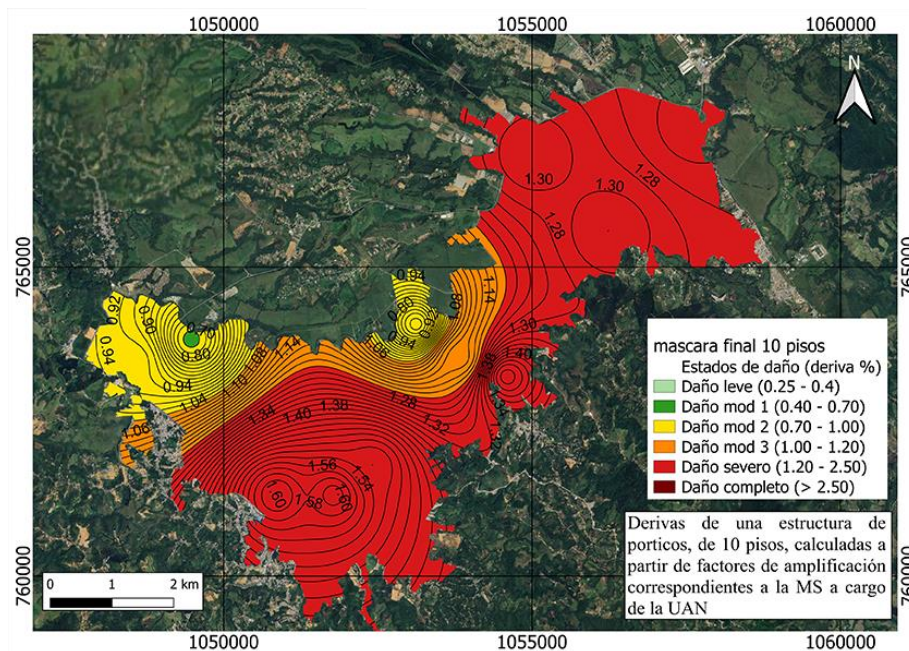


Figura 88. Mapa de derivas según MS de la UAN con los estados de daño para un edificio en pórticos de 10 pisos.

Fuente: Elaborado con QGIS (Versión 3.34.9) por los autores.

Gracias a estos mapas fue posible observar el comportamiento no solo en los puntos de análisis sino cubrir toda la ciudad, de modo que fueron visibles las zonas más críticas o de mayor riesgo sísmico de acuerdo con el estudio de la UAN para cada tipo de estructura. Estos valores fueron comparados con las zonas críticas arrojadas para el estudio del SGC y con los valores de la NSR-10.

7.5. PROGRAMA DE MAPA DE DERIVAS

Como se explicó en la Sección 6.2.5. se desarrolló una aplicación por los autores que muestra las derivas y niveles de daños presentadas por la Norma y los 2 estudios de MS en función del sistema estructural y del número de pisos. Esta herramienta fue diseñada de manera complementaria para que brinde claridad en los resultados, transmitiendo la información de manera rápida, eficiente y concisa, ya que da al usuario la información que solicita de manera precisa para que pueda tomar decisiones con mayor claridad.

Al desarrollar esta aplicación se logró crear una interfaz donde se pueda escoger la opción de “Comportamiento bajo escenario sísmico de diseño” o de “Comportamiento bajo escenario sísmico específico”. En la primera opción de “Comportamiento bajo escenario sísmico de diseño” se selecciona únicamente el estudio del que se desea obtener datos y el sistema estructural y el número de pisos de la tipología estructural deseada. La interfaz inicial del programa se presenta a continuación en la Figura 89:

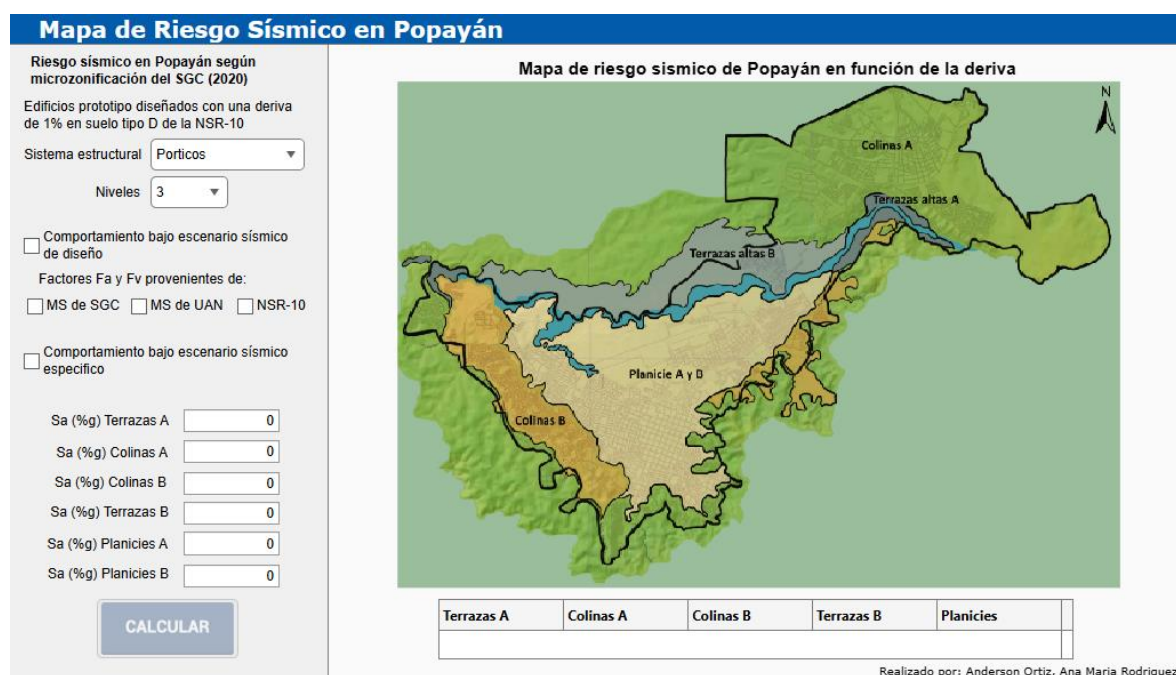


Figura 89. Interfaz del programa en Matlab.

Fuente: Elaborado por los autores en Matlab (Versión R2023b). Mapa de Popayán modificado de (Pérez et al., 2020)

Con esta herramienta se buscó presentar los datos ya obtenidos de manera gráfica relacionando las derivas con el nivel de daños presentado. Por ejemplo, en la Figura 90 se muestran las derivas para un edificio de 5 pisos a porticado utilizando el estudio del SGC, donde se observa que en las zonas de Planicies y Terrazas A y B presentan un nivel de daño moderado 1 (color verde), mientras que la misma edificación en las zonas Colinas A y Colinas B presentan un nivel de daño moderado 2 (color amarillo). Esta diferencia de colores fue útil para ver la magnitud de las diferencias de las derivas y reconocer que está relacionado no solo con un parámetro de cumplimiento de la NSR-10 sino también con un estado o límite de daño bajo el cual se debe asegurar siempre la seguridad.

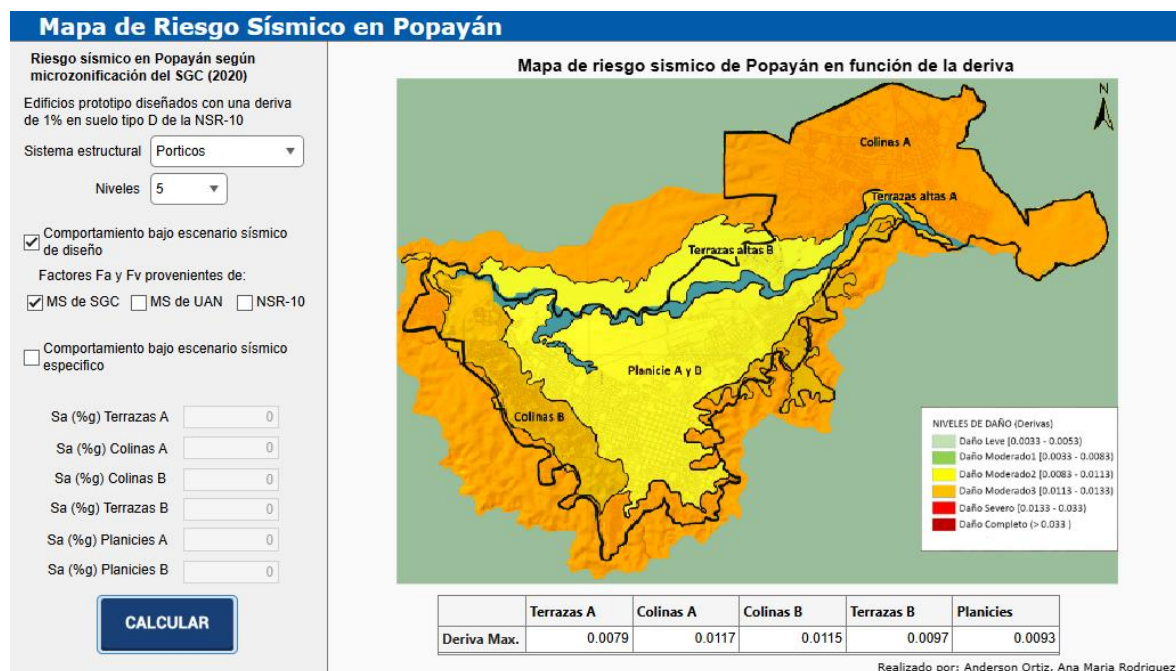


Figura 90. Interfaz del programa para un edificio de pórticos de 5 pisos según la MS del SGC.

Fuente: Elaborado por los autores en Matlab (Versión R2023b). Mapa de Popayán modificado de (Pérez et al., 2020)

Los resultados del programa considerando los factores Fa y Fv para los demás estudios y número de pisos se presentan en el ANEXO 2.

Por otra parte, es una ayuda para estimar de manera rápida el comportamiento estructural preliminar, puesto que la deriva es uno de los primeros límites que se chequean dentro de un diseño ya que garantiza un comportamiento sísmico adecuado. Con esta evaluación preliminar es posible sacar conclusiones acerca de qué zona es más recomendable para construir un tipo de edificación.

Se espera además que esta aplicación sirva como lineamiento para mejorar la planificación urbana considerando el riesgo sísmico y optimizar los costos de construcción de las

edificaciones. Si bien se pueden construir todo tipo de estructuras en cualquier parte de la ciudad es recomendable tomar decisiones más asertivas para que el proyecto mejore su viabilidad económica y seguridad estructural, es decir, en una zona un tipo de edificio cuenta con factores de amplificación más críticos que en otra, por lo cual, construirlo en la zona con mejores factores hace que se disminuya la demanda sísmica y con ello el cortante basal, por tanto la edificación tendrá mayor viabilidad económica. Así mismo construirla en la zona adecuada hace que se disminuya el riesgo sísmico, pues la demanda sísmica para ese tipo de estructura decrece.

En la segunda opción de “Comportamiento bajo escenario sísmico específico” además de escoger los parámetros de sistema estructural y número de pisos se debe ingresar las pseudoaceleraciones estimadas para cada zona a partir de un registro sísmico específico, para que realice el cálculo de la deriva. Este registro sísmico este asociado a posibles eventos que pudieran llegar a suceder en la ciudad, para así conocer el comportamiento real de las edificaciones frente a un evento en particular.

A modo de ejemplo se utilizaron las pseudoaceleraciones resultantes del procesamiento de datos en el software Deepsoil (Versión 7.1.2.0) para cada uno de los perfiles de suelo y considerando el sismo de LANDERS como sismo probable. Los datos de S_a requeridos por cada zona fueron los obtenidos en la Tabla 14 y la respuesta en términos de deriva en el mapa de riesgo se presenta en la Figura 91 para el edificio de 3 pisos y en la Figura 92 para el edificio de 7 pisos, en las cuales se observa daños moderados y severos en toda la ciudad.

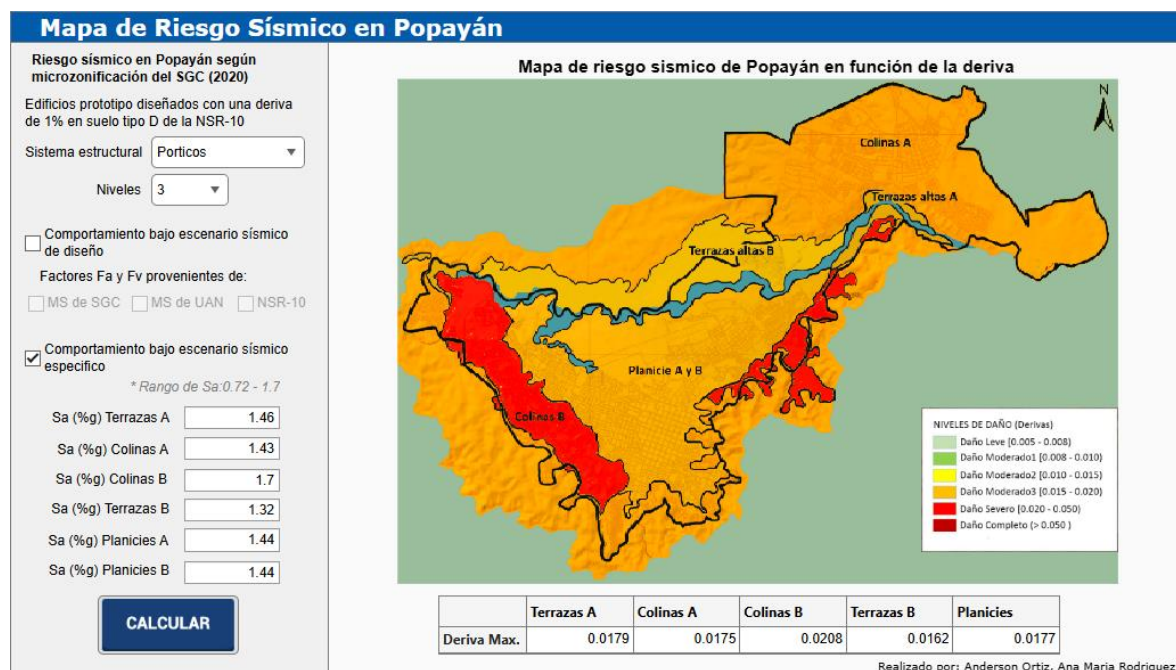


Figura 91. Resultados del programa considerando el sismo probable Landers para pórtico de 3 pisos.

Fuente: Elaborado por los autores en Matlab (Versión R2023b). Mapa de Popayán modificado de (Pérez et al., 2020)

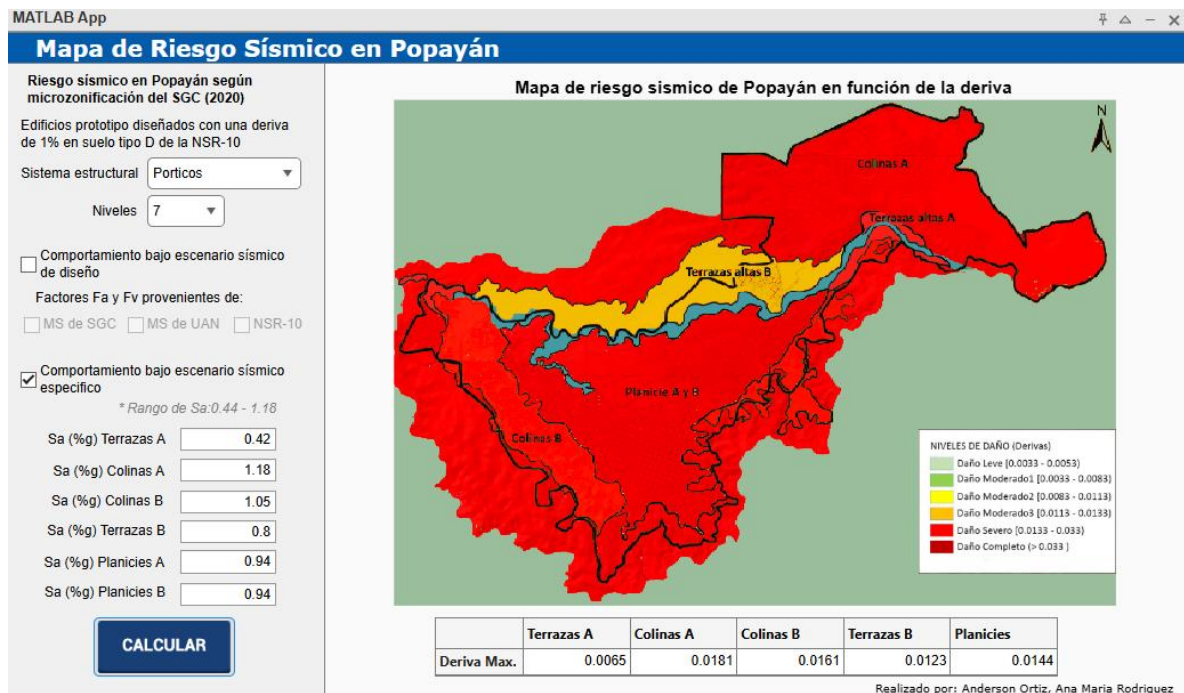


Figura 92. Resultados del programa considerando el sismo probable Landers para pórtico de 7 pisos.

Fuente: Elaborado por los autores en Matlab (Versión R2023b). Mapa de Popayán modificado de (Pérez et al., 2020)

Finalmente, esta aplicación es una base para desarrollar futuras herramientas de riesgo sísmico en Popayán, como la desarrollada por Bernal y Cardona (2024) para la ciudad de Manizales, en la cual se puedan ubicar el tipo de estructuras reales que existen en cada zona de la ciudad con base en los modelos de exposición de viviendas y observar que zonas se verían más afectadas ante la ocurrencia de un sismo para así generar planes y estrategias de emergencia ante riesgos.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados producto del desarrollo de la investigación. El análisis se realiza para los valores de deriva y cortante basal obtenidos por cada uno de los estudios y su correspondiente comparación, así como los resultados obtenidos del software Deepsoil en el escenario sísmico supuesto planteado y la aplicación de estos valores en mapas de riesgo sísmico para Popayán.

8.1. COMPARACIÓN DE LAS MICROZONIFICACIONES SÍSMICAS Y NSR-10

En primer lugar, se compararon los estudios de las microzonificaciones para identificar cual pudo ser la razón por la cual se obtuvieron valores de efecto de sitio F_a y F_v diferentes en cada estudio para la misma zona. Y en segundo lugar se compararon estos factores con los dados por la NSR-10 para reconocer si la Norma está caracterizando correctamente la amplificación del suelo.

8.1.1. COMPARACIÓN DE LAS MICROZONIFICACIONES

Los principales parámetros de estudio de las microzonificaciones son los factores de amplificación por efecto de sitio F_a y F_v . En la Tabla 19 al analizar sus valores en un mismo punto para cada estudio, se observó que para la mayoría de los puntos los valores no son similares.

Por ejemplo, con los factores de F_a y F_v de los puntos de las MS que se encuentran en el suelo C; por una parte, el factor para periodos cortos F_a del estudio del SGC (Terrazas A) y UAN (Punto 10) fuer de 1.39 y 1.48 respectivamente, con una diferencia del 21% y 28%, con respecto al valor dado por la NSR-10 de 1.15. Estos valores tienen una tendencia a estar por encima del valor propuesto por la Norma y se pudo asumir que no existe grandes diferencias en lo propuesto por las microzonificaciones. Pero, por otra parte, el factor F_v de la MS del UAN de 2.7 superó al valor de la Norma en un 68%, mientras que el valor del SGC de 1.5 es inferior en un 6% con respecto al de la Norma de 1.6, lo cual no permitió definir con claridad cual es el verdadero comportamiento de esta zona para los periodos largos y concluir si los coeficientes dados por la Norma son adecuados o no para este tipo de suelo en un rango de periodos intermedios.

Tabla 19. Factores de Fa y Fv de las Microzonificaciones y NSR-10. Nota: En color amarillo están los puntos que fueron comparados para el ejemplo.

Estudios referentes	Identificación del punto de análisis	Fa	Fv
MS SGC	Terrazas A	1.39	1.5
	Colinas A	1.58	2.37
	Colinas B	1.55	2.47
	Terrazas B	1.31	2.32
	Planicie A	1.2	2.74
	Planicie B	1.25	3.22
MS UAN	1	1.76	2.7
	2	1.5	1.5
	3	1.54	1.4
	4	1.49	1.9
	5	1.34	3.3
	6	1.18	3.5
	7	1.3	3.1
	8	1.41	3
	9	1.27	2.3
	10	1.48	2.7
	11	1.32	2.5
NSR -10	Tipo C	1.15	1.6
	Tipo D	1.3	2
	Tipo E	1.45	3.2

Fuente: Los autores

Por esta razón, se buscó comparar y analizar la metodología, sismos utilizados y caracterización geotécnica de cada estudio de forma que pueda proporcionar una visión preliminar para entender las diferencias en los factores de Fa y Fv.

Como resultado de la comparación entre las microzonificaciones del SGC y UAN, se puede afirmar que ambos estudios son lo suficientemente robustos para arrojar una buena información del comportamiento dinámico del suelo. Esto se debe a que dichos estudios se pueden clasificar de tipo directos según Errazuriz (2012) ya que buscan medir y reproducir los fenómenos involucrados en un evento sísmico a partir de la información sismológica, de la corteza terrestre, geología y geotécnica, lo que asegura una alta dependencia con la gran mayoría de las variables, obteniendo mejores resultados. Este mismo autor indica que el resultado de este tipo de microzonificaciones es determinar un espectro de respuesta para cada sitio que englobe toda la amenaza sísmica y con los estudios de suelo que se llevó a cabo en ambos estudios, es posible construir estos espectros satisfactoriamente.

De manera que las dos microzonificaciones estudiadas cuentan con metodologías que proveen información precisa y acertada de las condiciones de amplificación sísmica que tienen los suelos de la ciudad, sin embargo, cada una de ellas arrojaron valores diferentes de

factores de efecto de sitio para los mismos puntos. Por lo cual fue necesario indagar con más detalle en cada uno de los estudios para encontrar el punto de divergencia.

Con respecto a la obtención de la respuesta dinámica local, en la Tabla 6 se observó que se utilizan diferentes programas para el procesamiento de las señales sísmicas en los suelos y que mientras el SGC establece zonas homogéneas de respuesta sísmica, la UAN establece un mapa de isolíneas. Pese a que la definición de zonas es el método más usado, la UAN no pudo llegar a esta presentación debido a la falta de información geotécnica para poder homogenizar el territorio.

En este sentido, cabe destacar la labor del SGC en cuestión de caracterización geotécnica ya que cuenta con muestras de más de 480 puntos del suelo estudiados, mientras que la UAN solo cuenta con 48. Del SGC fue posible asumir que su base de datos tiene una buena completitud en los primeros 20 m, debido a la cantidad de muestras obtenidas, lo que permitió decir que tienen una buena caracterización de los perfiles de suelo. Si bien no hay un número específico o mínimo de sondeos o muestras para validar una microzonificación, la base de datos del SGC es más robusta y supera a la de la UAN, contando con mayor número de ensayos necesarios para poder caracterizar el suelo de Popayán de una mejor forma.

Si bien, al observar el resumen de los perfiles (véase Tabla 7) ambos estudios coincidieron en la predominancia de suelos limos, y presentan perfiles de suelos similares para el mismo punto, para definir la respuesta del suelo en términos de valores de F_a y F_v arrojaron resultados distintos para el mismo sitio, dando origen a diferentes valores de amplificación del terreno, lo cual se pudo deber a como se mencionó anteriormente, las diferencias en la caracterización geotécnica, ya que la cantidad de muestras obtenidas por el SGC permitió hacer una generalización de los parámetros del suelo típicos para cada zona, obteniendo un valor promedio ponderado, mientras que la UAN utilizó el valor específico de cada punto obtenido del ensayo propio de cada uno.

8.1.2. COMPARACIÓN DE F_a Y F_v CON LA NSR-10

Al comparar los parámetros de F_a y F_v obtenidos por las microzonificaciones y la NSR-10 en la Figura 93 y 94 se observa que para el suelo tipo C y D, en el rango de periodos cortos ($TC_{sueloC} = 0.53s$; $TC_{sueloD} = 0.59s$), los factores de la Norma fueron menores en un promedio de 22% en comparación con los de las MS, obteniendo espectros elásticos con menores aceleraciones. Por otro lado, en la Figura 95 del suelo tipo E, los valores de F_a y F_v de la Norma en promedio fueron superiores en 15% a los de las MS, generando espectros elásticos de diseño con mayor aceleración.

Cabe destacar el caso del suelo tipo D, el cual, aunque la mayoría de los puntos de los espectros de las MS fueron superiores al de la Norma, los Puntos 4 y 5 de la MS de la UAN, en el rango de periodos intermedios, tuvieron valores inferiores al espectro de la NSR-10, debido a que tiene factores F_v menores que la Norma. Esto generó que haya una gran diferencia de factores F_a y F_v para los suelos que la Norma clasifica con un solo valor. Por

ejemplo, para zonas como el Punto 1 de la UAN la diferencia de F_a fue del 35% respecto a la Norma, mientras que en zonas como Terrazas B del SGC la diferencia llegó solo al 0.8% evidenciando como la generalización de la Norma no está cubriendo correctamente a todos los suelos de la ciudad.

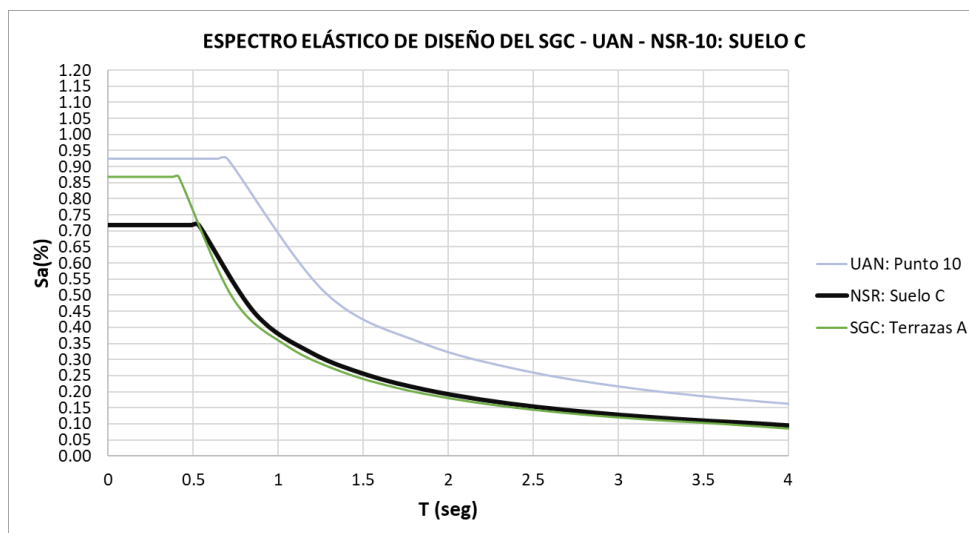


Figura 93. Comparación de espectros elásticos de diseño de las MS con el tipo de suelo C de la NSR-10

Fuente: Elaborado por los autores

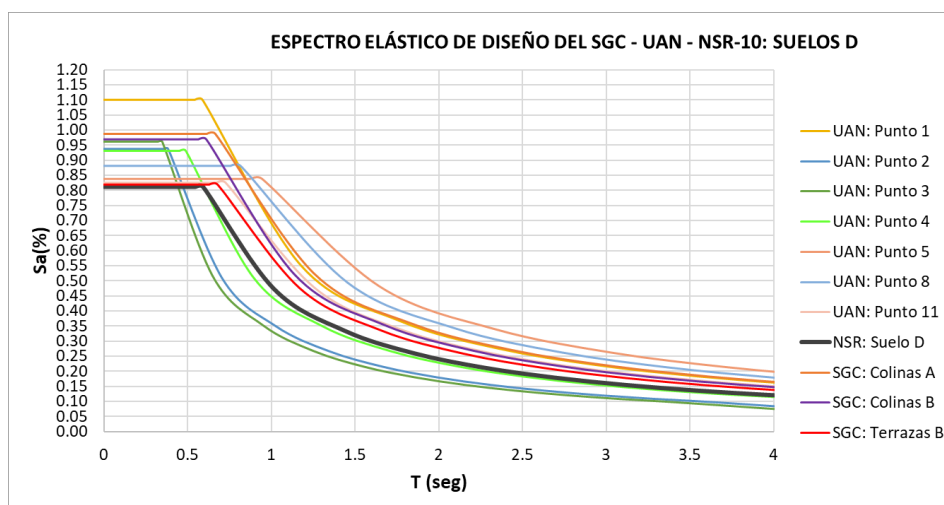


Figura 94. Comparación de espectros elásticos de diseño de las MS con el tipo de suelo D de la NSR-10

Fuente: Elaborado por los autores

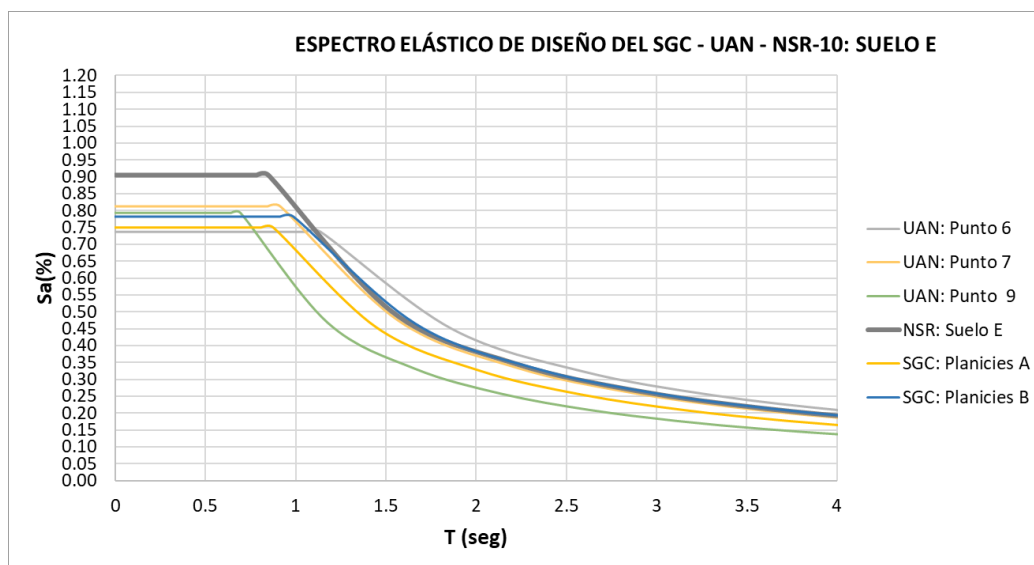


Figura 95. Comparación de espectros elásticos de diseño de las MS con el tipo de suelo E de la NSR-10

Fuente: Elaborado por los autores

Estas diferencias en los factores de efecto de sitio se obtuvieron posiblemente a las consideraciones del suelo, específicamente porque en las microzonificaciones se logró caracterizar mejor el comportamiento propio de los suelos de Popayán mediante una serie de estudios geotécnicos realizados en la ciudad, como se mostró en el Capítulo 4. Por su parte, la Norma se basa en parámetros como la velocidad de onda de corte (V_s) que, representa la rigidez de las capas del suelo y está relacionada con la amplificación del terreno (Vera Centeno, 2019), y es inversamente proporcional a F_a y F_v , es decir, entre mayor sea la V_s el valor de coeficiente de sitio es menor, y por tanto la amplificación de la señal sísmica la demanda sísmica será menor.

Si bien la V_s es uno de los parámetros más importantes para evaluar las características del movimiento del suelo en la superficie, estudios, como los realizados por Aguiar et. al. (2018), afirman que para caracterizar correctamente el suelo no es suficiente con definir la V_s , sino que requiere ser complementado con parámetros como el periodo natural del suelo. Esto es debido a que la V_s solo mide pequeñas deformaciones y frente a un sismo las deformaciones que se producen son grandes, además el periodo logra caracterizar el depósito de suelo en toda su profundidad generando resultados más cercanos a la realidad.

Por ejemplo, al comparar las propiedades de los diferentes puntos, se observó, que en el Punto 5 de la UAN donde la NSR-10 considera un suelo D, cuya V_s debe estar entre 360 y 180m/s, la UAN obtuvo una V_s en promedio de 300m/s, lo cual llevó a suponer que según este parámetro de velocidad el Punto 5 debe tener una amplificación similar al del suelo tipo D, pero en realidad en el Punto 5 se amplificó 1.6 veces más que lo propuesto por la Norma. Esto muestra que los parámetros de caracterización del suelo utilizados por la Norma de Velocidad de onda de corte (V_s) no están categorizando correctamente el efecto de sitio de los suelos de la ciudad de Popayán.

8.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CORTANTE BASAL Y DERIVA

Rochel Awad (2012) menciona que el cortante basal y deriva máxima son buenos indicadores del comportamiento estructural ya que permiten estimar la respuesta máxima de la estructura, además de ser claves a la hora de evaluar la rigidez y resistencia de esta. Además, estos parámetros permiten comparar a nivel estructural, el impacto que tiene la amplificación de ondas sísmicas por efecto de sitio, ya que logran establecer a nivel de daños, de solicitud sísmica o de costos que tanto afecta la variación de los coeficientes F_a y F_v en una estructura.

8.2.1. RESULTADOS DE CORTANTE BASAL

Iniciando con el cortante basal, en la Figura 96 se muestran los resultados para los edificios de pórticos en cada uno de los puntos de análisis, destacando que para los Puntos 2 y 3 de la UAN, Terrazas A del SGC y Suelo tipo C los valores de cortante basal se encontraron relativamente cercanos, en comparación con la mayoría de puntos que presentaron claras separaciones. Estas separaciones entre los cortantes de cada estructura por número de pisos era un resultado esperado considerando que el cortante basal es proporcional al peso de la estructura, y que el peso de esta crece con el número de niveles.

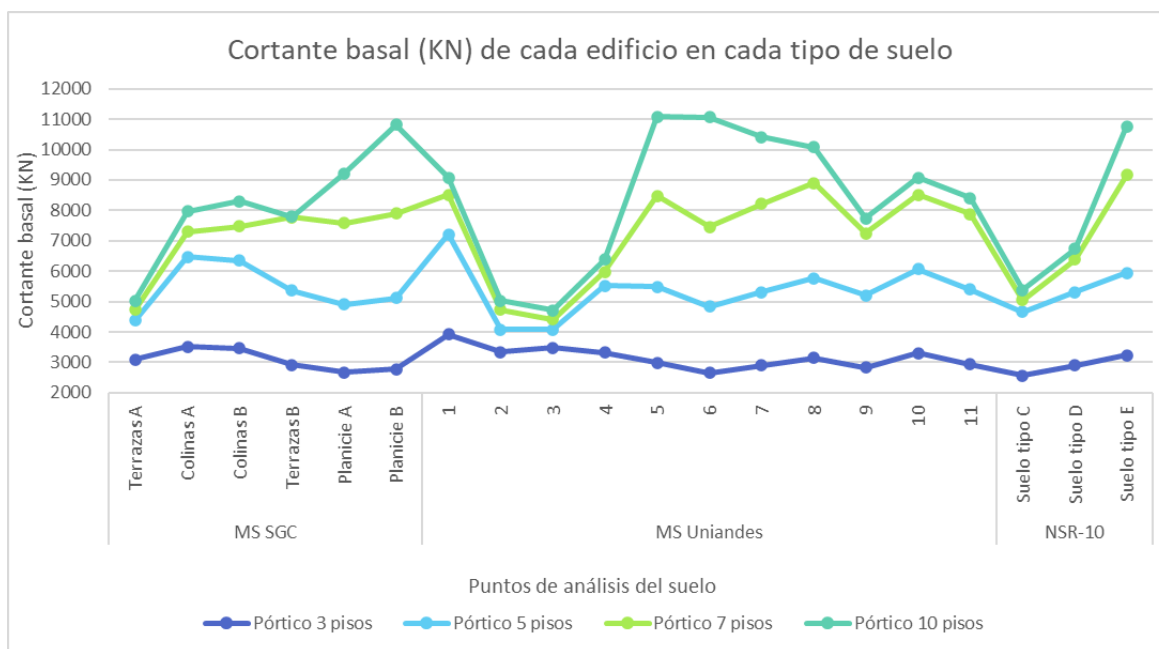


Figura 96. Cortante basal (KN) de las estructuras de pórticos en cada punto de análisis del suelo.

Fuente: Elaborado por los autores.

Estos resultados dieron una visión preliminar de la solicitud final de la estructura, que se verá reflejado directamente en los costos de esta. Para los puntos de Terrazas A del SGC, Punto 2 y 3 de la UAN, y Suelo tipo C la diferencia en la solicitud final, fue tan solo el 35% del cortante de la edificación de 3 pisos con respecto al de 10 pisos, llegando a diferencias de 1229KN a 2814KN. Mientras que, para puntos como Planicies B, Puntos 5 y

6 de la UAN las diferencias de cortante fueron hasta de 315% alcanzando valores desde 8034KN a 8396KN, lo que significó un aumento de 4 veces la sollicitación sísmica entre estos dos edificios

Por otra parte, al comparar los valores de la Norma con los de las MS, se observaron unos claros incrementos en el cortante, especialmente en los puntos de la MS de UAN equivalentes con un suelo D. Por ejemplo, el Punto 1 de la UAN aumentó 35% el cortante basal para el edificio de 3 y 5 pisos; el Punto 8 de la UAN aumentó 39% para el edificio de 7 pisos; y el Punto 5 de la USN aumentó un 64% para el edificio de 10 pisos, siendo este último el punto más crítico en toda la ciudad. Como se mencionó antes, estos incrementos repercuten en las dimensiones de elementos estructurales y por ende en los costos de la estructura. Tomando como referencia el estudio realizado por Rangel Mora & Villafañe Mattos (2018) fue posible afirmar que para diferencias del 35% en edificios de 3 o 5 pisos, los costos de la estructura aumentan un 9%; para diferencias del 39% en edificios de 7 pisos los costos suben 10%; y para diferencias del 64% en estructuras de 10 pisos los costos aumentan 20%.

Estas diferencias del comportamiento estructural, de un estudio frente al otro, como se explicaron en la Sección 8.1, provinieron de la variación de los parámetros de efecto de sitio, ya que para un mismo punto considerando los factores F_a y F_v propuestos por las MS y la NSR-10 se observó diferente comportamiento reflejado en la deriva y cortante basal.

Lo anterior dejó ver como en algunas zonas de la ciudad la respuesta del suelo mejora las condiciones de diseño de una estructura, disminuyendo los valores de sollicitación sísmica y con ello los costos. Por ejemplo, en las zonas de Terrazas A, Punto 2, Punto 3 y Suelo tipo C es más favorable y viable económicamente construir los edificios de 7 o 10 pisos en relación con zonas como Planicies B o Puntos 5 y 6.

8.2.2. RESULTADOS DE LA DERIVA

Con relación a la deriva máxima, en la Figura 97 se compararon los valores de deriva obtenidos de los tres estudios (NSR, SGC y UAN) para todas las estructuras de pórticos. Si bien los estudios de microzonificaciones mostraron que las aceleraciones dan distintas, se necesitó comprobar como esas diferencias en las aceleraciones repercuten en el diseño estructural, centrándose en cómo influye en el nivel de daños de una estructura.

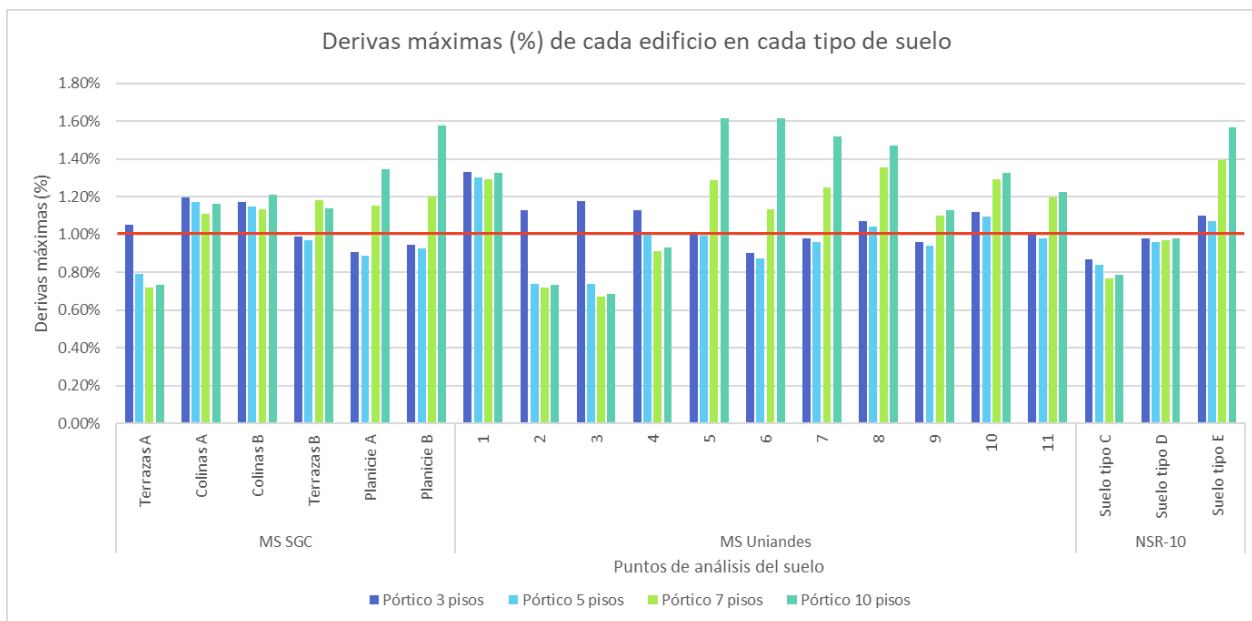


Figura 97. Derivas máximas (%) de las estructuras de pórticos en cada punto de análisis del suelo.

Fuente: Elaborado por los autores.

Como se mencionó anteriormente las edificaciones de pórticos se diseñaron para que cumplieran una deriva menor al 1% en suelo D (línea roja Figura 97), el cual es un suelo con alta presencia en la ciudad de Popayán según Pérez et al. (2020). Así, los puntos Terrazas B, Colinas A y Colinas B del SGC; y los Punto 1, 2, 3, 4, 5 y 8 de la UAN que según el estudio del Díaz et al. (2020) están ubicados sobre un suelo D de acuerdo con la clasificación del Norma, también deberían haber cumplido el requisito de la deriva. Sin embargo, se observó que para Terrazas B y Punto 5 solo los edificios de 3 y 5 pisos cumplieron esta condición. En los Puntos 2, 3 y 4 cumplieron la condición, excepto para el edificio de 3 pisos, mientras que los otros puntos no cumplieron esta condición superando este valor.

Detallando específicamente cada uno de los puntos, se analizó los resultados más críticos para cada estructura. En el edificio de 3 pisos el punto más crítico fue el Punto 1, el cual tuvo el mayor valor de deriva de todos los puntos considerados con 1.33%, teniendo un valor más alto que el obtenido con la Norma, con un 35.7% de diferencia. Lo mismo sucedió para el Punto 1 en el edificio de 5 pisos, que tuvo el mayor valor de deriva de todos los puntos considerados, con 1.30%. Frente a la Norma este valor de deriva fue un 35.4% mayor. Estos aumentos en las derivas repercutieron en el aumento en el nivel de daño estructural, pasando de un daño moderado 1 a moderado 2 en el caso del edificio de 3 pisos, y de daño moderado 2 a daño moderado 3 en el edificio de 5 pisos. En ambos casos esto implicó un aumento de grietas y disminución de recubrimiento.

Respecto al edificio de 7 pisos el punto más crítico fue el suelo tipo E de la Norma, el cual dio una deriva del 1.39%. Para este edificio se puede decir que los puntos que están sobre el suelo E actualmente se están diseñando sobreseguro, pues los valores específicos de las

microzonificaciones no llegaron a este nivel de demanda. Sin embargo, el punto con mayor variación fue el Punto 10 con una diferencia del 68% respecto al valor de la Norma obteniendo una deriva de 1.29% respecto al 0.77% del suelo C. En este punto se pasó de un daño Moderado 1, en el cual apenas se observan fisuras, a un daño moderado 3, en el cual la mayoría de los elementos estructurales presentan agrietamientos.

Para el edificio de 10 pisos el máximo valor fue de 1.62% en el Punto 5 con una diferencia 65% respecto al valor de la Norma, pasando de un nivel de daño Moderado 1 a Severo. Esto quiere decir, que según la MS de la UAN la estructura presenta fallas localizadas en elementos estructurales y tiene deformaciones permanentes, lo cual posiblemente le genere falta de funcionalidad; por otro lado, con el valor de la Norma no se supera el límite permitido y los agrietamientos son pequeño los cuales no implican pérdida de estabilidad.

Estos aumentos en los niveles de daño mostraron que utilizar los factores de F_a y F_v de las microzonificaciones afectan en el comportamiento y seguridad estructural, y se observó como una estructura que cumple las normativas de diseño sismo resistente y que aparentemente no presenta daños localizados a nivel estructural, puede llegar a tener daños importantes que comprometen la integridad de la estructura y de las personas mismas.

Por otro lado, cabe destacar las diferencias de deriva que presentaron estructuras de diferente nivel de pisos para un mismo punto. A pesar de encontrarse en un mismo suelo de la ciudad, debido a las características intrínsecas del mismo como su periodo natural, amplifican más las ondas sísmicas para un periodo estructural. Por ejemplo, entre el edificio de 3 pisos (0.67%) y 7 pisos (1.18%) se presentó una diferencia del 0.51% en derivas indicando a nivel de daños que una estructura pasó de un estado de daño moderado 1, que considera derivas hasta de 0.8%, a un estado moderado 3 que considera derivas superiores a 1.13%, lo cual cambia las condiciones de seguridad de la estructura.

Así mismo, en el Punto 6 la diferencia de derivas entre los edificios de 5 y 10 pisos fue de 0.74%, teniendo menor valor de deriva el edificio de 5 pisos, pasando de un nivel de daños moderado 2 con 0.87% para el de 5 pisos a daño severo con 1.61% para el de 10 pisos. Esto evidenció como una misma zona es más crítica para un tipo de estructura con respecto a otra amplificando más una señal sísmica. Por ello se buscó definir cuales zonas eran más riesgosas para una estructura y cuales más favorables.

8.3. ANÁLISIS DE UN ESCENARIO SÍSMICO

En esta sección se realizó un escenario sísmico en Popayán, utilizando una señal sísmica originada en un lugar con condiciones tectónicas similares, para ofrecer una visión detallada de un posible efecto ante un sismo particular. Para el análisis se compararon los espectros de aceleración obtenidos por el procesamiento de una señal sísmica con los espectros de diseño de la NSR-10 siendo posible observar cómo se amplificó la señal sísmica de un suelo a otro y sus diferencias con lo que plantea la Norma.

8.3.1. ANÁLISIS DE LOS DESPLAZAMIENTOS MÁXIMO DE LOS ESTRATOS DE SUELO

En la Figura 98 se puede apreciar los desplazamientos de los estratos de suelo representativos de cada una de las cinco zonas descritas por el SGC en sus MS, en el cual se observó que cada estrato de suelo es distinto en su comportamiento debido a la profundidad del perfil de suelo hasta llegar a roca sólida. Por ejemplo, en la zona de Popayán clasificada como Terrazas Altas A, la distancia de la superficie hasta la roca firme fue de solo 20 metros; en Colinas A de 80; en Terrazas altas B 108 m; en Colinas B 110m y en Planicies A y B de 150 m, siendo el registro más profundo.

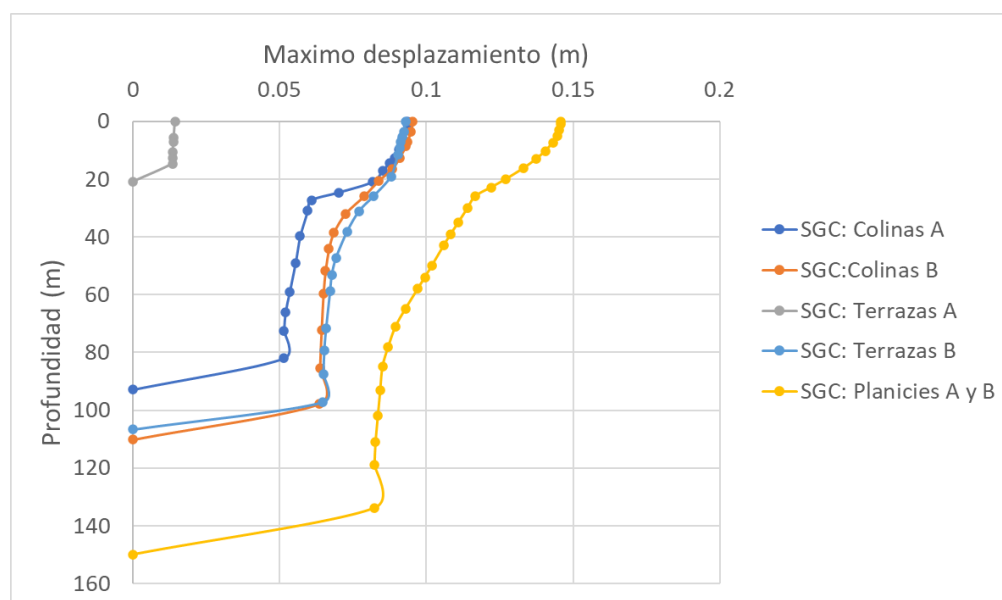


Figura 98. Deformaciones máximas de los 5 perfiles de suelos representativos de cada una de las zonas descritas por la MS del SGC en función de su profundidad.

Fuente: Elaborado por los autores

La profundidad de los estratos suelos blandos hasta llegar a la roca firme influye directamente en el comportamiento del suelo frente al movimiento sísmico. A mayor profundidad de los estratos de suelo blando, mayor es la amplificación de las ondas sísmicas debido a que tiene una mejor rigidez y mayor capacidad de deformación. Esto es lo que permitió que existan mayores desplazamientos del suelo durante el sismo incrementando la demanda estructural en las edificaciones, por el contrario, en sectores donde la roca firme se encontró a menor profundidad, la transmisión de las ondas sísmicas fue más directa y con menor amplificación, reduciendo los desplazamientos y por ende la vulnerabilidad de las estructuras, este efecto es fundamental en la microzonificación sísmica ya que permite identificar las áreas con mayor susceptibilidad a sufrir daños.

Así, el periodo de vibración del suelo está directamente relacionado con la profundidad de sus estratos blandos. Por ejemplo, en Terrazas A se encontró la menor profundidad hasta la

roca firme, con una longitud de 21.84 m, en dicha zona el periodo natural del suelo estuvo entre 0.1 - 0.25s; en Colinas A, la profundidad fue de 97.44 m y el periodo natural del suelo estuvo entre 0.4 a 0.55s; y en Planicies A y B que tuvo una profundidad 157.5 m, el periodo estuvo entre 0.9 y 1.1s. Según lo anterior se mostró que a mayor profundidad, el suelo tiende a tener un periodo fundamental alto, es decir, que oscila con mayor lentitud durante el movimiento sísmico, por el contrario, en zonas donde la roca firme estuvo más cerca de la superficie, el periodo fue más corto, lo que significa que en el suelo se producen oscilaciones más rápidas.

Este fenómeno está relacionado directamente con las estructuras, ya que los edificios, tienen sus propios periodos de vibración según su altura y sistema estructural. Cuando el periodo natural del suelo coincide con el periodo de la estructura, ocurre el fenómeno de resonancia, lo que amplifica las fuerzas sísmicas y aumenta significativamente el riesgo de los elementos estructurales. Por ejemplo, en Terrazas A, debido a la composición del estrato de suelo, para una edificación que tenga un periodo de vibración corto (0.1 – 0.3s) sería la zona donde se producirían las mayores derivas y solicitaciones de la ciudad, esto se evidenció en la Tabla 14, donde en Terrazas A, la mayor deriva se presentó en la edificación de 3 pisos.

Esta relación entre la profundidad y el tipo de suelo y estructuras es importante para la planificación urbana, ya que permiten definir qué tipo de edificaciones con más seguras según en que zona se diseñen. Siguiendo con el ejemplo anterior, en Terrazas A, la estructura menos recomendable de construir sería la edificación de 3 pisos.

8.3.2. ANÁLISIS DE LOS ESPECTROS DE AMPLIFICACIÓN

Con el escenario sísmico planteado, se pudo observar el comportamiento de las estructuras en la ciudad frente a un sismo de gran magnitud, planteando un caso en el cual las estructuras se vieron muy afectadas como se observa en la Figura 83. De acuerdo con los resultados de la Sección 7.2 y 7.3 y como se observó en la Tabla 18, las aceleraciones en superficie producto del sismo Landers fueron mayores a las del espectro de diseño de la NSR-10, especialmente para periodos estructurales cortos ($TC_{sueloC} = 0.53s$; $TC_{sueloD} = 0.59s$; $TC_{sueloE} = 0.85s$), periodos los cuales se presentan con mayor frecuencia a lo largo de toda la ciudad según el modelo de exposición del SGC.

Los espectros de aceleración en superficie se compararon con los espectros de la Norma para identificar el comportamiento en cada zona. Esta comparación se realizó en la Figura 99 al 101 agrupando los perfiles de las zonas del SGC (2020) con el tipo de suelo que según la NSR-10 se encuentra en el mismo lugar. En la Figura 99 y 100 se observa que en un suelo tipo E y C, es decir, las zonas de Planicies A y B y Terrazas A respectivamente, para periodos intermedios el espectro de la NSR-10 superó las aceleraciones del sismo de prueba. Por ello las estructuras diseñadas sobre un suelo tipo E y C y con periodos mayores a 0.85s, en la actualidad, estarían seguras frente a la ocurrencia del sismo en cuestión.

De igual forma, en la Figura 101 se observa como las zonas que el SGC clasifica como un suelo D (Colinas A, Colinas B y Terrazas altas B) tuvieron pseudo aceleraciones mayores a los espectros de la Norma, para periodos menores a 1s, concluyendo que para las edificaciones diseñadas con el actual código de diseño ubicadas sobre un suelo D, este es un sismo de gran daño para estas zonas de la ciudad.

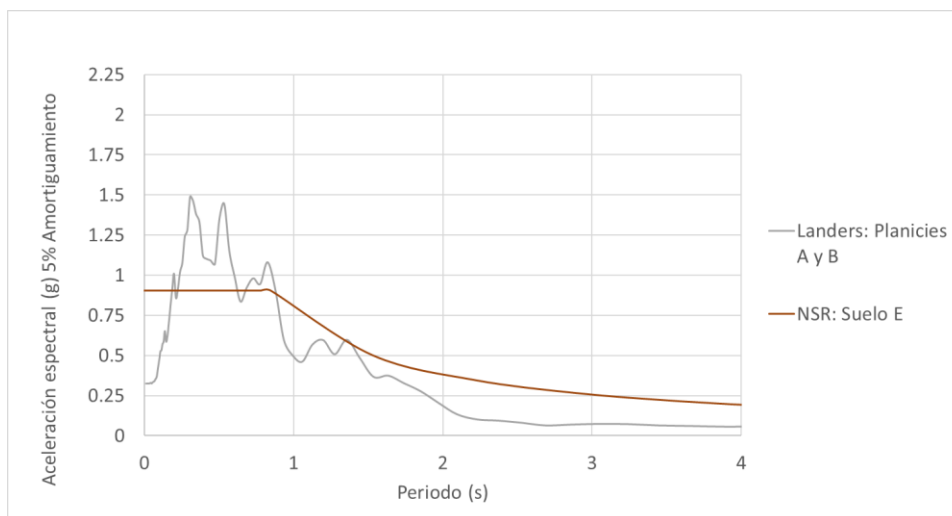


Figura 99. Comparación de los espectros de aceleración entre perfiles en las zonas de la MS a cargo del SGC y el suelo tipo E de la NSR-10.

Fuente: Elaborado por los autores.

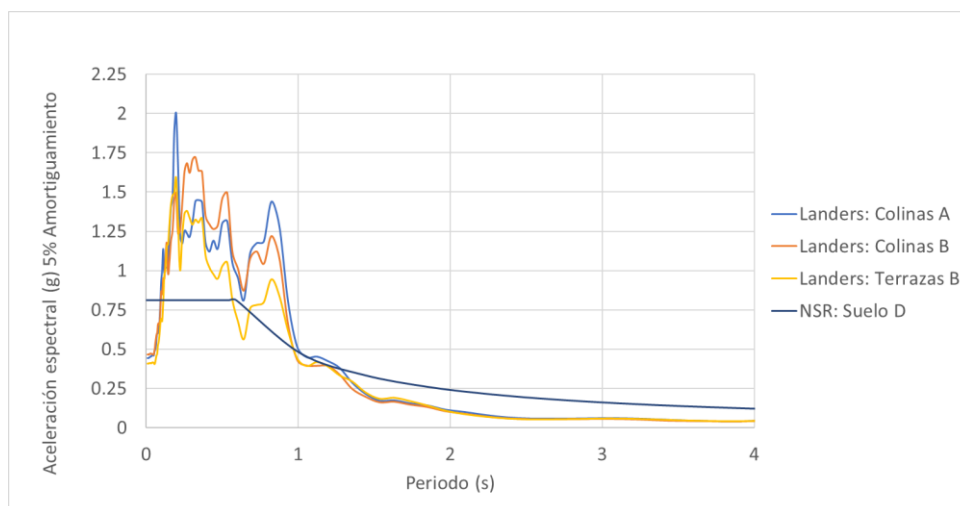


Figura 100. Comparación de los espectros de aceleración entre perfiles en las zonas de la MS a cargo del SGC y el suelo tipo D de la NSR-10.

Fuente: Elaborado por los autores.

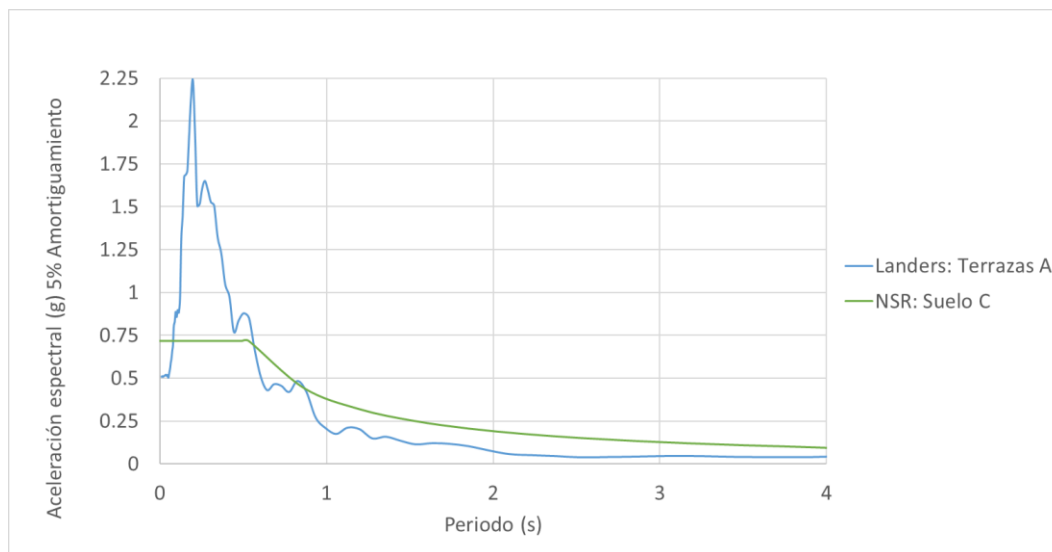


Figura 101. Comparación de los espectros de aceleración entre perfiles en las zonas de la MS a cargo del SGC y el suelo tipo C de la NSR-10.

Fuente: Elaborado por los autores.

Al comparar los espectros de la Norma con los obtenidos en el software, se obtuvieron las mayores diferencias en la meseta del espectro con valores de 60%, 114% y 211% para el suelo tipo E, D y C respectivamente. En este caso se observó que entre mejor sea el suelo considerado por la NSR-10 más alta fue la diferencia, por lo que se puede decir que la Norma es menos conservadora entre mejores características tenga el suelo. Sin embargo, se puede decir que la forma como la Norma clasifica el suelo, a través de parámetros como la V_s o número de golpes del SPT no es suficiente para determinar la verdadera amplificación del suelo, porque inclusive el suelo de la Norma tipo C, que debió ser el más rígido, fue el que más amplificó los valores de aceleración para periodos cortos (2.25%g), inclusive más que los otros dos tipos de suelo (1.5%g y 2.0%g para el suelo D y E respectivamente), que son los que se espera que tenga mayor amplificación.

Esto está relacionado con los factores de F_a y F_v que se analizaron en la Sección 8.1. y se pudo evidenciar que los perfiles de suelo E fueron mejores que lo que estima la Norma por medio de la V_s . Por tanto, el V_s mostró no ser un buen factor de clasificación de los suelos, al menos para estimar la amplificación por efecto de sitio, porque a pesar de que los suelos en la zona de Planicies tuvieron bajas V_s , su capacidad de amplificar el efecto de sitio fue menor a como la Norma lo asume. Y, al contrario, el suelo C, que tuvo mayor V_s y por tanto se esperaba que sea más rígido, en realidad amplificó más las ondas sísmicas en periodos cortos respecto a lo que supone la Norma.

8.3.3. ANÁLISIS DE AMPLIFICACIÓN EN UN ESCENARIO SÍSMICO

Respecto al efecto de amplificación de los suelos presentes en la ciudad, estos afectan de manera distinta el comportamiento estructural en cada una de las zonas debido al periodo del suelo y al de la estructura. Por ejemplo, en la Figura 84 se observó que al presentarse el sismo de Landers con la señal sísmica de la estación RSN850, en el caso del edificio de 7 pisos, en Terrazas altas A existió una deriva del 0.32% y en Colinas A el edificio sufrió una deriva del 1.06% excediendo el límite de cumplimiento de la NSR-10. En términos de niveles de daño, pese a enfrentarse al mismo sismo, se observó la amplificación de las ondas sísmicas entre una zona y otra, pasando de ni siquiera tener algún daño estructural a tener un daño moderado 2 en el cual se presentan daños estructurales y no estructurales que comprometen la seguridad y estabilidad de la edificación. En el caso del edificio de 3 pisos, mientras que en Terrazas altas A, tuvo una deriva de 0.73%, en Colinas A y B llegó a tener una deriva máxima de 1.01% pasando de un daño leve a moderado 2.

Lo anterior mostró un efecto de sitio en el cual la mayor amplificación entre una zona y otra se presentó en el edificio de 7 pisos incrementando la demanda sísmica en un 300%. Este mismo comportamiento se presencié en la estación RSN848 del sismo de Landers en la Figura 83, ya que entre la zona de Terrazas A y Colinas A la señal del sismo se amplificó en más del 200%. La amplificación de los suelos se puede explicar gracias a la variedad en la composición de los estratos de suelo en la ciudad, ya que las características geológicas varían en distancias relativamente cortas como se observan en las perforaciones y modelados que expone el SGC en su documento. Como gran parte de la ciudad cuenta en sus capas superficiales con suelos blandos (depósitos aluviales, específicamente MH, según Diaz et al. 2020) la señal del sismo se amplificó como se observó en la Figura 82.

En el caso de la señal registrada por la estación RSN848, las aceleraciones que se presentaron fueron tan altas (véase Tabla 18) que las estructuras presentaron un daño considerable frente a un sismo de estas características, con derivas por encima a los límites establecidos por la Norma. Por ejemplo, si un evento sísmico tectónicamente similar, de gran magnitud (7.3Mw) ocurriera en Popayán, los daños en las estructuras podrían ser de gran importancia llegando, según la metodología FEMA, al daño severo.

La metodología utilizada no solo mostró una visión de la amplificación de las señales sísmicas en los suelos presentes en la ciudad, sino que, junto con el programa elaborado en Matlab (Versión R2023b) permitió calcular las derivas esperadas para cada tipo de estructura analizada según la aceleración de un sismo en específico, brindando una combinación de herramientas valiosa para futuras investigaciones, donde sea posible identificar rápidamente las zonas más afectadas en la ciudad junto con el modelo de exposición descrito también en el presente estudio, para calcular las afectaciones probables de acuerdo al avalúo catastral de la ciudad según la zonificación por comunas.

8.3.4. COMPARACIÓN DE MAPAS DE RIESGO EN UN ESCENARIO SÍSMICO

En la Figura 102 se compararon los resultados de mapas de derivas obtenidos con el programa de Deepsoil para la señal sísmica RSN850 con los mapas de deriva de los otros estudios (NSR-10, SGC y UAN) con el objetivo de identificar a que estudio se acercan más los resultados de deriva de unos puntos específicos de la ciudad frente a un sismo y así evidenciar cuál de ellos está representando mejor el comportamiento del suelo de la ciudad.

En el caso del edificio de 3 pisos, en la Figura 102 se pudo observar a grandes rasgos que el comportamiento del sismo de Landers se asemejó al de la microzonificación del SGC, obteniendo el mismo nivel de daos para casi todas las zonas, con la excepción de Terrazas A que en la MS tuvo un nivel de daños mayor. En este mismo edificio la microzonificación de la UAN tendió a parecerse enfocando las zonas con menor riesgo en el centro de la ciudad y dejando toda la periferia con un daño moderado.

Para el edificio de 7 pisos existieron mayores divergencias entre cada estudio y los obtenidos en el caso específico por lo cual se analizó las similitudes y diferencias que tiene con cada uno. En primer lugar, los resultados obtenidos con la NSR-10 presentaron el mismo comportamiento para las zonas externas de la ciudad, sin embargo, la NSR tuvo los resultados más alejados en la zona central donde se mostró una zona más critica que para el caso específico no se presentó y antes por el contrario mostró una zona de menor daño estructural. En segundo lugar, está el estudio del SGC que también coincidió con el mismo nivel de daños para las zonas periféricas de la ciudad, sin embargo, este estudio presentó mayor riesgo en la parte central alejándose de los resultados del caso específico. En último lugar, con el estudio de la UAN, si bien coincidieron en que la zona con mejor comportamiento es la cercana al rio Cauca, las demás zonas incrementaron el riesgo sísmico llegando hasta niveles de daño severo, convirtiéndose en el estudio más alejado a lo que se presentó en el caso específico.

Esta divergencia en los resultados permitió observar que hace falta un consenso entre los distintos estudios que se han realizado para la ciudad que muestren un comportamiento más certero, y así mismo es necesario seguir investigando y generando modelos de riesgo sísmico que lleguen a un común acuerdo sobre el riesgo de cada una de las zonas de la ciudad para que los diseños sismo resistentes de la ciudad se puedan efectuar de una manera apropiada y acorde a las condiciones locales.

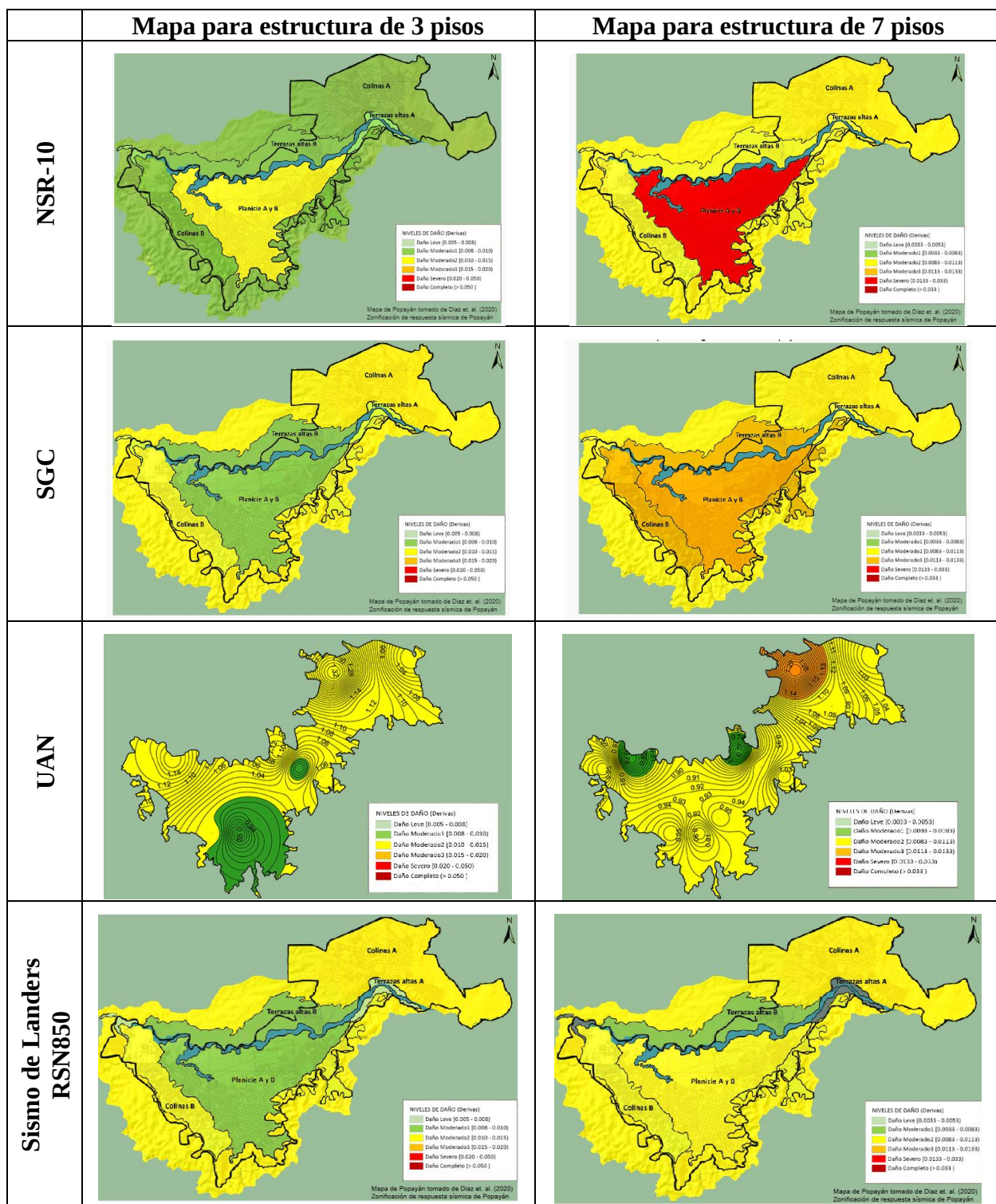


Figura 102. Resultados de deriva obtenidos con el programa de Matlab (Versión R2023b) con los factores de amplificación de la MS del SGC

Fuente: Elaborado por los autores.

8.4. MAPAS DE RIESGO SÍSMICO Y APLICACIÓN DEL PROGRAMA

De los mapas de riesgo sísmico fue posible ver con claridad cuál es el comportamiento de las diferentes estructuras distribuidas a lo largo de los suelos de Popayán. De esta forma, tienen su principal aplicación dentro de la planeación de una ciudad ya que, teniendo la información de la tipología estructural más típica dentro de cada área es posible definir qué zona es la más afectada en el escenario sísmico de diseño. Si se logra identificar qué zonas tienen mayor vulnerabilidad sísmica, podrá ser un foco de atención frente a estos sucesos por parte de las autoridades de emergencia. De esta forma se analiza que zonas son las más riesgosas de acuerdo con las tipologías estructurales prototipo realizadas y como esta herramienta puede ayudar en planes de acción y prevención contra riesgos sísmicos.

8.4.1. ANÁLISIS DE ZONAS CON MAYOR RIESGO SÍSMICO

A continuación, se explica los resultados de zonas más vulnerables o riesgosas encontradas con cada estudio para cada tipología de análisis. Para iniciar se encuentran los mapas de riesgo definidos por los coeficientes de la NSR-10 (Ver Anexo 2), los cuales representan el diseño actual de las estructuras por ser el estudio normativo. En este estudio Planicies A y B fue la zona con mayor riesgo para las estructuras de pórticos de 3, 7 y 10 niveles. Esto se debió a que para la Norma se trata de un área con suelo tipo E, el cuál es el suelo más crítico en la ciudad según la Norma. De esta forma la excepción se presentó en el edificio de 5 pisos donde a pesar de que el suelo E tuviera las derivas más altas, el comportamiento general de los edificios fue similar, encontrándose en el mismo nivel de daños.

Para los mapas del SGC Colinas A y Colinas B fueron las zonas de mayor riesgo para edificios de 3 y 5 pisos, destacando que el norte de la ciudad, un sector del sur y toda la periferia se encuentra en esta zona. Caso contrario ocurrió en los edificios más altos de 7 y 10 pisos las zonas más críticas fueron Planicies A y B que corresponde al centro y mayor parte del occidente de la ciudad.

Para el UAN, en los edificios se presentó el siguiente comportamiento:

- **Pórticos 3 pisos:** La zona suroriente fue la más favorables para edificios de pórticos de 3 pisos, mientras que el resto de la ciudad presentó un comportamiento similar
- **Pórticos 5 pisos:** La zona noroccidental fue la más riesgosa, mientras que solo existieron dos puntos ubicados el centro de la ciudad en donde el comportamiento fue satisfactorio.
- **Pórticos 7 pisos:** Presentó el mejor comportamiento en las mismas áreas que el edificio de 5 pisos, sin embargo, las zonas críticas se desplazaron a casi toda la ciudad cubriendo el norte, sur y parte del centro de la ciudad. El punto más crítico se encontró sobre el oriente de la ciudad.
- **Pórticos 10 pisos:** Tuvo un comportamiento de daño severo en casi toda la ciudad, a excepción del oriente central en el cual se presentó el menor riesgo.

Lo anterior rectifica que según las características estructurales de las edificaciones existen zonas con un mayor o menor riesgo sísmico, en las cuales algunas configuraciones estructurales son más vulnerables. Tal es el caso del área abarcada por Planicies A y B que para los 3 estudios mostró el mayor riesgo sísmico en los edificios de 10 pisos.

Sin embargo, comparando los tres estudios, no existe un acuerdo común sobre cuál es el comportamiento estructural referido a nivel de daños en la mayoría de las zonas. Por ejemplo, para edificios de 3 pisos de pórticos, por una parte, Planicies A y B fue la zona con mayor riesgo para la NSR-10, pero para el SGC esta fue la mejor área de la ciudad. Para edificios de 5 pisos, la NSR-10 contempló toda la ciudad con un comportamiento similar, mientras que el estudio de UAN indicó una zona norte con mayor riesgo y una zona central con mejor comportamiento estructural. En el edificio de 7 pisos no se pudo apreciar ningún patrón de comportamiento, puesto que cada estudio presentó niveles de daño diferentes en casi toda la ciudad, indicando la necesidad de estudiar a fondo la razón de estas diferencias.

Finalmente, para el edificio de 10 niveles destacaron dos puntos: primero la zona de Terrazas A que tuvo el mejor comportamiento con un nivel de daños moderado 2 en los mapas del SGC y NSR, pero que según la UAN en el Punto 10 tuvo un nivel de daños severo; y segundo, la zona que está más al oriente, en la cual ocurrió lo contrario, el SGC presentó un nivel de daño severo, mientras que la UAN en el Punto 4 presentó daño moderado 2. Esto mostró como la caracterización dinámica del suelo de la ciudad presenta diferentes condiciones para los dos estudios, cuando deberían ser similares. Analizando estos dos puntos (Punto 4 y 10), lastimosamente se encontró que el estudio de la UAN no tiene perforaciones allí, por lo cual sus valores dependen de la interpolación de otros datos.

8.4.2. APLICACIÓN DEL PROGRAMA FRENTE A ESCENARIOS SÍSMICOS FUTUROS

Por otro lado, con la opción del programa llamada “Comportamiento bajo escenario sísmico específico” que permite ingresar valores de pseudo aceleraciones para cada una de las zonas provenientes de una señal sísmica específica, se realizó un escenario sísmico probable para evaluar el comportamiento real de la ciudad. Para ello, con ayuda del software Deepsoil (Versión 7.1.2.0) se obtuvo la amplificación de una señal sísmica por efectos del suelo, como se presenta en la Sección 7.3.

Con esta amplificación en superficie se obtuvieron derivas (véase Tabla 18) para observar el comportamiento de las estructuras de la ciudad para un sismo en específico, en este caso bajo la señal sísmica Landers RSN 850. En estos mapas se destaca que la mayoría de la ciudad frente a un sismo de tales características presentó daños moderados 3 y severos en las estructuras de 3 y 7 pisos, ya que los valores de pseudo aceleraciones producto del sismo fueron superiores a los del sismo de diseño de la Norma.

Sin embargo, no se presentaron niveles de colapso, lo cual permite decir que se está cumpliendo con la filosofía de diseño de la Norma, de que la estructura debe resistir un sismo

fuerte con daños a elementos estructurales y no estructurales, pero sin colapso (AIS, 2010). Esto mostró como a pesar de superar las aceleraciones del espectro de diseño, se sigue cumpliendo con los resultados esperados por la Norma.

Por último, tomando como base el estudio de Bernal y Cardona (2024) es posible pensar en distintas aplicaciones de esta función para un futuro:

1. Después de un sismo, recopilando las señales sísmicas, es posible identificar el comportamiento de la ciudad según sus tipologías estructurales para ese sismo en específico logrando identificar las zonas más afectadas un corto tiempo después de producido el sismo, con la intención de enviar los cuerpos de rescate y de ayuda humanitaria a los puntos donde pueda existir el daño más importante
2. Obtener un estimativo del daño ocasionado por el sismo, que junto al modelo de exposición catastral descrito en la Sección 4.1.4. pueda mostrar el número de viviendas afectadas por manzana y el costo de los daños, teniendo en cuenta las limitaciones y generalizaciones de dicho modelo.
3. Realizar escenarios sísmicos con sismos que ocurrieron en otros lugares con características geológicas similares a las de Popayán y así poder obtener resultados los cuales pueden ser usados para medidas de prevención y para futuras investigaciones.

9. CONCLUSIONES

- Para una ciudad como Popayán, ubicada en una zona de alta sismicidad y por los antecedentes de daños significativos en consecuencia de la actividad sísmica, es fundamental contar con estudios de Microzonificación sísmica. Estos estudios permiten determinar coeficientes de amplificación sísmica ajustados a las condiciones geotécnicas de cada zona de la ciudad, proporcionando datos más precisos para el diseño sismorresistentes, mejorando la fiabilidad de los diseños estructurales y contribuye a una planificación urbana más resiliente ante futuros eventos sísmicos.
- Se compararon los factores de amplificación sísmica F_a y F_v obtenidos de dos microzonificaciones realizadas para Popayán (Pérez et al., 2020 & Universidad de los Andes, 2012) con los factores dados por la NSR-10 identificando diferencias en la estimación del efecto de sitio. En la mayoría de los puntos analizados, las microzonificaciones sísmicas presentaron mayores valores de amplificación a las estimadas por la NSR-10 en suelos tipo C y D, es decir suelos con velocidades de onda de corte entre 760 y 180m/s. Sin embargo, en suelos tipo E, donde la velocidad de onda de corte es menor a 180m/s, la NSR-10 presentó un enfoque más conservador, estimando aceleraciones más altas a las obtenidas a partir de los factores presentados en las microzonificaciones. Estas diferencias resaltan la importancia de estudios locales para mejorar la caracterización del comportamiento sísmico del suelo en la ciudad.
- Si bien ambas microzonificaciones aplicaron metodologías reconocidas, como la caracterización geotécnica mediante ensayos de laboratorio y de campo, análisis de propagación de ondas y modelos de respuesta sísmica, se identificaron diferencias en los coeficientes de amplificación, esta diferencia posiblemente se debió, en gran parte, a la variabilidad en la caracterización geotécnica del suelo. El estudio del SGC incluyó un número de ensayos y una mayor cobertura de perfiles estratigráficos, lo que permitió definir zonas geotécnicamente homogéneas, en cambio, la UAN trabajó con una cantidad menor de muestras puntuales, lo que pudo limitar la representatividad en algunas zonas.
- La deriva máxima y el cortante basal fueron parámetros importantes para evaluar el comportamiento estructural, ya que permitieron estimar el nivel de daño y las sollicitaciones que experimenta la estructura durante un sismo. En este estudio, se identificó las variaciones en estos parámetros al comparar los resultados obtenidos con las microzonificaciones revisadas; se encontró que las diferencias en los coeficientes de amplificación sísmica impactan directamente aumentando el cortante basal y la deriva con respecto a la Norma, especialmente en las zonas donde los efectos de sitio son más pronunciados. El análisis mostró que, en sectores con suelos de baja rigidez como el Punto 8 y 1 de la UAN, los valores de deriva aumentaron significativamente en comparación con los suelos más rígidos como el suelo tipo D

de la NSR y Terrazas A del SGC, mostrando la influencia de la aceleración sísmica y la caracterización geotécnica en el comportamiento de la estructura, asimismo, la amplificación del movimiento del suelo en ciertas zonas generó un incremento en las fuerzas sísmicas, afectando la demanda estructural y, por ende, la seguridad de las edificaciones.

- Se encontraron diferencias producto de la variación del efecto de sitio para la mayoría de las estructuras prototipo afectando tanto la deriva máxima como el cortante basal. En estructuras de pórticos las diferencias en derivas y en cortante basal fueron de hasta un 35% en todas las estructuras y hasta del 64% en el edificio de 10 pisos. En cuestión de cortante basal el efecto de sitio amplificó la solicitación sísmica hasta de 4 veces el peso de la estructura en puntos, como el Punto 6 de la UAN o Planicies B del SGC, mientras que en otros puntos como el Punto 3 de la UAN o Terrazas A del SGC solo se amplificó una tercera parte.
- Se observó las diferencias de amplificación de los suelos a lo largo de toda la ciudad comparando los valores de aceleración de cada estudio. Se destacó el caso de los edificios con periodos cercanos a 0.7s, específicamente entre las zonas de Terrazas A y Colinas A del SGC, con una diferencia de 0.76%g en el valor de la pseudoaceleración entre estas zonas, lo cual se tradujo en incrementos del 1.16% en la deriva en la Zona de Colinas A respecto a Terrazas A. Por otro lado, si bien también existió amplificación del suelo para una estructura de 3 pisos (0.33s) la diferencia no fue tan notoria con un valor de 0.33% en la deriva, observando que los suelos de Popayán varían en la forma como amplifican las ondas sísmicas y posiblemente estas diferencias son más notorias en estructuras con periodos intermedios (0.7s)
- Los mapas de riesgo generados a partir de la deriva máxima permitieron identificar preliminarmente, para las estructuras prototipo, las zonas más vulnerables de la ciudad según cada microzonificación estudiada (SGC, 2020 y UAN, 2012). Estos mapas fueron creados con el propósito de identificar las áreas donde las estructuras presentan la mayor demanda sísmica, facilitando la identificación de sectores con mayor riesgo estructural, los resultados mostraron las posibles zonas donde se presentarían las mayores derivas, coincidiendo con áreas de suelos más blandos. Específicamente se determinó que la zona centro y sur fue más crítica para estructuras de 7 y 10 pisos, mientras que fue la más favorable para el edificio de 3 pisos.
- Se trabajó con edificaciones prototipo donde fue posible observar de forma preliminar, un comportamiento general de las estructuras en el área de la ciudad en función del número de pisos, y que a pesar de que no sean edificaciones reales ni representativas de Popayán se mostró como el efecto de sitio cambia de forma significativa las solicitaciones sísmicas. Así se da a conocer una metodología capaz de replicarse con más tipos de estructuras, donde varíen las características de estas, desde la tipología estructural y el número de pisos, hasta posiblemente, tener en

cuenta factores como las irregularidades en planta, en altura y variaciones en la rigidez.

- Al procesar la señal sísmica a través de los estratos de suelo en Popayán fue posible observar la amplificación, del suelo con un sismo real, lo que reflejada que la pseudoaceleración se aproxima más con la obtenida en el análisis con los factores de amplificación de las microzonificaciones. Por lo anterior se consideró importante integrar estos estudios en el diseño estructural de las edificaciones en Popayán. Además, la metodología propuesta, permitió evaluar el posible comportamiento de las estructuras ante un sismo de magnitud superior a 7.0 en la escala Richter para identificar áreas vulnerables de la ciudad ante un evento en particular.
- Este estudio aportó al conocimiento científico ya que hace posible cuantificar las diferencias e impacto del efecto de sitio en las estructuras de la ciudad al considerar los efectos de sitio locales de los suelos de la ciudad presentados por las microzonificaciones con respecto a la estimación que hace la NSR-10 por medio de los factores de amplificación F_a y F_v . Con lo anterior, se hizo posible identificar las consecuencias presentadas al no elegir los estudios de microzonificación, resaltando la importancia de integrar estos estudios en el diseño sismorresistente ya que, al tener una caracterización detallada del suelo, es posible optimizar el desempeño sísmico de las edificaciones promoviendo diseños más seguros y eficientes. En Popayán, es posible identificar las zonas de mayor vulnerabilidad para fortalecer la planificación urbana y proporcionar herramientas que en futuro, puede contribuir a la gestión del riesgo sísmico y apoyar la toma de decisiones de los cuerpos de emergencia y seguridad.

10. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda estudiar y analizar con mayor profundidad cuál de las dos microzonificaciones existentes para Popayán representa mejor las condiciones locales del suelo de la ciudad para que pueda ser oficializada en el diseño sismo resistente.

Se espera analizar el comportamiento de otras tipologías estructurales que incluyan otros números de pisos, geometría y sistemas estructurales que se encuentren presentes en la ciudad para realizar un análisis más específico de las condiciones estructurales de la ciudad.

Como parte de los trabajos futuros se espera construir un mapa de riesgo con los factores de F_a y F_v de las microzonificaciones, pero ubicando en la ciudad el grupo de edificaciones predominantes y representativos de cada área, según modelos de exposición como el de Pérez et. al. (2020) que permitan tener un comportamiento real de la ciudad frente a un evento sísmico.

Con el programa desarrollado en Matlab (Versión R2023b) se busca crear una herramienta que funcione en tiempo real y que conectada a las redes de acelerógrafos de Popayán y a programas de procesamiento de señales sísmicas permita mostrar el comportamiento de las estructuras frente al movimiento sísmico y estimar los daños potenciales en toda la ciudad de forma que guíe la gestión del riesgo y los cuerpos de emergencia a actuar de manera oportuna.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar Falconí, R. (2006). *Evaluación rápida de la deriva máxima de piso para calcular la vulnerabilidad sísmica de estructuras*. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).

Aguiar, R., Espinosa, A., Carrión, J., & Zambrano, V. (2018). *La velocidad de la onda de corte no es suficiente para clasificar el suelo*. *Ciencia*, 20(1), 12-33.

Aldana-Carrillo, J. C., Rodríguez-Mejía, A., & Monsalve-Jaramillo, H. (2009). *Espectros de respuesta elásticos de desplazamiento para la ciudad de Armenia, apropiados para el diseño sísmico basado directamente en desplazamientos (dbdd)*. *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, 19(1), 86-103.

Andrade Insúa, L. E. (2004). *Control de la deriva en las normas de diseño sismorresistente*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Araca Llanos, F. H., Gómez Catacora, L., Cahui Galarza, A., & Marín Mamani, G. (2020). *Influencia de la interacción suelo-estructura en el comportamiento de las viviendas aporricadas con zapatas aisladas en la ciudad de Juliaca*. *Revista Científica de la UCSA*, 7(2), 70-81.

Aranguren Sedano, A. (2011). *Análisis Comparativo de las Implicaciones Económicas entre la NSR-98 y NSR-10 (Caso de Estudio en la Ciudad de Bogotá)*.

Arcila, M. García, J., Montejó, J., Eraso, J., Valcarcel, J., Mora, M., Viganò, D., Pagani, M. y Díaz, F. (2020). *Modelo Nacional De Amenaza Sísmica para Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano y Fundación Global Earthquake Model.

Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica (AIS). (2009). *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009*

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Bogotá D.C, Colombia.

Aversa, S., & Crespellani, T. (2016). *Seismic microzonation: an essential tool for urban planning in seismic areas*. *UPLanD - Journal of Urban Planning, Landscape & Environmental Design*, 1(1), 121. <https://doi.org/10.6093/2531-9906/5035>

Bernal, G., & Cardona, O., (2024). *SISMAN LISA Sistema automático de evaluación de daños post terremoto de Manizales*. XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.

Borrero Chaux, M. C. (2011). *Estimación de la variabilidad de la deriva y del cortante basal resistente de pórticos de concreto reforzado en Bogotá*. Pontificia Universidad Javeriana

Blog de CEUPE. (2024). CEUPE. *Obtenido de QGIS: ¿Qué es y qué ventajas ofrece?:* <https://www.ceupe.com/blog/qgis.html?dt=1727359954783>

Briones Sánchez, P. S., & Álvarez Chiriboga, J. L. (2018). *Comparación del modelamiento, análisis y diseño estructural en concreto armado utilizando los Software Etabs y Robot structural analysis, para un edificio de cinco niveles (cuatro pisos y un semisótano)*.

Carrillo, J. (2013). *Microzonificación y escenarios sísmicos para la ciudad de Apizaco, Tlaxcala* (Doctoral dissertation, Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México).

Cassano, A. M. (2009). *Análisis de estructuras bajo acciones dinámicas*. Editorial Universitaria de la Universidad Tecnológica Nacional.

Cafeto MH (2023). *Comunas de Popayán. Español: División administrativa de Popayán* [Imagen] https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Comunas_de_Popay%C3%A1n.svg

Ceballos, A. (2019). *¡Derivas!. ¿Por qué las chequeamos?* [Imagen] <https://andresceballos2019.wixsite.com/inicio/post/derivas>

Celigüeta-Lizarza, J. T. (2022). *Curso de Análisis Estructural*.

Celikbilek, A., & Sapmaz, G. (2016). *Risk management and microzonation in urban planning: an analysis for Istanbul*. Disaster Science and Engineering, 2(2), 59-66.

Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos - CEDERI. (2006). *Capítulo 4: Respuesta dinámica del subsuelo y Efectos de sitio*. En: Estudios de amenaza, respuesta dinámica y microzonificación sísmica para la ciudad de Ibagué. Alcaldía municipal de Ibagué. Bogotá

Cervantes García, F. R., & Albrizzio Francia, Y. O. M. (2020). *Desempeño sísmico de un hospital de concreto armado con disipadores “SLB” Shear Link Bozzo en la zona sísmica 4*

Churacutipa Mamani, M. A. (2016). *Análisis comparativo del método matricial frente al software Etabs 2015 en el análisis estructural de edificaciones*.

Chuy, T. (2013). *Sismos una Responsabilidad Compartida Ciencia y Comunidad en la Gestión de los Riesgos Naturales*.

Computers & Structures, Inc. (CSI) (2021). ETABS (Versión 21.2.0) [Software de Computador]. SAPFIRE. <https://www.csiamerica.com/products/etabs>

DANE (2020). *Colombia – censo nacional de población y vivienda – CNPV 2018*. Bogotá: Dirección de Censos y Demografía – DCD, Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Disponible en <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>

Dhakal, S., & Chaulagain, H. (2023). *Seismic behaviour of plan irregular reinforced concrete buildings considering soil effects*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 8(1), 46.

Díaz Hernández, D. M., & Alfaro Castillo, A. J. (2013). *Mapas de isoaceleración para Colombia utilizando la nueva generación de ecuaciones de atenuación (NGA-2008)*. Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, N.º 93. Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Díaz, F., Arcila, M., Mora, M., Valcárcel, J., Eraso, J., Perico, N., Lopez, M., Sarabia, A., Montejo, J., Barbosa, D., Pérez, L. (2020). *Zonificación de respuesta sísmica de Popayán*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Díaz-Parra, F., Mora, M., Eraso, J., Valcárcel, J. A., Arcila, M., & Montejo, J. (2018). *Propuesta metodológica de microzonificación sísmica Methodological proposal for seismic microzonation*.

Duque Escobar, G. (2022). *Manual de geología para ingenieros Cap. 15 sismos*. In Manual de geología para ingenieros.

EarthScope ANGLE (2018). *Influencia del tipo de terreno en los efectos de un terremoto*. [Imagen]. Seismic Geohazards & Earthquake Hazard Maps: Alaska emphasis.

EERI. (1996). *Post-Earthquake Investigation Field guide. Learning from earthquakes*. Earthquakes Engineering Research Institute, Publication No. 96-1.

FLORES, F. A., AYES, J. C., VARGAS, O., & VÁZQUEZ, A. (2014). *Análisis de respuesta de sitio: Una comparación práctica entre diferentes enfoques dimensionales*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, México.

Errázuriz Blau, J. T. (2012). *Microzonificaciones sísmicas en ciudades del mundo y discusión sobre la aplicabilidad en la ciudad de Santiago*.

Espíndola Castro, V. H., & Pérez Campos, X. (2018). *¿Qué son los SISMOS, dónde ocurren y cómo se miden?* Revista Ciencia, 69(3).

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1997). *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington, DC.: Report No. FEMA-273.

Fondo de Prevención y Atención de Emergencia (FOPAE). (2010). *Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismorresistente de edificaciones*. Bogotá: Coordinación de investigación y desarrollo.

Ghobarah A., Aly N. and El-Attar M. (1997). *Performance level criteria and evaluation. A criterial review of proposed guidelines*. Seismic design methodology for the next generation of codes. Fajfar and Krawinkler Editors, Balkema, Slovenia.

Gómez, D., Marulanda, J., & Thomson, P. (2008). *Sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas*. Dyna, 75(155), 77-89.

Gualdrón, D. F., & Rodríguez, J. L. (2020). *Aplicaciones SIG en estudios de microzonificación sísmica para ciudades intermedias*. Caso Tunja, Boyacá.

Hazus. (1999). *Earthquake Loss Estimation Methodology*. Department of Homeland Security. Federal Emergency Management Agency. Mitigation Division. Washington, D.C

Hernández, J. J., Schmitz, M., Audemard, F., & Malavé, G. (2006). Marco conceptual del proyecto de microzonificación de Caracas y Barquisimeto. In *VIII Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*.

Hurtado, J. E. (2000). *Introducción a la dinámica de estructuras*. Universidad Nacional de Colombia SEDE Manizales.

IDIGER (2024). *Caracterización General del Escenario de Riesgo Sísmico*. Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. Recuperado el 26 de octubre de 2024 de

<https://www.idiger.gov.co/rsismico#:~:text=El%20territorio%20colombiano%20presenta%20diferentes,amenaza%20s%C3%ADsmica%20intermedia%20y%20alta>.

Ingeominas & Universidad de los Andes (1997) *Proyecto de Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá D.C.*

Ingeominas & Comunidad Económica Europea (1991). *Mapa de Microzonificación de Popayán*. Microzonificación sismogeotécnica de Popayán

Kagermanov, A. (2017). *Análisis de un puente de tablero continuo sujeto a múltiples excitaciones sísmicas*. Hormigón y Acero, 68(283), 241-249.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.

Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS-UCR). (2024). Obtenido de Aceleración Pico Efectiva: <https://www.lis.ucr.ac.cr/mapas/2018-08-15-00:16:05/ape.php>

López, Pedro Luis. (2004). POBLACIÓN MUESTRA Y MUESTREO. *Punto Cero*, 09(08), 69-74. Recuperado en 10 de diciembre de 2024, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012&lng=es&tlng=es

The MathWorks Inc. (2022). *MATLAB* version: 23.2.0 (R2023b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. <https://www.mathworks.com>

Mena Hernández, U. (2002). *Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas* (Doctoral dissertation)

Montoya Cañola, J. G. (2018). *Análisis de la respuesta sísmica en las estructuras mediante la revisión del espectro sísmico de diseño según el reglamento colombiano de construcción*

sismo-resistente NSR-10 y el reglamento Argentino para construcciones sismo resistente INPRES-CIRSOC 103.

Moreno González, R. (2006). *Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal: Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona*. Universitat Politècnica de Catalunya.

Mosalam, K. M., Ayala, G., White, R. N., & Roth, C. (1997). *Seismic fragility of LRC frames with and without masonry infill walls*. Journal of Earthquake Engineering, 1(04), 693-720.

Nilson, A. H., & Darwin, D. (1999). *Diseño de estructuras de concreto* (pp. 105-121). Colombia: McGraw-Hill.

París, G., & Romero, J. A. (1994). *Fallas activas en Colombia*. Boletín geológico, 34(2-3), 4-25.

Pawirodikromo, W., Makrup, L., Teguh, M., Suryo, B., & Hartantyo, E. (2019). *Site coefficient of short Fa and long period Fv maps constructed from the probabilistic seismic hazard analysis in Yogyakarta Special Province*. In MATEC Web of Conferences (Vol. 280, p. 01001). EDP Sciences.

Pérez, B. (2014). *La peligrosidad sísmica y el factor de riesgo*. Informes de la Construcción, 66(534), e018-e018.

Pérez, H., Mora, M., Valcárcel, J., Perico, N., Montejo, J., Díaz, F., Arcila, M., Pérez, L. (2020). *Evaluación del Riesgo Sísmico en la ciudad de Popayán*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Pimbo Palate, F.y6666 P. (2021). *Análisis estructural del desempeño sísmico del edificio de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica mediante la medición de vibraciones* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Civil).

Piscal Arévalo, C. M., & López Almansa, F. (2018). *Propuesta para la futura norma de aislamiento sísmico de edificaciones en Colombia*. Dyna (Medellín), 85(207), 306-315.

Prada, E., Yamín, L., Rueda, R., & Rincón, R. (2017). *Incertidumbre en la respuesta dinámica unidimensional de depósitos de suelos para efectos de microzonificación sísmica*.

QGIS.org, (2024). *QGIS Geographic Information System*. (Version 3.34.9) QGIS Association. <http://www.qgis.org>

Rangel, A. J., & Villafañe, M. J. (2018). *Influencia del tipo de perfil del suelo en los costos para una estructura aporticada en la ciudad de Cartagena de acuerdo a la NSR-10*.

Raddatz, D. (2021). *Mapa de periodos fundamentales del suelo (T_g [s]) en zona de estudio*. [Imagen]. Propuesta de Microzonificación sísmica de las localidades de Reñaca y Concón, a partir de mediciones espectrales H/V Nakamura.

Rochel Awad, R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificios*. Universidad Eafit.

Romero González, O. D. (2013). *Valuación de inmuebles ubicados en zonas de peligro sísmico*. Arquitectura y Urbanismo, 34(3), 67-76

Rupay, M. J., Hinestroza, R. L., Freud Cayo, Y. N., Loayza Pérez, Á. B., & Buendía Ramos, A. C. (2023). *Análisis estructural para la determinación de la Rigidez lateral de un pórtico de concreto armado*. Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional, 8(12), 641-663.

Saavedra, C. A. (2016). *Verificación del cortante basal según Covenin 1756-2001*. Obtenido de: Material académico de materias de Ingeniería Civil en el área de estructuras: <https://saavedraonline.wordpress.com/2016/10/29/verificacion-del-cortante-basal-segun-covenin-1756-2001/#:~:text=El%20cortante%20basal%20en%20una,vamos%20acercando%20a%20la%20base.>

Salgado, M. A., Bernal, G. A., Yamín, L. E., & Cardona, O. D. (2010). *Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10*. Revista de ingeniería, (32), 28-37.

Salgado-Gálvez, M. A., Zuloaga Romero, D., Bernal Granados, G. A., & Cardona Arboleda, O. D. (2014). *Comparación de los resultados de riesgo sísmico en dos ciudades con los mismos coeficientes de diseño sismo resistente*. Revista de Ingeniería, (41), 8-14.

Sarria, A. (1979). 3. *El sismo de Popayán de 1983*. DESASTRES, 29.

SEAOC (1995), *Vision 2000 Report on performance base seismic engineering of buildings*. Structural Engineers Association of California, Volume I, Sacramento.

Servicio Geológico Colombiano (SGC) (2023). *40 años del terremoto de Popayán: un momento para pensar en la importancia de construir bien en Colombia*. Recuperado el 11 de marzo de 2025, de <https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Aniversario-No-40-del-terremoto-de-Popayan-un-momento-para-pensar-en-la-importancia-de-construir-bien-en-Colombia.aspx>

Servicio Geológico Colombiano (SGC) (2024). *AMENAZA SISMICA*. Recuperado el 17 de octubre de 2024, de <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/geoamenazas/amenaza-sismica/Paginas/default.aspx>.

Skyalert (2024). *La onda sísmica en suelo blando tiene una mayor amplificación que en el suelo firme.* [Fotografía]. El sol de México. <https://www.elsoldemexico.com.mx/metropoli/cdmx/sismos-en-cdmx-en-que-alcaldias-se-sienten-mas-los-temblores-skyalert-lo-revela-12518476.html>

Solans, D., Hormazábal, C., Rojas, B., & León, R. (2015). *Comparación de tres metodologías de análisis sísmico de túnel NATM en suelos finos de Santiago.* *Obras y proyectos*, (17), 14-21.

Tascón, R. M. (14 marzo 2020). *Planeamiento territorial “¡Vive Popayán, a pesar de todo!”.* *Nombre del Blog.* <https://planeamentoterritorial.blogspot.com/2020/03/vive-popayan-pesar-de-todo.html> SISMICIDAD HISTÓRICA DE LA REGIÓN

Toro Ruiz, J. P. A., Quintero Pinzón, J. S., & Del Rio Gaitán, J. D. (2020). *Comparación del análisis y diseño estructural entre la microzonificación sísmica de Ibagué y el reglamento NSR-10.* *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 20(1), 29-39.

Universidad de los Andes (2012). *Microzonificación Sísmica de Popayán.* Bogotá.

Universidad de Illinois en Urbana-Champaign (2024). *DEEPSOIL.* (Versión 7.1.2.0). Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. <https://deepsoil.cee.illinois.edu/Index.html>

USGS (2024). *Search Earthquakes Catalog.* Earthquake Hazards Program. Recuperado el 23 de octubre de 2024 de <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Vera Centeno, J. (2019). *Correlación empírica entre la velocidad de la onda de corte y la resistencia a la penetración estándar en suelos de la ciudad de Puebla.* <https://hdl.handle.net/20.500.12371/15384>

Vielma, J. C., Barbat Barbat, H. A., & Oller Martínez, S. H. (2008). *Umbral de daño para estados límite de edificios porticados de concreto armado diseñados conforme al ACI-318/IBC-2006.* *Revista internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil*, 8(2), 119-133.

ANEXO 1

En este Anexo se presenta la información recopilada de la comparación de las microzonificaciones de la Universidad de los Andes (2012) y del Servicio geológico (2020) respecto a la metodología empleada, eventos sísmicos utilizados para la desagregación de la amenaza, caracterización geotécnica realizada, el modelo de exposición catastral y las tipologías estructurales presentes en la ciudad.

1. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Los parámetros de comparación mencionados anteriormente se presentan en esta sección de acuerdo con lo encontrado en el estudio de la Universidad de los Andes (2012).

1.1. METODOLOGÍA PARA OBTENER LA MICROZONIFICACIÓN

La Universidad de los Andes (UAN) optó por una metodología de isolíneas, las cuales son líneas que conectan los puntos en que los factores F_a y F_v tiene un mismo valor constante. Esta metodología descrita en la Figura 1 consistió en construir un modelo tridimensional de la geología de la zona de estudio para obtener la respuesta de dinámica del suelo, asignar unas zonas de influencia a cada uno de los sondeos en que se dispone de información, particularmente del perfil de velocidad de onda, y caracterizar cada una de las formaciones geológicas principales con un comportamiento dinámico esperado de acuerdo con la información de ensayos dinámicos de laboratorio disponibles o con base en el comportamiento establecido para formaciones típicas.

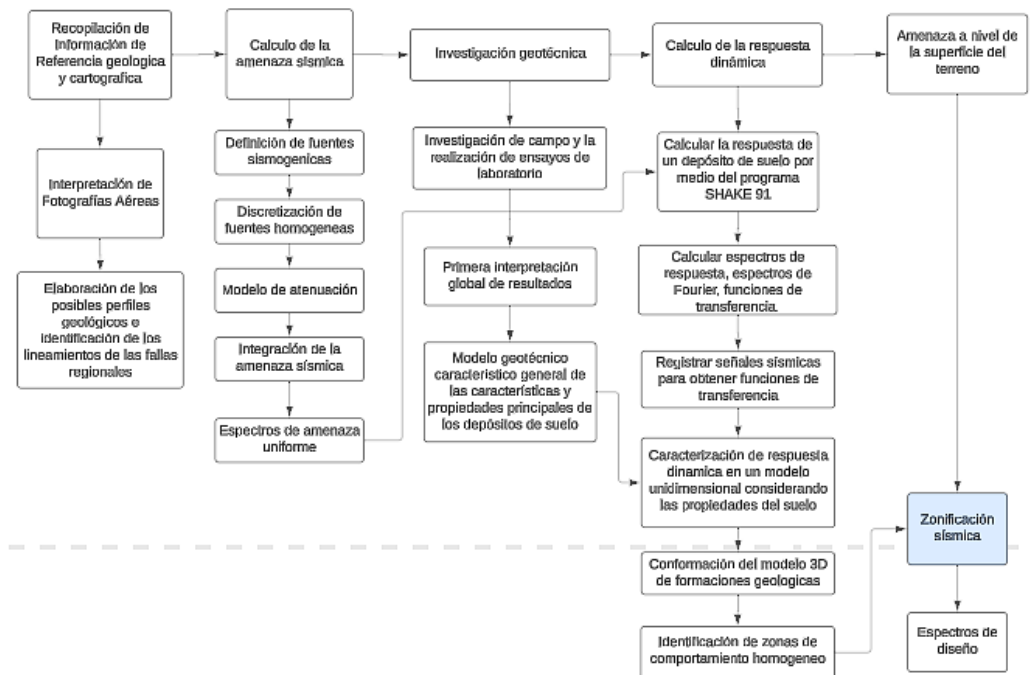


Figura 1. Marco metodológico del estudio de Microzonificación sísmica de la UAN.

Fuente: Elaborado por los autores.

Entre los resultados de este estudio se destacaron los mapas de variación de forma espectral Fa y Fv de diseño para la ciudad de Popayán, los cuales se presentan en las Figuras 2 y 3:

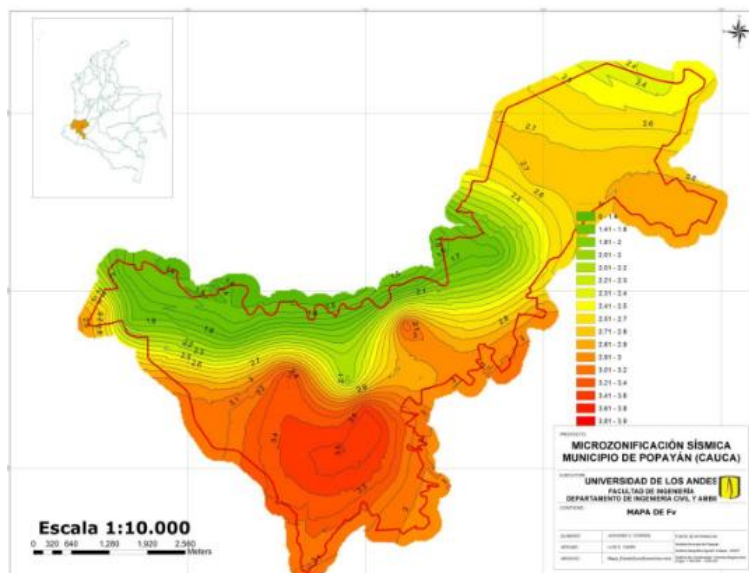


Figura 2. Mapa de variación de F_v de diseño para la ciudad de Popayán según el estudio de la UAN.

Fuente: (Universidad de los Andes. 2012).

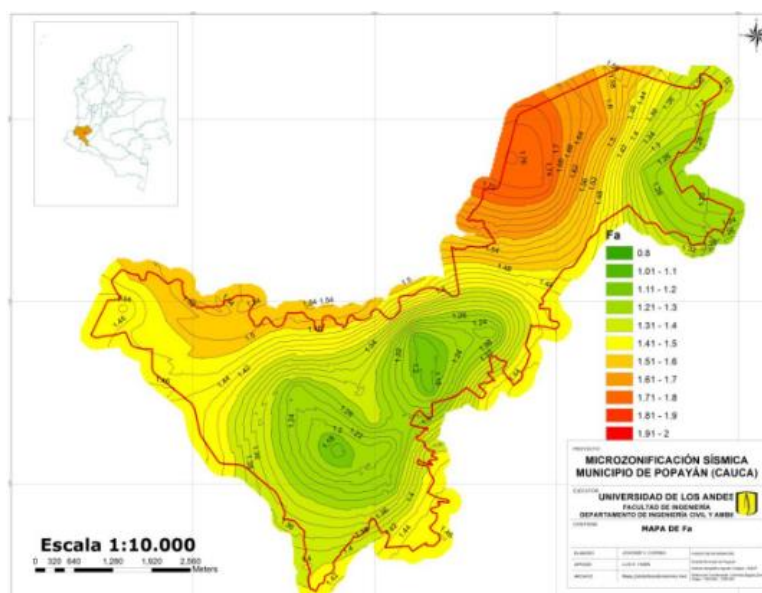


Figura 3. Mapa de variación de F_a de diseño para la ciudad de Popayán según el estudio de la UAN.

Fuente: (Universidad de los Andes. 2012).

1.2. EVENTOS SÍSMICOS

Respecto a los eventos sísmicos ambos estudios afirman que en el país no se dispone de registros sísmicos confiables a nivel de estratos firmes con aceleración máxima superior a los 50 gales (0.05 g) por lo que fue necesario el uso de las bases de datos de movimientos sísmicos fuertes. Para el caso de la UAN los registros fueron obtenidos del Instituto de Ingeniería de la UNAM (provenientes de la Red de Acelerógrafos de Guerrero) y de la base de datos del Centro de Estudios de Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER) adscrito a la Universidad de Berkeley. En la Figura 4 se muestra la información general de las señales sísmicas obtenidas:

Tabla 6.6 Características registros sismos fuente activa

Nombre	ID del Registro	País	Fecha	Magnitud	Distancia (km)	Duración (seg)	Amax (g)	Δt (seg)	Amax Utilizada (g)	Factor de Diezmado
A01	Chalfant Valley	U.S.A	21/07/86	6.2	50	39.81	0.051	0.0050	0.10	4
A02	Georgia	U.S.S.R	15/06/91	6.2	52	38.17	0.046	0.0050	0.05	4
A03	Palm Springs	U.S.A	08/07/86	6.0	63	24.00	0.053	0.0050	0.05	4
A04	Anza	U.S.A	08/07/86	6.0	26	24.00	0.113	0.0050	0.10	4
A05	Armenia - Bocatoma	Colombia	19/01/99	6.2	42	31.92	0.084	0.0100	0.10	2
A06	Imperial Valley	U.S.A.	15/10/79	6.5	36	28.28	0.109	0.0050	0.10	4
A07	Irpinia	Italia	23/11/80	6.5	33	36.34	0.199	0.0029	0.20	4
A08	Whittier Narrows	U.S.A	10/01/87	6.0	10	29.96	0.199	0.0200	0.20	1
A09	San Fernando	U.S.A	09/02/71	6.6	27	29.66	0.212	0.0100	0.20	2
A10	Coalinga	U.S.A.	22/07/83	5.7	12	21.30	0.375	0.0050	0.40	4
A11	Northridge	U.S.A.	17/01/94	6.7	35	30.33	0.493	0.0100	0.40	2
A12	Park Field	U.S.A.	28/06/66	6.1	10	30.33	0.356	0.0100	0.40	2

Tabla 6.7 Características registros sismos fuente subducción

Nombre	ID del Registro	País	Fecha	Magnitud	Distancia (km)	Duración (seg)	Amax (g)	Δt (seg)	Amax Utilizada (g)	Factor de Diezmado
S01	Nuxco	México	15/07/96	6.5		83.00	0.049	0.0050	0.05	4
S02	Ocotito	México	14/09/95	7.2		61.00	0.059	0.0010	0.05	2
S03	Zihuatejelo	México	10/12/94	6.6		34.05	0.053	0.0100	0.05	2
S04	Paraíso	México	25/09/84	6.5		36.67	0.102	0.0050	0.10	4
S05	Red Smart	Taiwán	12/06/85	6.5	45	27.15	0.142	0.0100	0.10	2
S06	La Unión	México	10/12/94	6.6		54.98	0.092	0.0050	0.10	4
S07	Caleta	México	09/08/00	6.7		42.21	0.194	0.0050	0.20	4
S08	Ocotito	México	25/04/89	6.5		53.16	0.195	0.0100	0.20	2
S09	Copala	México	24/10/93	6.2		58.94	0.292	0.0100	0.40	2
S10	Las Vigas	Mexico	25/04/89	6.5		34.43	0.345	0.0050	0.40	4

Figura 4. Características de los registros sísmicos utilizadas por la UAN.

Fuente: (Universidad de los Andes, 2012).

1.3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

El estudio de la UAN cuenta con una base de datos de 48 registros obtenidos de estudios anteriores, como los sondeos realizados para la microzonificación de INGEOMINAS (1991). Cuenta con 13 perforaciones realizadas por ellos mismos, en cuyos formatos de sondeos se incluyó los espesores de los estratos encontrados, el tipo de suelo que conforma estos estratos – de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS – y la posición del nivel freático en cada una de estas perforaciones.

En esta base de datos se realizaron los ensayos in situ tanto geotécnicos como geofísicos en distintas zonas de la ciudad, incluidas zonas de expansión urbana. Los ensayos rutinarios necesarios para clasificar los estratos de suelo son el límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, el peso unitario y la humedad natural. Por otra parte, entre los ensayos dinámicos,

que tienen el fin de identificar el comportamiento geo-mecánico de los suelos, se tienen ensayos de laboratorio triaxiales cíclicos, columnas resonantes y cortes directos, los cuales expresan sus resultados en forma de curvas de degradación de módulo de cortante y amortiguamiento versus deformación.

También se destaca el ensayo de Down Hole para obtener velocidad de onda cortante (V_s), el cual es uno de los parámetros más importantes para evaluar la amplificación del terreno (Vera Centeno, 2019). Con este ensayo se obtuvieron velocidades de onda cortante entre 200 y 500 m/s con un promedio de 330m/s como se muestra en la Figura 6. Donde se encontró roca o aluvión grueso los valores máximos de este parámetro se encuentran en los primeros 15 m de profundidad por ser suelos duros, por el contrario, en la presencia de suelos blandos aumenta la velocidad con respecto a la profundidad. En la Figura 5 se presentan la ubicación de los puntos donde se realizaron los ensayos de velocidad de onda de corte V_s .



Figura 5. Ubicación de los puntos de sondeo de la MS del UAN.

Fuente: Mapa de Popayán modificado de (CafetoMH, 2023)

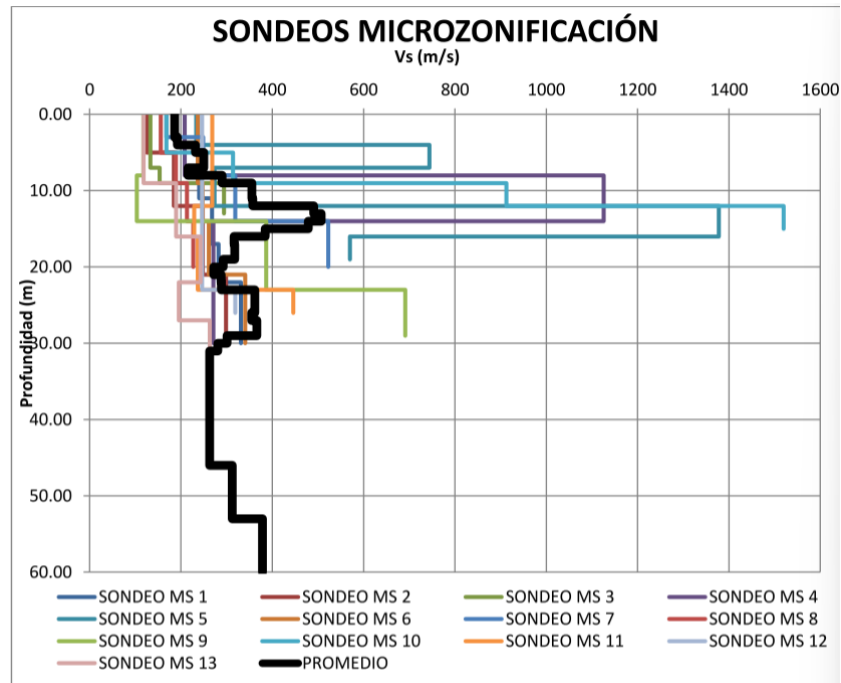


Figura 6. Resultados de velocidad de onda de corte de los ensayos realizados por la UAN.

Fuente: (Universidad de los Andes, 2012).

También se ejecutaron ensayos de refracción sísmica, por el medio de golpe a una platina, que permitió identificar 3 refractores haciendo posible la identificación de un estrato roco o tobas soldadas con velocidades de onda mayores a 1000 m/s:

- Los estratos superiores (entre 0 y 15 m) están caracterizados con velocidades de onda compresionales menores a 250 m/s a excepción de las zonas del colegio INEM y el Barrio Campo Bello que son zonas consideradas como duras.
- El segundo refractor ubicado entre 15 y 55 m muestra una velocidad de onda entre 250 m/s y 450 m/s, correspondiente a depósitos de material fino con cierto grado de meteorización. En las zonas más duras (INEM y Campo Bello) predominan velocidades de onda de 450m/s a 650 m/s, correspondientes a material fino con alto grado de meteorización en compañía de gravas y arenas de tamaño medio.
- El tercer refractor se ubica a profundidades mayores a 55m, correspondiente al cambio de material entre el fino meteorizado y las tobas soldadas donde predominan velocidades del orden de los 1000 m/s y entre 1000 m/s y 2000 m/s para las zonas blandas y duras mencionadas.

De igual manera, se hizo el ensayo de microtemores o micro trepidaciones el cual consiste en el registro de aceleraciones o velocidades ambientales directamente en el suelo a nivel de la superficie del terreno, para el cuál se usó un equipo que registra aceleraciones en las 3 direcciones. Gracias a estas comparaciones fue posible identificar los espesores y velocidades de onda de los distintos depósitos. Por ejemplo, los sitios de la parte sur de Popayán tienen

depósitos de suelos blandos de un mayor espesor y velocidades de onda de corte menor presentando periodos altos en comparación a los periodos bajos de la zona norte.

1.4. MODELO DE EXPOSICIÓN CATASTRAL

En la Figura 7 se presenta información del avalúo catastral, el cual es el valor de los predios de la ciudad. Esta información es útil para verificar las pérdidas económicas que pudiesen llegar a presentarse cuando se presenta un riesgo sísmico alto.

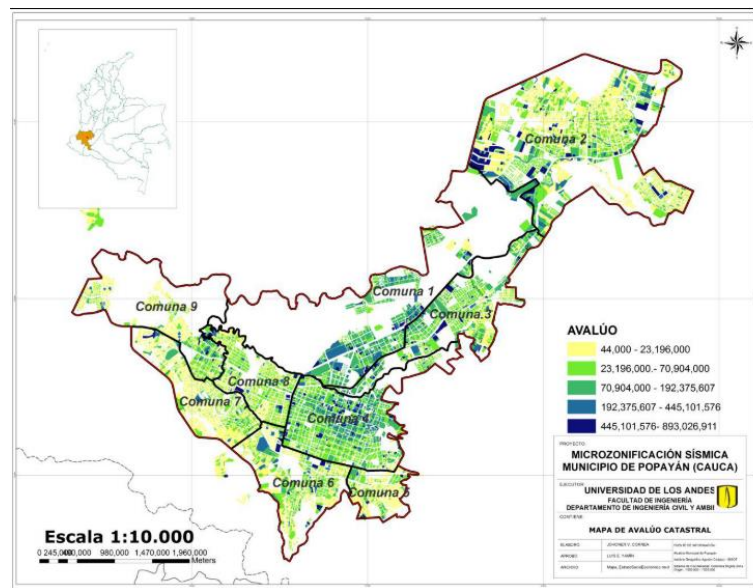


Figura 9.25 Mapa de distribución geográfica de manzanas según avalúo catastral

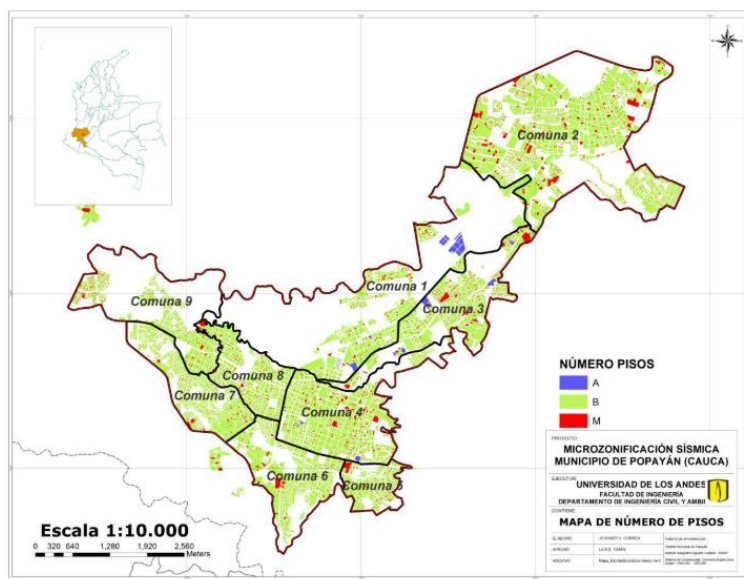
Figura 7. Mapa de distribución de manzanas según avalúo catastral para Popayán según la UAN.

Fuente: (Universidad de los Andes, 2012).

1.5. TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES PRESENTES

Para este estudio la información catastral y de viviendas de Popayán es útil para dar a conocer la situación de la ciudad y obtener generalizaciones válidas para todo el territorio que sirven como sustento para plasmar la realidad de la ciudad en cuanto a las características estructurales, dentro de las recomendaciones y conclusiones, dejando un aporte que puede llegar a implementarse en los planes de riesgo, herramientas de proyectos, etc.

En el estudio de Microzonificación de la Universidad de los Andes se presenta un informe sobre la exposición y vulnerabilidad de la ciudad de Popayán, destacando los tipos de viviendas, sistemas estructurales, números de pisos y usos de suelo predominantes en la ciudad. En la Figura 8 se observa que en la ciudad predomina las edificaciones de uso residencial y las de altura baja, es decir, entre 1 y 2 pisos, y que las estructuras altas, es decir, con más de 4 pisos representan tan solo el 0.6% del total de edificaciones.



Nota: B: bajo, 1-2 pisos. M: medio, 3-4 pisos. A: Alto 4-10 pisos.

Figura 8. Mapa de distribución geográfica de las edificaciones según número de pisos presentados por la UAN.

Fuente: (Universidad de los Andes, 2012).

Este estudio distribuyó la ciudad en zonas homogéneas de acuerdo con su sistema estructural como se muestra en la Figura 9 y 10:

ZONA	DESCRIPCIÓN
01	Ubicada al norte de la ciudad. Caracterizada por tener los siguientes sistemas constructivos: No tecnificada, mampostería simple, mampostería medianamente confinada, mampostería confinada y mampostería reforzada. Se caracteriza por tener estrato socio-económico 2 en su gran mayoría.
02	Ubicada al norte y oriente de la ciudad. Caracterizada por tener los siguientes sistemas constructivos: mampostería simple, mampostería medianamente confinada y mampostería confinada. Se caracteriza por tener estrato socio-económico 4, 5, 6.
03	Ubicada en el centro de la ciudad. Caracterizada por tener los siguientes sistemas constructivos: Adobe, Adobe Reforzada, mampostería simple, mampostería medianamente confinada y mampostería confinada. Se caracteriza por tener estrato socio-económico 3 y 4.
04	Ubicada en el sur, occidente y norte de la ciudad. Caracterizada por tener los siguientes sistemas constructivos: mampostería simple, mampostería medianamente confinada y mampostería confinada. Se caracteriza por tener estrato socio-económico 1,2 y 3.
05	Ubicada al nor-occidente de la ciudad. Caracterizada por tener los siguientes sistemas constructivos: No tecnificada, mampostería simple, mampostería medianamente confinada y mampostería confinada. Se caracteriza por tener estrato socio-económico 3 y 4.
06	Ubicada en el sur, occidente y norte de la ciudad. Caracterizada por tener los siguientes sistemas constructivos: No tecnificada, mampostería simple, mampostería medianamente confinada y mampostería confinada. Se caracteriza por tener estrato socio-económico 2 y 3.
07	Ubicada en el norte de la ciudad. Caracterizada por tener los siguientes sistemas constructivos: mampostería simple, mampostería confinada y mampostería reforzada. Se caracteriza por tener estrato socio-económico 5 y 6.
08	Ubicada en el norte de la ciudad. Caracterizada por tener los siguientes sistemas constructivos: mampostería confinada y mampostería reforzada. Se caracteriza por tener estrato socio-económico 3 en su gran mayoría.

Figura 9. Descripción de las zonas homogéneas identificados en Popayán según la UAN.

Fuente: (Universidad de los Andes, 2012).

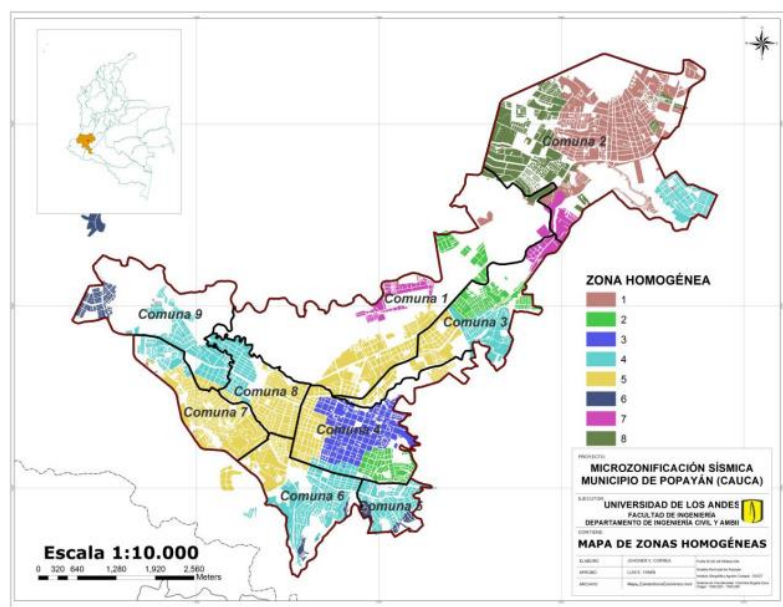


Figura 10. Zonas homogéneas identificadas en Popayán según la UAN.

Fuente: (Universidad de los Andes, 2012).

En la Figura 11 también se observa que el sistema con más presencia en la ciudad es mampostería confinada de baja altura entre 1 y 4 pisos, y a partir de esa altura se utiliza sistemas de muros de concreto o pórticos en concreto.

Material	No Pisos	No Edificaciones	Valor Físico [COP]
Adobe			
Adobe 1-2	1 a 2	293	24,527,171,288
Adobe 3-4	3 a 4	13	2,309,096,000
Adobe Reforzado			
Adobe ref 1-2	1 a 2	122	8,562,360,429
Adobe ref 3-4	3 a 4	3	338,054,890
Bodegas			
Adobe 1-2	1 a 2	337	38,049,213,109
Mampostería confinada			
Mamp. Confinada 1-2	1 a 2	30,650	999,004,289,675
Mamp. Confinada 3-4	3 a 4	3,483	120,154,753,564
Mampostería medianamente confinada			
Mamp. Med. Confinada 1-2	1 a 2	5,698	191,851,407,755
Mamp. Med. Confinada 3-4	3 a 4	8	578,409,350
Mampostería reforzada			
Mamp. Reforzada 1-2	1 a 2	4,111	153,018,562,352
Mamp. Reforzada 3-4	3 a 4	275	12,942,042,949
Mampostería simple			
Mamp. Simple 1-2	1 a 2	10,586	385,335,092,905
Mamp. Simple 3-4	3 a 4	48	5,957,756,061
No tecnificada			
No Tecnificada 1-2	1 a 2	2,726	69,077,288,014
Edificios con muros de concreto			
Edificios con muros de concreto	5 a 10	200	10,331,261,091
Pórticos en concreto con muros de mampostería			
Pórticos en concreto	5 a 10	112	5,097,893,105
TOTAL		58,665	\$2,027,134,652,537

Figura 11. Distribuciones relativas según sistema estructural en Popayán por el estudio de la UAN.

Fuente: (Universidad de los Andes, 2012).

2. SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

A continuación, se presentan los parámetros de comparación de metodología, eventos sísmicos, caracterización geotécnica, modelo de exposición catastral y tipologías estructurales presentes en la ciudad acuerdo con el estudio del SGC (2020).

2.1. METODOLOGÍA PARA OBTENER LA MICROZONIFICACIÓN

El SGC define cuatro pilares de trabajo: Amenaza sísmica, monitoreo sísmico, caracterización del subsuelo y respuesta sísmica local. Bajo estos pilares se determina la amenaza sísmica en superficie y las zonas de respuesta sísmica homogénea. Con lo anterior, se logran establecer los factores de amplificación y los espectros de diseño para cada una de las zonas en concordancia con la NSR-10. El marco lógico de actividades que se realizó se presenta en la Figura 12:

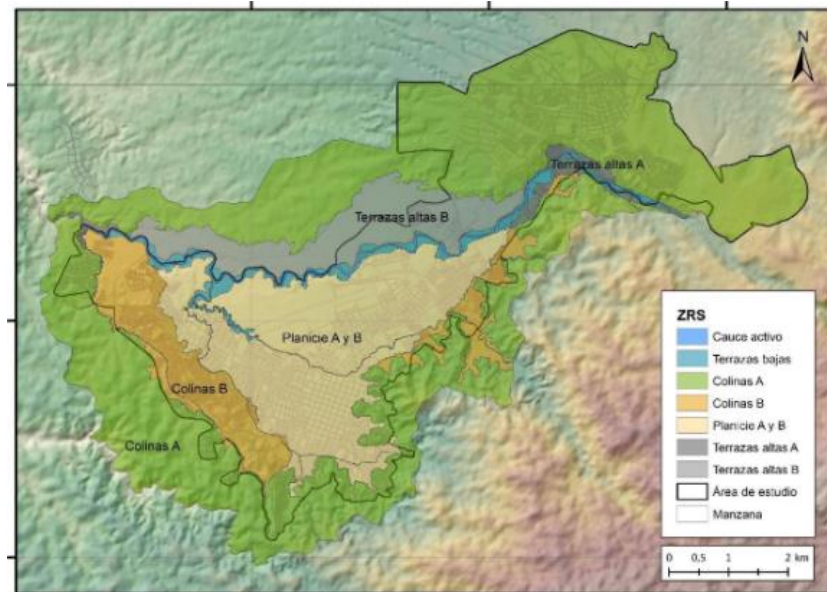


Figura 13. Mapa de zonas de respuesta sísmica homogénea de Popayán según el SGC.

Fuente: (Díaz et al., 2020).

Los valores de F_a y F_v , en concordancia con el espectro de diseño de la NSR-10 depende de la aceleración y velocidad en roca A_a y A_v y teniendo en cuenta que los valores para Popayán son 0.25 para A_a y 0.2 para A_v , los coeficientes de amplificación según la UAN para la ciudad se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1. Factores de amplificación para las zonas de respuesta sísmica de Popayán.

Puntos de análisis del suelo	F_a	F_v
Terrazas A	1.39	1.5
Colinas A	1.58	2.37
Colinas B	1.55	2.47
Terrazas B	1.31	2.32
Planicie A	1.2	2.74
Planicie B	1.25	3.22

Fuente: (Díaz et. al., 2020).

2.2. EVENTOS SÍSMICOS UTILIZADOS

Se buscaron señales sísmicas compatibles con la amenaza sísmica acorde con niveles de intensidad esperados, magnitud, distancia al epicentro, profundidad y ambiente tectónico, identificados en los resultados de desagregación de la amenaza realizada para la ciudad. Con base en este modelo de amenaza sísmica, se estimaron los valores de intensidad sísmica esperados en la ciudad, lo cual se presenta en la Figura 14. A partir de ello, se identificaron magnitudes, distancias y ambientes tectónicos que aportan a dichos niveles de intensidad. Con la identificación de estos parámetros se encontraron dos grupos de señales a elegir: i) uno con magnitudes entre 5.25 y 6.75 [Mw] con distancias menores a 25 km, de ambientes

tectónicos corticales; ii) otro con magnitudes entre 6.25 a 7.25 [Mw] con distancias alrededor de 125 km de ambientes tectónicos de subducción.

Grupo por nivel de amenaza		Periodo de retorno [años]	Intensidad (PGA[g])
I	A	33	0.08
II	B	225	0.24
III	C	475	0.35
IV	D	2475	0.66

Figura 14. Valores de intensidad sísmica para diferentes niveles de amenaza.

Fuente: (Diaz, et al., 2020).

Las señales sísmicas de interés siguen los criterios descritos a continuación:

- Registros de señales en roca disponibles en bases de datos nacionales y globales.
- Registros reales y sin escalamiento.
- Registros de señales en red de acelerógrafos local.
- Registros de señales compatibles con los escenarios definidos (magnitud, distancia, profundidad, ambiente tectónico, umbrales de intensidad deseados).
- Comparación de espectros de respuesta con los espectros uniformes de amenaza para descartar señales con rangos de respuesta en periodos diferentes a los esperados.

Para ello las bases de datos utilizadas fueron Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) de la Universidad de California, Berkeley; el Center for Engineering Strong Motion Data (CESMD), integrado por los Servicios Geológicos de Estados Unidos (USGS) y de California (CGS), entre otros; de las cuales se obtuvo las siguientes señales:

Grupo	Señal	Nombre	Estación	Año	Magnitud	Obs.	PGA [g]	Distancia [km]	Int. Arias [m/s]
1ª	PGA [0.1g] señal 1	Morgan Hill	Gilroy Array #1	1984	6.19	EW	0.09	14.9	0.06
	PGA [0.1g] señal 2	Hollister-03	Gilroy Array #1	1974	5.14	NS	0.10	9.9	0.03
	PGA [0.1g] señal 3	San Fernando	Pasadena - Old Seismo Lab	1971	6.61	NS	0.10	21.5	0.11
2ª	PGA [0.1g] señal 4	Japan - 2003	KSRH10	2003	8	EW	0.09	180	0.01
	PGA [0.1g] señal 5	Japan - 2013	KSRH05	2013	6.5	EW	0.09	103	0.01
	PGA [0.1g] señal 6	Japan - 2011	IWTH04	2011	7.1	EW	0.10	118	0.02
	PGA [0.1g] señal 7	Nueva Zelanda	JACS	2003	7.2	-	0.08	185	0.02
1B	PGA [0.25g] señal 1	Tottori_ Japan	SMNH10	2000	6.61	NS	0.16	15.6	0.20
	PGA [0.25g] señal 2	Tottori_ Japan	SMNH10	2000	6.61	EW	0.23	15.6	0.48
	PGA [0.25g] señal 3	Parkfield-02	PARKFIELD - TURKEY FLAT	2004	6	NS	0.25	4.6	0.17
2B	PGA [0.25g] señal 4	Parkfield-02	PARKFIELD - TURKEY FLAT	2004	6	EW	0.20	4.66	0.19
	PGA [0.25g] señal 5	URAKAWA	HKD109	2003	8	EW	0.19	117	0.22
	PGA [0.25g] señal 6	IWANUMA	MYG015	2005	7.2	NS	0.16	124	0.13
	PGA [0.25g] señal 7	URAKAWA	HKD109	2003	8	NS	0.18	117	0.20
1C	PGA [0.35g] señal 1	Friuli	Tolmezzo-Diga Ambiesta	1976	6.5	-	0.35	23	0.77
	PGA [0.35g] señal 2	Loma Prieta	Gilroy Array #1	1989	6.93	?	0.42	8.48	1.06
	PGA [0.35g] señal 3	Loma Prieta	Gilroy Array #1	1989	6.93	-	0.48	8.48	1.69
2C	PGA [0.35g] señal 4	TAIKI	HKD098	2003	8	NS	0.28	103	0.50
	PGA [0.35g] señal 5	TAIKI	HKD098	2003	8	EW	0.33	103	0.49
1D	PGA [0.7g] señal 1	Landers	Lucerne	1992	7.28	-	0.73	2.19	6.97
	PGA [0.7g] señal 2	Landers	Lucerne	1992	7.28	-	0.79	2.19	6.58
	PGA [0.7g] señal 3	Duzce, Turkey	IRIGM 496	1999	7.14	EW	0.75	4.21	6.52
2D	PGA [0.7g] señal 4	Japan-07-04-11	IWT009	2011	7.1	EW	0.67	137.4	8.42
	PGA [0.7g] señal 5	Japan-07-04-11	MYGH04	2011	7.4	EW	0.63	192.2	5.51

Figura 15. Características de los registros sísmicos utilizadas por el SGC.

Fuente: (Diaz, et al., 2020).

2.3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Por otro lado, la base de datos del SGC cuenta con un total de 488 exploraciones, donde el SGC aporta alrededor del 50% de las exploraciones, es decir 245, y el restante corresponde a exploraciones de otras fuentes, como la Universidad de los Andes.

Respecto a los estratos, se realizaron más de 1700 clasificaciones USCS que evidencia la predominancia de suelos finos, específicamente limosos en la ciudad de Popayán. Los resultados muestran que se obtuvo un 61.5% de suelos correspondientes a suelos limosos de alta plasticidad (MH), y el 10.8% corresponden a suelos finos (limos, arcillas o arenas finas) de baja plasticidad (ML). Con la clasificación de las muestras también se determinó que en los primeros 30 metros predominan los suelo tipo MH. En la Figura 16, se presenta la cantidad de muestras obtenidas por clase USCS y su profundidad.

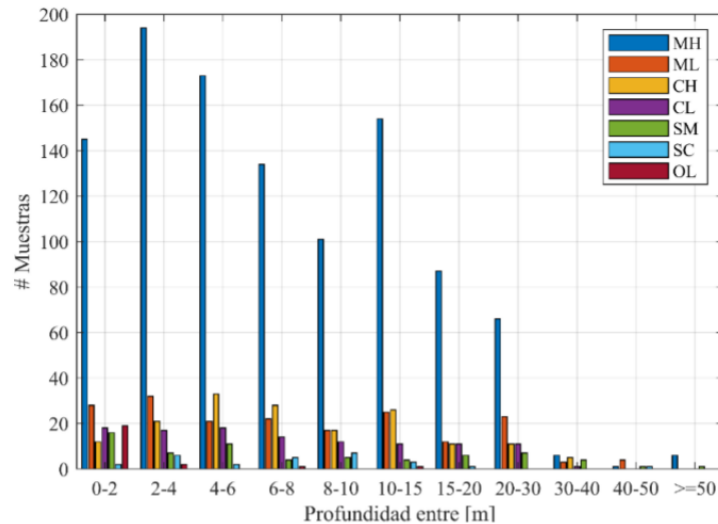


Figura 16. Descripción de estratos por tipos de muestra del SGC.

Fuente: (Diaz, et al., 2020).

A partir de estos estudios se lograron obtener 2540 muestras, con una concentración de información en los primeros 20 m de profundidad. Debido a que la mayoría de los estudios geotécnicos realizados en la ciudad tienen una profundidad menor a 25 m, se puede afirmar que la base de datos tiene una buena completitud en estos primeros metros. De estas muestras se realizaron pruebas en laboratorio de humedad natural, peso unitario, límites de Atterberg, entre otros.

De los anteriores ensayos se encontraron algunos valores típicos que permiten afirmar que en la ciudad predominan los suelos cohesivos y limos inorgánicos de media compresibilidad. Esto se debe a que los valores típicos arrojados muestran una humedad natural del suelo fue de 52.5%, límite líquido de 65%, límite plástico de 37.5% e índice plástico de 22.5%, además el valor de la humedad es mayor al presentado en valores típicos para arenas, reafirmando la presencia y predominancia de suelos cohesivos en la ciudad.

Con respecto a los ensayos de campo se da prioridad a los valores de V_s , NSPT y q_u de veleta. Analizando los valores promedios de estos ensayos se demuestra la predominancia de los suelos blandos de baja consistencia. Esto es porque los valores de V_s menores a 450 m/s y NSPT menor a 50 golpes que caracterizan a los suelos blandos, alcanzan profundidades cercanas a los 100 m. Además, en términos de q_u se encontraron en gran cantidad valores menores a 2.5 kg/cm² que corresponden a suelos de consistencia media a blandos.

Como resumen del estudio geotécnico se tiene los siguientes perfiles geotécnicos típicos de cada una de las zonas:

COLINAS A							COLINAS B						
USCS	Material	Espesor		Vs		Y	USCS	Material	Espesor		Vs		Y
		m		m/s					m		m/s		
		min	max	min	max	kN/m³			min	max	min	max	kN/m³
MH	Limo arenoso amarillo	-	38	147	258	17,3	MH	Limo arenoso amarillo	-	38	210	263	17,3
ML	Limo arcilloso rojizo	0	12	130	249	16,7	MH	Limo arcilloso gris	0	4	264	340	18,0
ML o SM	Toba / Ignimbrita meteorizada	0	30	250	360	17,8	ML	Limo arcilloso rojizo	0	12	125	265	16,7
	Ignimbrita	0	11	350	490	19,6	ML	Limo arenoso café	2	18	250	390	18,9
	Aglomerado sedimentario	2	32	560	760	20,0	ML o SM	Toba / Ignimbrita meteorizada	14	46	290	400	19,1
	Arenita / Limolita	0	60	760	-	21,1		Ignimbrita gris	0	39	350	450	20,0
	Esquistos / Cuarcita	-	-	800	-	22,5		Aglomerado sedimentario	12	-	430	-	21,0
								Arenita / Limolita	-	-	760	-	21,1
								Esquistos / Cuarcita	-	-	800	-	22,5

PLANICIE A							PLANICIE B						
USCS	Material	Espesor		Vs		Y	USCS	Material	Espesor		Vs		Y
		m		m/s					m		m/s		
		min	max	min	max	kN/m³			min	max	min	max	kN/m³
MH	Limo arcilloso gris / amarillo	1	4	117	300	15,4	MH	Limo arcilloso gris / amarillo	1	23	117	300	15,4
GP	Arena, Gravas, bolos	10	19	220	367	19,8	ML	Limo arenoso café	0	18	117	204	14,2
ML	Limo arenoso café	0	18	117	204	14,2	SM	Arena limosa	0	6	269	340	18,1
SM	Arena limosa	0	6	269	340	18,1	PT	Turba	0	7	-	244	13,6
PT	Turba	0	7	-	244	13,6	MH	Limo arenoso	0	36	256	398	18,7
MH	Limo arenoso	0	36	256	398	18,7	ML o SM	Toba / Ignimbrita meteorizada	0	130	340	490	19,1
ML o SM	Toba / Ignimbrita meteorizada	0	130	340	490	19,1		Ignimbrita	0	105	400	530	20,0
	Ignimbrita	0	105	400	530	20,0		Aglomerado sedimentario	9	42	430	-	21,6
	Aglomerado sedimentario	9	42	430	-	21,6		Arenita / Limolita	-	-	760	-	21,1
	Arenita / Limolita	-	-	760	-	21,1		Esquistos / Cuarcita	-	-	800	-	22,5
	Esquistos / Cuarcita	-	-	800	-	22,5							

TERRAZAS ALTAS A							TERRAZAS ALTAS B						
USCS	Material	Espesor		Vs		Y	USCS	Material	Espesor		Vs		Y
		m		m/s					m		m/s		
		min	max	min	max	kN/m³			min	max	min	max	kN/m³
ML	Limo arenoso café	0	3	180	270	15,1	ML	Limo arenoso café	0	7	180	270	15,1
GM	Arenas, gravas, bolos	2	14	210	360	19,3	GM	Arenas, gravas, bolos	9	21	210	360	19,3
ML	Limo arenoso café	0	10	250	410	14,2	ML	Limo arenoso café	5	18	250	410	14,2
ML o SM	Toba / Ignimbrita meteorizada	0	9	400	600	19,1	ML o SM	Toba / Ignimbrita meteorizada	20	136	400	600	19,1
	Aglomerado sedimentario	8	31	430	-	21,6		Aglomerado sedimentario	8	31	430	-	21,6
	Arenita / Limolita	-	-	760	-	21,1		Arenita / Limolita	-	-	760	-	21,1
	Esquistos / Cuarcita	-	-	800	-	22,5		Esquistos / Cuarcita	-	-	800	-	22,5

Figura 17. Perfiles típicos geotécnicos encontrados en la microzonificación del SGC.

Fuente: (Díaz, et al., 2020).

2.4. MODELO DE EXPOSICIÓN CATASTRAL

Con respecto a la población, en el Censo Nacional de Población y Vivienda (DANE, 2020) para el año 2018 se encontró los focos de densidad poblacional, que se deben tener en cuenta para la respuesta de cuerpos de seguridad frente a un desastre natural de índole sísmica, como se observa en la Figura 18:

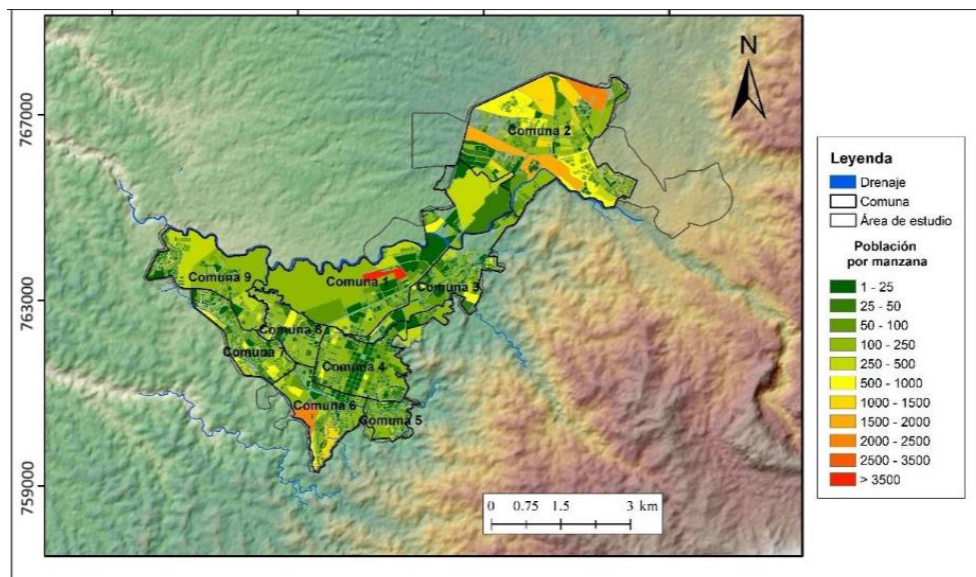


Figura 18. Distribución espacial de la población de Popayán según el estudio del SGC.

Fuente: (Pérez, et al. 2020).

Con respecto a la exposición catastral existe un valor expuesto de edificaciones de \$5,097,155 [COP millones] para un total de 60.830 edificaciones presentes en la ciudad.

2.5. TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES PRESENTES

El informe de Amenaza y Riesgo Sísmico en Colombia, Evaluación del Riesgo Sísmico en la Ciudad de Popayán presenta información de la ubicación de las estructuras, características constructivas, sistema resistente a cargas, número de pisos, materiales de construcción, entre otras propiedades, además de indicar el valor, tanto social, económico, ambiental, etc. que permite calcular, junto al daño esperado, la posible pérdida después del evento sísmico.

De la Figura 19 se destaca que la mayoría de las estructuras corresponden a una altura de uno y dos pisos (90% aproximadamente), que equivalen al 79% del total del área construida de la ciudad, dando lugar a que las edificaciones en altura (más de 8 pisos) se consideren atípicas para la ciudad.

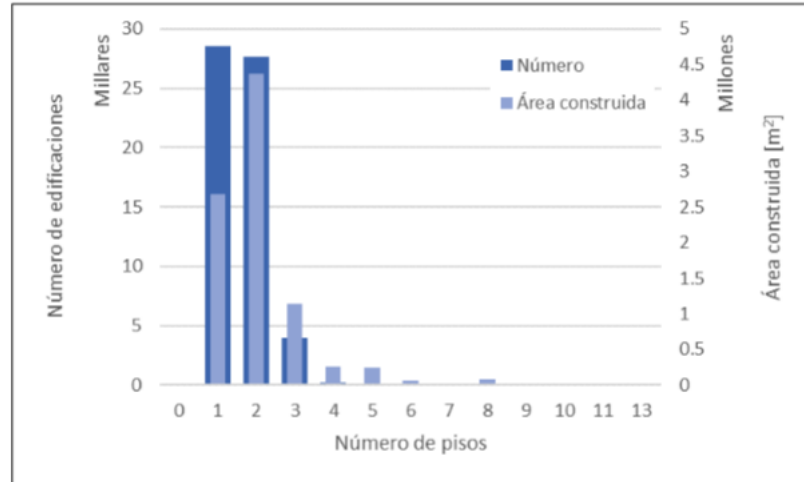


Figura 19. Distribución de número de edificaciones y área construida por número de pisos del estudio del SGC.

Fuente: (Pérez, et. al., 2020).

A continuación, se presentan los porcentajes de la cantidad de edificaciones con respecto a la tipología estructural que existen en la ciudad. Como es de esperarse, la participación de las edificaciones con tipologías estructurales mayoritarias es similar a la del modelo de exposición de la Universidad de Los Andes (véase Figura 11).

En la Figura 20 se observa que las edificaciones de muros en mampostería (MUR, MMCF, MCF y MR) conforman el 98.1% del total de edificaciones en el casco urbano del municipio, las de muros en adobe (ADO y ADOR) representan el 0.8%, las de concreto reforzado (CR/LFM y CR/LWAL) el 0.5%, y el restante porcentaje lo conforman edificaciones con sistemas no-tecnificados (UNK).

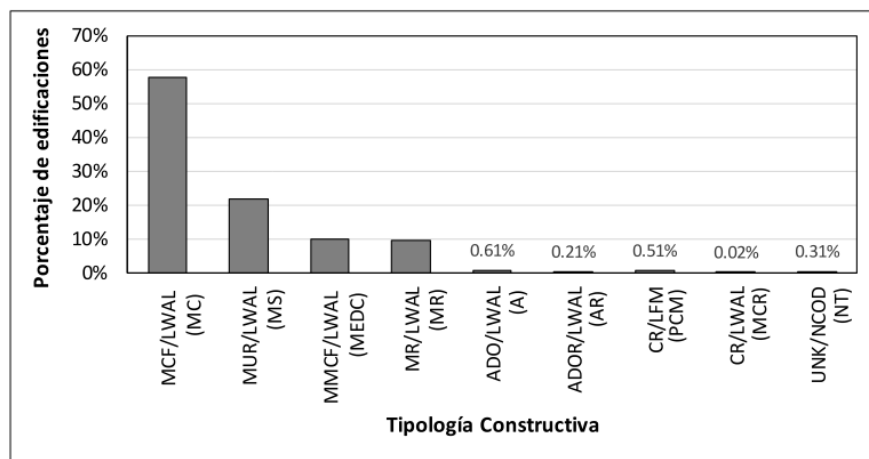


Figura 20. Participación de edificaciones por tipología constructiva en Popayán según el SGC.

Fuente: (Pérez, et. al., 2020).

Las edificaciones del modelo de exposición son desagregadas por tipología constructiva y zona de respuesta sísmica (ZRS) como se muestra en la Figura 21.

Tipología constructiva	Zona de respuesta sísmica				
	Colinas A (%)	Colinas B (%)	Planicie A y B (%)	Terrazas A (%)	Terrazas B (%)
ADO/LWAL	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00
ADOR/LWAL	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00
CR/LFM	0.46	0.03	0.02	0.00	0.00
CR/LWAL	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
MCF/LWAL	17.87	14.47	23.89	0.61	0.58
MMCF/LWAL	2.35	2.60	4.62	0.16	0.04
MR/LWAL	7.42	0.25	1.08	0.06	0.50
MUR/LWAL	8.77	4.55	8.05	0.15	0.31
UNK/NCOD	0.25	0.02	0.00	0.04	0.00
Total	37.15	21.93	38.45	1.03	1.44

Figura 21. Participación de edificaciones por tipología constructiva según zonas de respuesta sísmica según el SGC.

Fuente: (Pérez, et al., 2020).

ANEXO 2

En este Anexo se presentan las capturas de pantalla del programa de mapas de riesgo sísmico realizado en Matlab bajo los escenarios sísmicos de diseño de los estudios de microzonificación de la Universidad de los Andes, Servicio Geológico Colombiano y de la NSR-10:

Interfaz general del programa:

MATLAB App

Mapa de Riesgo Sísmico en Popayán

Riesgo sísmico en Popayán según microzonificación del SGC (2020)

Edificios prototipo diseñados con una deriva de 1% en suelo tipo D de la NSR-10

Sistema estructural:

Niveles:

☐ Comportamiento bajo escenario sísmico de diseño

Factores Fa y Fv provenientes de:

☐ MS de SGC ☐ MS de UAN ☐ NSR-10

☐ Comportamiento bajo escenario sísmico específico

Sa (%) Terrazas A:

Sa (%) Colinas A:

Sa (%) Colinas B:

Sa (%) Terrazas B:

Sa (%) Planicies A:

Sa (%) Planicies B:

CALCULAR

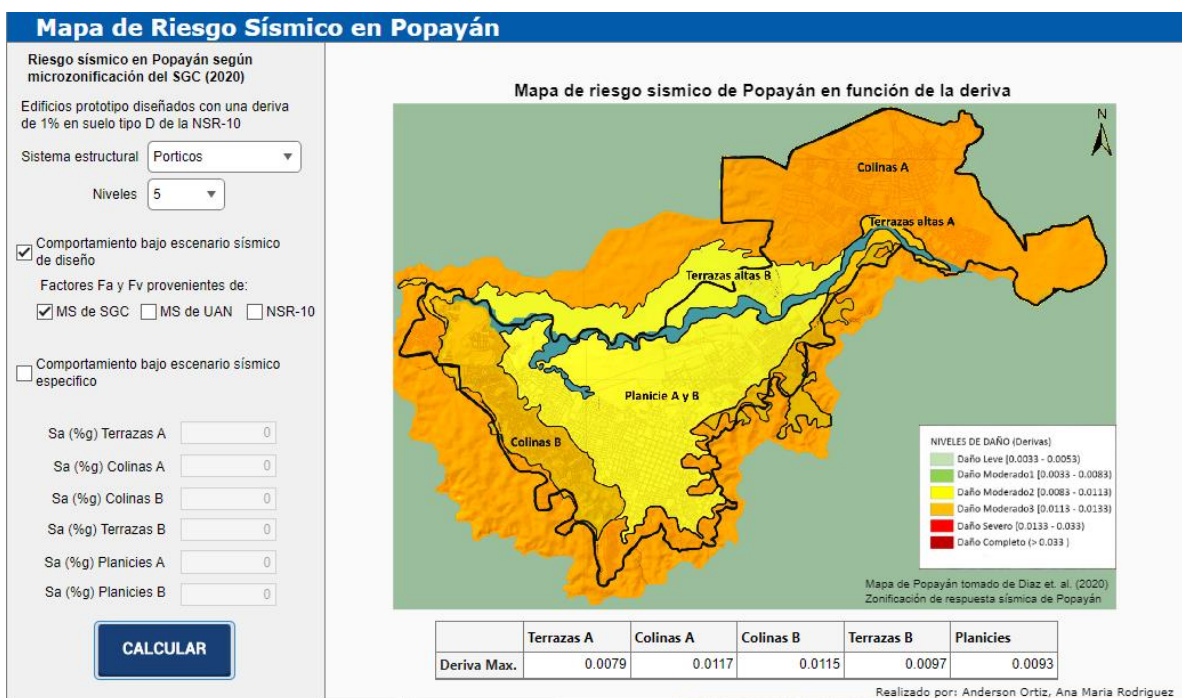
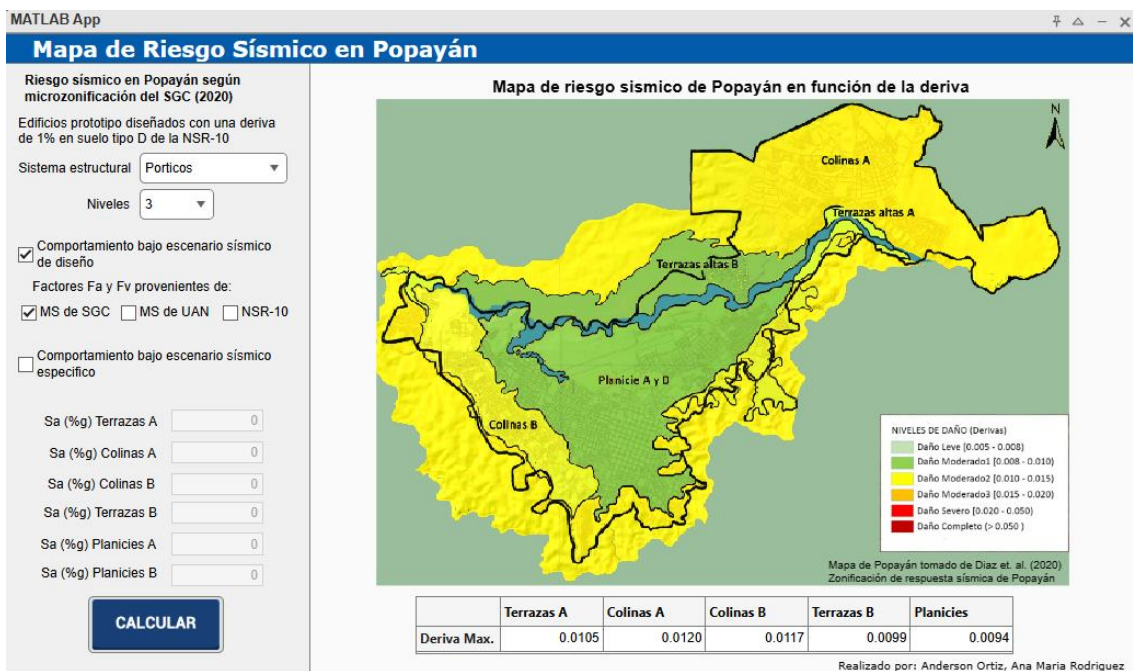
Mapa de riesgo sísmico de Popayán en función de la deriva

Mapa de Popayán tomado de Díaz et. al. (2020)
Zonificación de respuesta sísmica de Popayán

Terrazas A	Colinas A	Colinas B	Terrazas B	Planicies

Realizado por: Anderson Ortiz, Ana María Rodríguez

Mapas bajo escenario sísmico de diseño del estudio de Diaz et. al. (2020) (SGC):



Mapa de Riesgo Sísmico en Popayán

Riesgo sísmico en Popayán según microzonificación del SGC (2020)

Edificios prototipo diseñados con una deriva de 1% en suelo tipo D de la NSR-10

Sistema estructural: Porticos

Niveles: 7

☒ Comportamiento bajo escenario sísmico de diseño

Factores Fa y Fv provenientes de:

☒ MS de SGC ☐ MS de UAN ☐ NSR-10

☐ Comportamiento bajo escenario sísmico específico

Sa (%) Terrazas A: 0

Sa (%) Colinas A: 0

Sa (%) Colinas B: 0

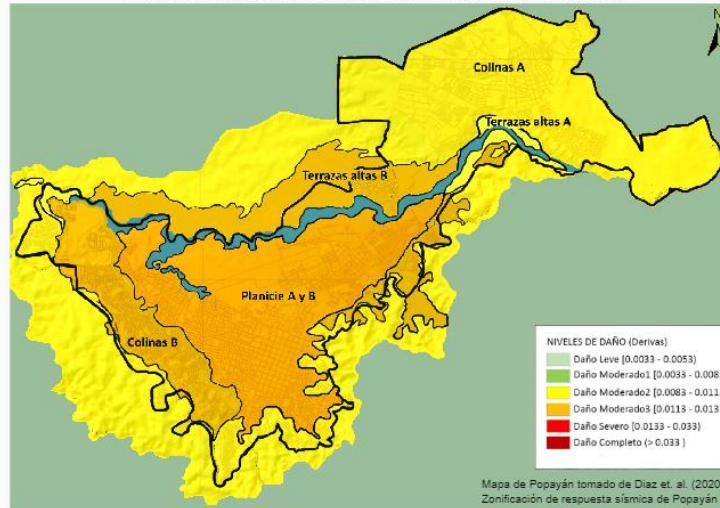
Sa (%) Terrazas B: 0

Sa (%) Planicies A: 0

Sa (%) Planicies B: 0

CALCULAR

Mapa de riesgo sísmico de Popayán en función de la deriva



	Terrazas A	Colinas A	Colinas B	Terrazas B	Planicies
Deriva Max.	0.0072	0.0111	0.0114	0.0118	0.0120

Realizado por: Anderson Ortiz, Ana María Rodríguez

Mapa de Riesgo Sísmico en Popayán

Riesgo sísmico en Popayán según microzonificación del SGC (2020)

Edificios prototipo diseñados con una deriva de 1% en suelo tipo D de la NSR-10

Sistema estructural: Porticos

Niveles: 10

☒ Comportamiento bajo escenario sísmico de diseño

Factores Fa y Fv provenientes de:

☒ MS de SGC ☐ MS de UAN ☐ NSR-10

☐ Comportamiento bajo escenario sísmico específico

Sa (%) Terrazas A: 0

Sa (%) Colinas A: 0

Sa (%) Colinas B: 0

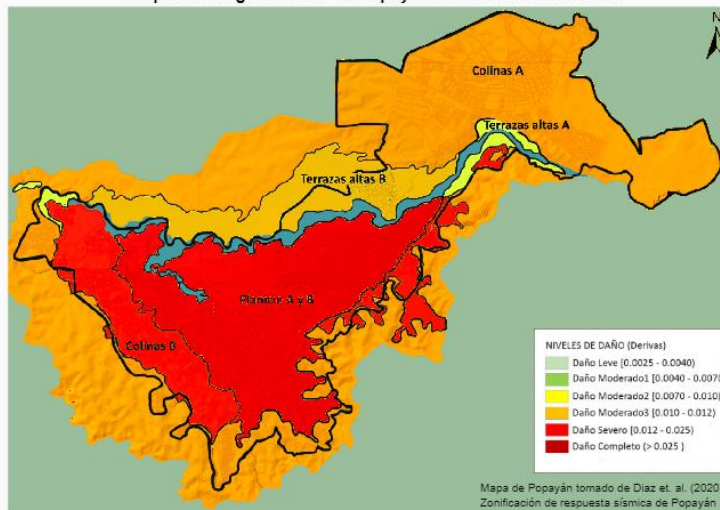
Sa (%) Terrazas B: 0

Sa (%) Planicies A: 0

Sa (%) Planicies B: 0

CALCULAR

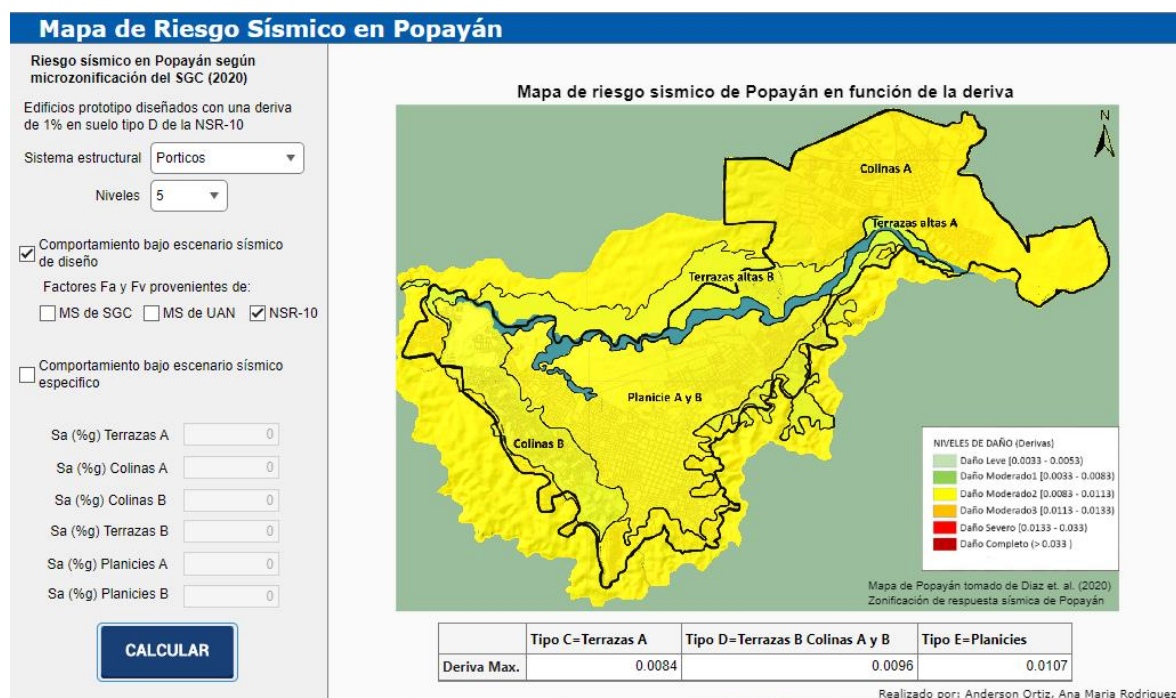
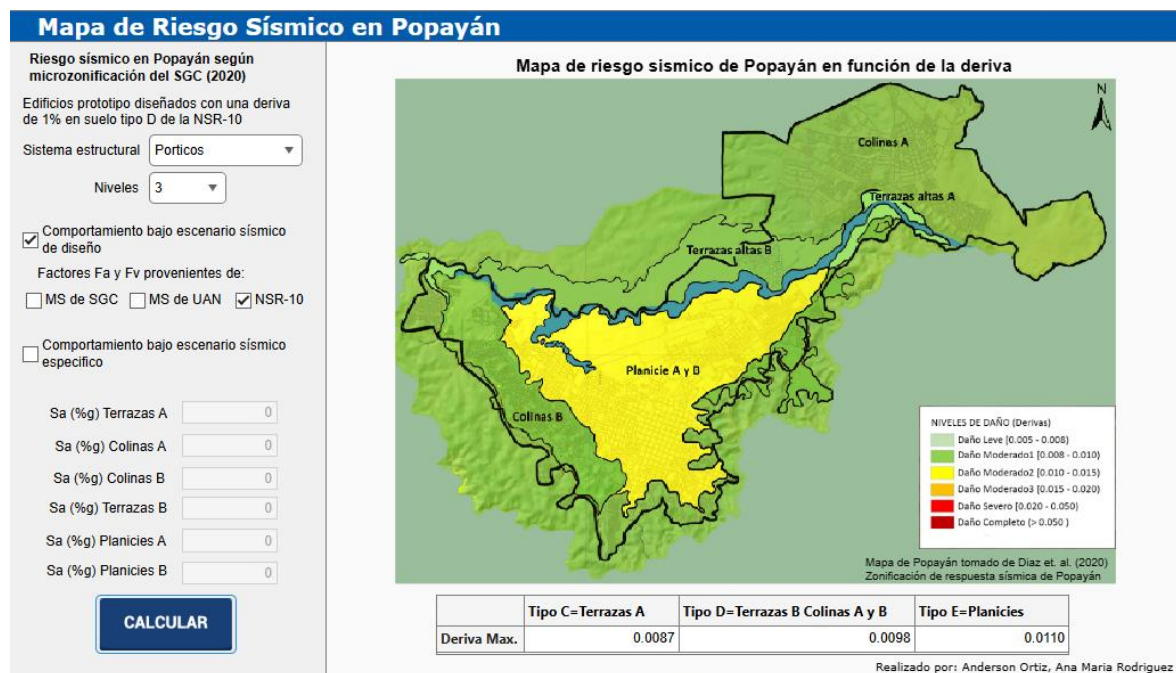
Mapa de riesgo sísmico de Popayán en función de la deriva



	Terrazas A	Colinas A	Colinas B	Terrazas B	Planicies
Deriva Max.	0.0073	0.0116	0.0121	0.0114	0.0158

Realizado por: Anderson Ortiz, Ana María Rodríguez

Mapas bajo escenario sísmico de diseño de la NSR-10



Mapa de Riesgo Sísmico en Popayán

Riesgo sísmico en Popayán según microzonificación del SGC (2020)

Edificios prototipo diseñados con una deriva de 1% en suelo tipo D de la NSR-10

Sistema estructural

Niveles

☒ Comportamiento bajo escenario sísmico de diseño

Factores Fa y Fv provenientes de:

☐ MS de SGC ☐ MS de UAN ☒ NSR-10

☐ Comportamiento bajo escenario sísmico específico

Sa (%) Terrazas A

Sa (%) Colinas A

Sa (%) Colinas B

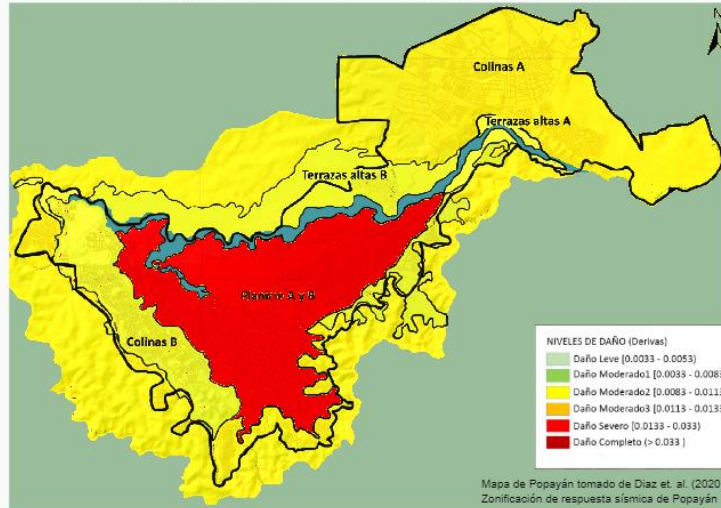
Sa (%) Terrazas B

Sa (%) Planicies A

Sa (%) Planicies B

CALCULAR

Mapa de riesgo sísmico de Popayán en función de la deriva



	Tipo C=Terrazas A	Tipo D=Terrazas B Colinas A y B	Tipo E=Planicies
Deriva Max.	0.0077	0.0097	0.0139

Realizado por: Anderson Ortiz, Ana María Rodríguez

Mapa de Riesgo Sísmico en Popayán

Riesgo sísmico en Popayán según microzonificación del SGC (2020)

Edificios prototipo diseñados con una deriva de 1% en suelo tipo D de la NSR-10

Sistema estructural

Niveles

☒ Comportamiento bajo escenario sísmico de diseño

Factores Fa y Fv provenientes de:

☐ MS de SGC ☐ MS de UAN ☒ NSR-10

☐ Comportamiento bajo escenario sísmico específico

Sa (%) Terrazas A

Sa (%) Colinas A

Sa (%) Colinas B

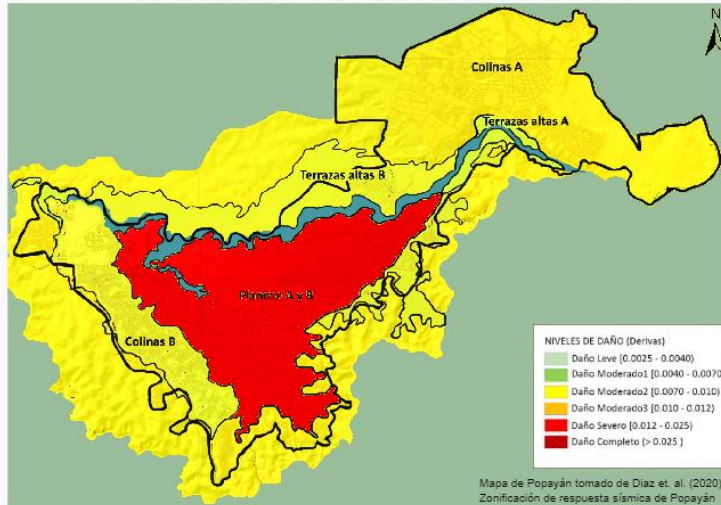
Sa (%) Terrazas B

Sa (%) Planicies A

Sa (%) Planicies B

CALCULAR

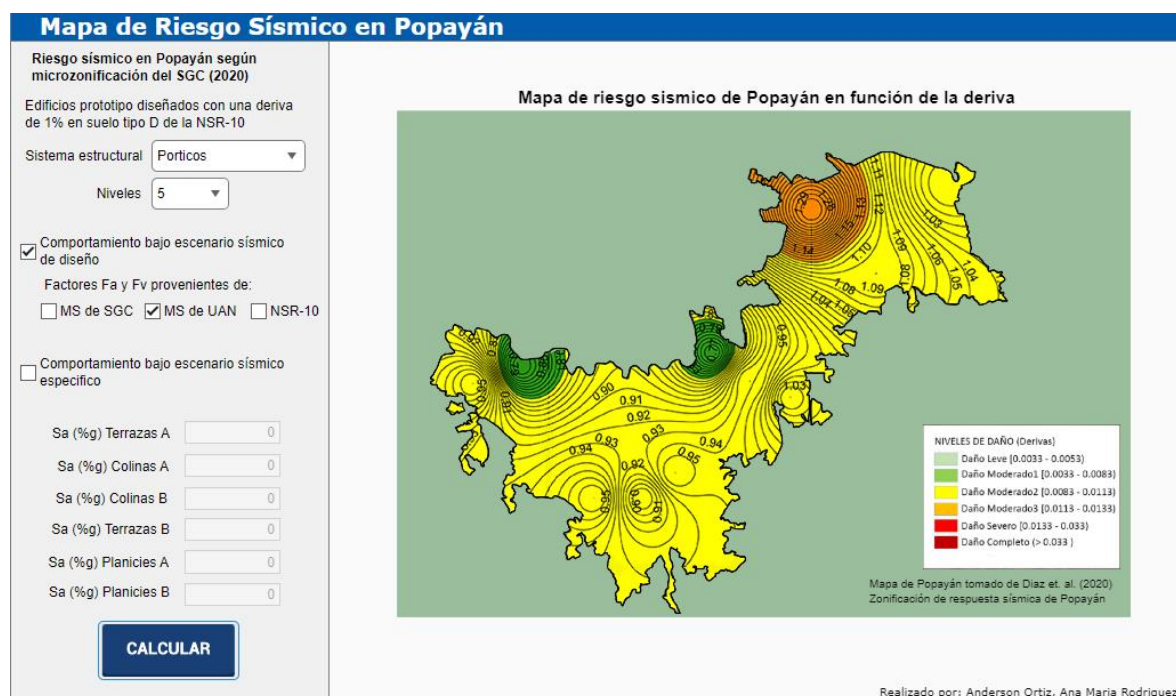
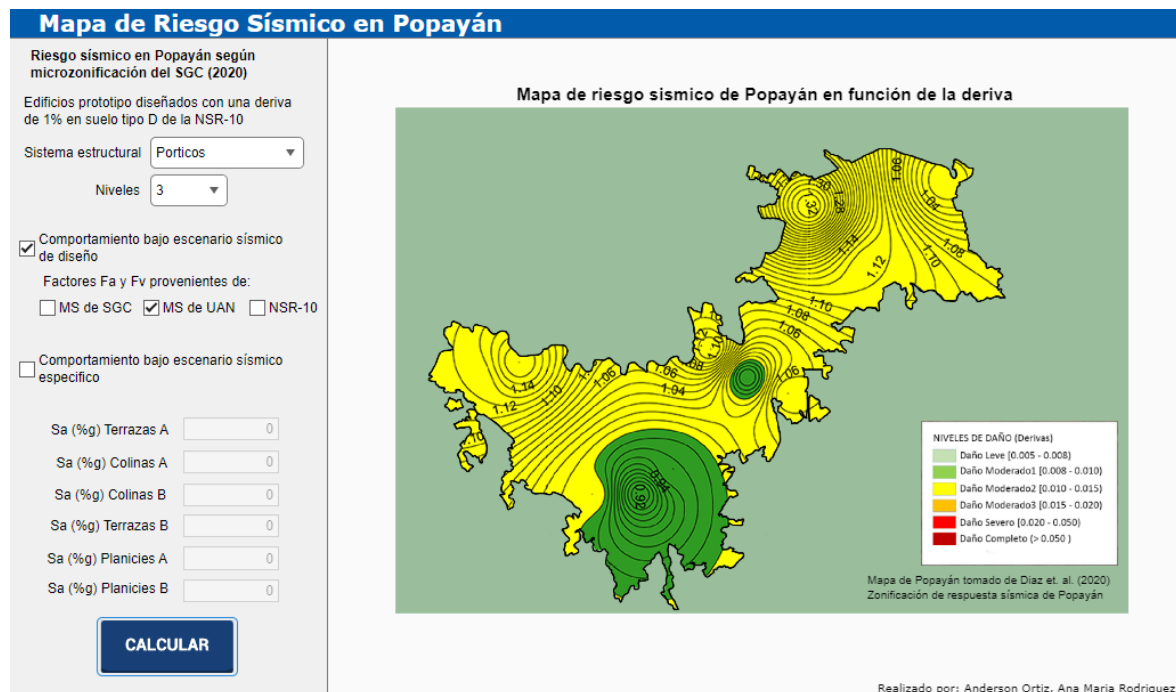
Mapa de riesgo sísmico de Popayán en función de la deriva



	Tipo C=Terrazas A	Tipo D=Terrazas B Colinas A y B	Tipo E=Planicies
Deriva Max.	0.0078	0.0098	0.0157

Realizado por: Anderson Ortiz, Ana María Rodríguez

Mapas bajo escenario sísmico de diseño del estudio de la Universidad de los Andes (2012):



Realizado por: Anderson Ortiz, Ana Maria Rodriguez

ANEXO 3

En este Anexo se presenta el código del programa de mapas de riesgo sísmico realizado en Matlab:

```
classdef Interfaz_tesis2 < matlab.apps.AppBase

% Properties that correspond to app components
properties (Access = public)
    UIFigure                matlab.ui.Figure
    MSdelSGC2020Label_5     matlab.ui.control.Label
    microzonificacindelSGC2020Label_4 matlab.ui.control.Label
    microzonificacindelSGC2020Label_3 matlab.ui.control.Label
    microzonificacindelSGC2020Label_2 matlab.ui.control.Label
    RiesgosmicoenPopaynsegnmicrozonificacindelSGC2020Label matlab.ui.control.Label
    Image                   matlab.ui.control.Image
    Label                   matlab.ui.control.Label
    UITable                 matlab.ui.control.Table
    UITable_2              matlab.ui.control.Table
    MapadeRiesgoSsmicoenPopaynLabel matlab.ui.control.Label
    TextArea_2             matlab.ui.control.TextArea
    SagPlaniciesBEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    SagPlaniciesBEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    SagPlaniciesAEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    SagPlaniciesAEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    SagTerrazasBEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    SagTerrazasBEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    SagColinasBEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    SagColinasBEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    SagColinasAEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    SagColinasAEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    SagTerrazasAEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    SagTerrazasAEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    Estructura_2           matlab.ui.control.DropDown
    NivelesLabel           matlab.ui.control.Label
    Estructura             matlab.ui.control.DropDown
    SistemaestructuralLabel matlab.ui.control.Label
    Button                 matlab.ui.control.Button
    RiesgoSismicoCheckbox matlab.ui.control.CheckBox
    PlanificacionCheckbox matlab.ui.control.CheckBox
    SGC                   matlab.ui.control.CheckBox
    UAN                   matlab.ui.control.CheckBox
    NSR                   matlab.ui.control.CheckBox
    TextArea               matlab.ui.control.TextArea
    UIAxes                 matlab.ui.control.UIAxes
end

% Callbacks that handle component events
methods (Access = private)

% Code that executes after component creation
function startupFcn(app)
mapacompleto = imread("tesis_zonas mathlab.png");
imshow(mapacompleto, 'Parent', app.UIAxes);
app.Button.Enable = 0;
app.Image.Visible = 0;

end

% Value changed function: Estructura
```

```

function EstructuraValueChanged(app, event)
est = app.Estructura.Value;
if est == "Porticos"
    app.Estructura_2.Items = ([ "3", "5", "7", "10" ]);
    Nivel = app.Estructura_2.Value;
    if app.RiesgoSismicoCheckbox.Value == 1
        app.Label.Text = "* Rango de Sa:0.72 - 1.1";
    end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    app.Estructura_2.Items = { '2', '3' };
    Nivel = app.Estructura_2.Value;
else
    Nivel = 0;
end
return
end

% Button pushed function: Button
function CalcularButtonPushed(app, event)

% Lee los valores de las tablas e imagenes
TablaDerivas = readmatrix("resultados de deriva.xlsx");
TablaSaDe = readmatrix("Resultados Sa con derivas.xlsx");
TablaSaDe2 = readmatrix("Resultados Sa con derivas2.xlsx");
mapacompleto = imread("tesis, zonas matlab.png");

% Lee los valores de estructura y nivel
est = app.Estructura.Value;
Nivel = app.Estructura_2.Value;
cfg_est = 0;

% Determina las derivas segun la estructura y nivel escogido
if est == "Porticos" && Nivel == "3"
    cfg_est = TablaDerivas(:,1);
    sa_datos = TablaSaDe2(:,1);
    de_datos = TablaSaDe2(:,2);
    sa_full=[0.59, 0.60, 0.61, 0.62, 0.63, 0.64, 0.65, 0.66, 0.67, 0.68, 0.69, 0.7:0.01:0.77, 0.78,
0.79, 0.8, 0.81, 0.82, 0.83, 0.84, 0.85, 0.86, 0.87, 0.88, 0.89, 0.90, 0.91, 0.92, 0.93, 0.94...
    0.95, 0.96, 0.97, 0.98, 0.99, 1, 1.01, 1.02, 1.03, 1.04, 1.05, 1.06, 1.07, 1.08, 1.09,
1.10:0.01:1.7];
    app.Image.Visible = 1;
    app.Image.ImageSource = "1 a 3.jpg";

elseif est == "Porticos" && Nivel == "5"
    cfg_est = TablaDerivas(:,2);
    sa_datos = TablaSaDe(:,3);
    de_datos = TablaSaDe(:,4);
    sa_full = [0.62, 0.63, 0.64, 0.65, 0.66, 0.67, 0.68, 0.69, 0.7, 0.71, 0.72, 0.73, 0.74, 0.75,
0.76, 0.77, ...
    0.78, 0.79, 0.8, 0.81, 0.82, 0.83, 0.84, 0.85, 0.86, 0.87, 0.88, 0.89, 0.9, 0.91, 0.92, 0.93,
0.94...
    0.95, 0.96, 0.97, 0.98, 0.99, 1, 1.01, 1.02, 1.03, 1.04, 1.05, 1.06, 1.07, 1.08, 1.09, 1.10];
    app.Image.Visible = 1;
    app.Image.ImageSource = "4 a 7.png.jpg";

elseif est == "Porticos" && Nivel == "7"
    cfg_est = TablaDerivas(:,3);
    sa_datos = TablaSaDe2(:,5);
    de_datos = TablaSaDe2(:,6);
    sa_full = [0.20, 0.21, 0.22, 0.32, 0.42, 0.43, 0.44, 0.45, 0.46, 0.47, 0.48, 0.49, 0.5, 0.51,
0.52, 0.53, 0.54, 0.55, 0.56, 0.57, 0.58, 0.59, ...

```

```

        0.6, 0.61, 0.62, 0.63, 0.64, 0.65, 0.66, 0.67, 0.68, 0.69, 0.7, 0.71, 0.72, 0.73, 0.74, 0.75,
0.76, 0.77, ...
        0.78, 0.79, 0.8, 0.81, 0.82, 0.83, 0.84, 0.85, 0.86, 0.87, 0.88, 0.89, 0.9, 0.91, 0.92, 0.93,
0.94...
        0.95, 0.96, 0.97, 0.98, 0.99, 1, 1.01, 1.02, 1.03, 1.04, 1.05, 1.06, 1.07, 1.08, 1.09, 1.10,
1.11, 1.12, 1.13, 1.14, 1.15, 1.16, 1.17,1.18];
    app.Image.Visible = 1;
    app.Image.ImageSource = "4 a 7.png.jpg";

elseif est == "Porticos" && Nivel == "10"
    cfg_est = TablaDerivas(:,4);
    sa_datos = TablaSaDe(:,7);
    de_datos = TablaSaDe(:,8);
    sa_full = [0.3, 0.31, 0.32, 0.33, 0.34, 0.35, 0.36, 0.37, 0.38, 0.39, 0.4, 0.41, 0.42, 0.43,
0.44, 0.45,...
    0.46, 0.47, 0.48, 0.49, 0.5, 0.51, 0.52, 0.53, 0.54, 0.55, 0.56, 0.57, 0.58, 0.59, 0.6, 0.61,
0.62,...
    0.63, 0.64, 0.65, 0.66, 0.67, 0.68, 0.69, 0.7, 0.71, 0.72, 0.73, 0.74];
    app.Image.Visible = 1;
    app.Image.ImageSource = "8 o mas.jpg";
    fprintf("Sa es: %4.2f", sa_datos);
    fprintf("las derivas son: %4.2f", de_datos);

elseif est == "Muros de mamposteria" && Nivel == "2"
    cfg_est = TablaDerivas(:,6);
    sa_datos = TablaSaDe(:,11);
    de_datos = TablaSaDe(:,12);
    sa_full = [0.72:0.01:0.77, 0.78, 0.79, 0.8, 0.81, 0.82, 0.83, 0.84, 0.85, 0.86, 0.87, 0.88, 0.89,
0.90:0.01:1.1];
    app.Image.Visible = 1;
    app.Image.ImageSource = "1 a 3.jpg";

elseif est == "Muros de mamposteria" && Nivel == "3"
    cfg_est = TablaDerivas(:,7);
    sa_datos = TablaSaDe(:,13);
    de_datos = TablaSaDe(:,14);
    sa_full = [0.72:0.01:0.77, 0.78, 0.79, 0.8, 0.81, 0.82, 0.83, 0.84, 0.85, 0.86, 0.87, 0.88, 0.89,
0.90:0.01:1.1];
    app.Image.Visible = 1;
    app.Image.ImageSource = "1 a 3.jpg";
end

if app.RiesgoSismicoCheckbox.Value == 1

    % Interpola derivas
    de_full = interp1(sa_datos,de_datos,sa_full);
    fprintf("Interpolacion %4.2f", de_full);
    % Encuentra las derivas correspondiente al Sa ingresado
    indice_z1 = find(sa_full==app.SagTerrazasAEditField.Value);
    cfg_est(4,1) = de_full(indice_z1);
    indice_z2 = find(sa_full==app.SagColinasAEditField.Value);
    cfg_est(5,1) = de_full(indice_z2);
    indice_z3 = find(sa_full==app.SagColinasBEditField.Value);
    cfg_est(6,1) = de_full(indice_z3);
    indice_z4 = find(sa_full==app.SagTerrazasBEditField.Value);
    cfg_est(7,1) = de_full(indice_z4);
    indice_z5 = find(sa_full==app.SagPlaniciesAEditField.Value);
    cfg_est(8,1) = de_full(indice_z5);
    indice_z6 = find(sa_full==app.SagPlaniciesBEditField.Value);
    cfg_est(9,1) = de_full(indice_z6);

```

```

end

% Determina cual deriva es mayor entre planices A o B
if cfg_est(8,1) < cfg_est(9,1)
    cfg_est(8,1) = cfg_est(9,1);
else
    cfg_est(8,1) = cfg_est(8,1);
end

if app.SGC.Value == 1 || app.RiesgoSismicoCheckbox.Value == 1
    for c = 4:height(cfg_est)
        dato = cfg_est(c,1);

        if (c == 4) % DETERMINAR AREA TERRAZAS A
            for l1 = 1:size(mapacompleto,1)
                for l2 = 1:size(mapacompleto,2)
                    if ((mapacompleto(l1,l2,1) <= 120) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 100)...
                        && (mapacompleto(l1,l2,2) <=139) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=110)...
                        && (mapacompleto(l1,l2,3) <=124) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 100))
                        A = mapacompleto(l1,l2,1) + 115;
                        B = mapacompleto(l1,l2,2) - 140;
                        C = mapacompleto(l1,l2,3) - 120;
                        D = mapacompleto(l1,l2,1) + 115;
                        E = mapacompleto(l1,l2,2) - 140;
                        F = mapacompleto(l1,l2,3) - 120;
                        G = mapacompleto(l1,l2,1) + 125;
                        H = mapacompleto(l1,l2,2) + 40;
                        I = mapacompleto(l1,l2,3) - 120;
                        J = mapacompleto(l1,l2,1) + 115;
                        K = mapacompleto(l1,l2,2) + 140;
                        L = mapacompleto(l1,l2,3) - 70;
                        M = mapacompleto(l1,l2,1) + 40;
                        N = mapacompleto(l1,l2,2) + 80;
                        O = mapacompleto(l1,l2,3) - 20;
                        P = mapacompleto(l1,l2,1) + 90;
                        Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 100;
                        R = mapacompleto(l1,l2,3) + 20;
                        if (est == "Porticos" && Nivel == "3")
                            if dato > 0.050 % Vinotinto
                                mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
                            elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050 % Rojo
                                mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
                            elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020 % Naranja
                                mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
                            elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015 % Amarillo
                                mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
                            elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010 % Verde oscuro
                                mapacompleto(l1,l2,:) = [123, 202, 105];
                            fprintf ("Entro a verde 3")
                            elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008 % Verde claro
                                mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
                            end
                        elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
                            if dato > 0.033 % Vinotinto
                                mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
                            elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033 % Rojo
                                mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
                            elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133 % Naranja
                                mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
                                fprintf ("Entro a naranaj")
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113      % Amarillo
    mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083      % Verde oscuro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [123, 202, 105];
    fprintf ("Entro a verde")
elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053    % Verde claro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
    if dato > 0.0250                        % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250  % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120  % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100  % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.0070  % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [123, 202, 105];
    elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    if dato > 0.00850                      % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068   % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005   % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034  % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.0017 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
end
end % cierra if terrazas
end % cierra FOR l2
end % cierra FOR l1
end % cierra c == 4

if (c == 5)      % DETERMINAR AREA COLINAS A
    for l1 = 1:size(mapacompleto,1)
        for l2 = 1:size(mapacompleto,2)
            if ((mapacompleto(l1,l2,1) <= 155) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 70)...
                && (mapacompleto(l1,l2,2) <=250) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=110)...
                && (mapacompleto(l1,l2,3) <=100) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 30))
                A = mapacompleto(l1,l2,1) + 70;
                B = mapacompleto(l1,l2,2) - 180;
                C = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
                D = mapacompleto(l1,l2,1) + 115;
                E = mapacompleto(l1,l2,2) - 180;
                F = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
                G = mapacompleto(l1,l2,1) + 125;
                H = mapacompleto(l1,l2,2) - 10;
                I = mapacompleto(l1,l2,3) - 120;
                J = mapacompleto(l1,l2,1) + 120;
                K = mapacompleto(l1,l2,2) + 70;
                L = mapacompleto(l1,l2,3) - 50;
            end
        end
    end
end

```

```

M = mapacompleto(l1,l2,1) + 10;
N = mapacompleto(l1,l2,2) + 20;
O = mapacompleto(l1,l2,3) - 0;
P = mapacompleto(l1,l2,1) + 60;
Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 40;
R = mapacompleto(l1,l2,3) + 100;
if (est == "Porticos" && Nivel == "3")
    if dato > 0.050 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
    if dato > 0.033 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
    if dato > 0.0250 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.0070 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    if dato > 0.00850 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.00170 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
end

```

```

end
elseif (mapacompleto(l1,l2,1)<=172) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 148)...
    && (mapacompleto(l1,l2,2) <=250) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=168)...
    && (mapacompleto(l1,l2,3) <=110) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 70)
    A = mapacompleto(l1,l2,1) + 70;
    B = mapacompleto(l1,l2,2) - 180;
    C = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
    D = mapacompleto(l1,l2,1) + 115;
    E = mapacompleto(l1,l2,2) - 180;
    F = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
    G = mapacompleto(l1,l2,1) + 125;
    H = mapacompleto(l1,l2,2) - 10;
    I = mapacompleto(l1,l2,3) - 120;
    J = mapacompleto(l1,l2,1) + 120;
    K = mapacompleto(l1,l2,2) + 70;
    L = mapacompleto(l1,l2,3) - 50;
    M = mapacompleto(l1,l2,1) + 10;
    N = mapacompleto(l1,l2,2) + 20;
    O = mapacompleto(l1,l2,3) - 0;
    P = mapacompleto(l1,l2,1) + 60;
    Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 40;
    R = mapacompleto(l1,l2,3) + 100;
if (est == "Porticos" && Nivel == "3")
    if dato > 0.050 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
    if dato > 0.033 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
    if dato > 0.0250 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.0070 % Verde oscuro

```

```

        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040    % Verde claro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    if dato > 0.00850                        % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085    % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068      % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005      % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034     % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.00170  % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
end
end % cierra if Colinas A
end % cierra FOR l2
end % cierra FOR l1
end % cierra c == 5

if (c == 6)    % DETERMINAR AREA COLINAS B
    for l1 = 1:size(mapacompleto,1)
        for l2 = 1:size(mapacompleto,2)
            if ((mapacompleto(l1,l2,1) <= 222) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 160)...
                && (mapacompleto(l1,l2,2) <=188) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=134)...
                && (mapacompleto(l1,l2,3) <=100) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 49))
                A = mapacompleto(l1,l2,1) - 15;
                B = mapacompleto(l1,l2,2) - 150;
                C = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
                D = mapacompleto(l1,l2,1) + 80;
                E = mapacompleto(l1,l2,2) - 150;
                F = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
                G = mapacompleto(l1,l2,1) + 45;
                H = mapacompleto(l1,l2,2) + 20;
                I = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
                J = mapacompleto(l1,l2,1) + 45;
                K = mapacompleto(l1,l2,2) + 80;
                L = mapacompleto(l1,l2,3) - 30;
                M = mapacompleto(l1,l2,1) - 60;
                N = mapacompleto(l1,l2,2) + 30;
                O = mapacompleto(l1,l2,3) - 10;
                P = mapacompleto(l1,l2,1) - 10;
                Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 50;
                R = mapacompleto(l1,l2,3) + 90;
            if (est == "Porticos" && Nivel == "3")
                if dato > 0.050                % Vinotinto
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
                elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050    % Rojo
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
                elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020    % Naranja
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
                elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015    % Amarillo
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
                elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010    % Verde oscuro
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
                elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008    % Verde claro

```

```

        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
    if dato > 0.033 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
    if dato > 0.0250 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.0070 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    if dato > 0.00850 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.00170 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
end
elseif((mapacompleto(l1,l2,1)<=177) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 159)...
&& (mapacompleto(l1,l2,2) <=144) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=104)...
&& (mapacompleto(l1,l2,3) <=58) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 30))
A = mapacompleto(l1,l2,1) - 15;
B = mapacompleto(l1,l2,2) - 150;
C = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
D = mapacompleto(l1,l2,1) + 80;
E = mapacompleto(l1,l2,2) - 150;
F = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
G = mapacompleto(l1,l2,1) + 45;
H = mapacompleto(l1,l2,2) + 20;
I = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
J = mapacompleto(l1,l2,1) + 45;
K = mapacompleto(l1,l2,2) + 80;
L = mapacompleto(l1,l2,3) - 30;
M = mapacompleto(l1,l2,1) - 60;

```

```

N = mapacompleto(l1,l2,2) + 30;
O = mapacompleto(l1,l2,3) - 10;
P = mapacompleto(l1,l2,1) - 10;
Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 50;
R = mapacompleto(l1,l2,3) + 90;
if (est == "Porticos" && Nivel == "3")
    if dato > 0.050 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
    if dato > 0.033 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
    if dato > 0.0250 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.0070 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    if dato > 0.00850 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.00170 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
end

```

```

        end
        end % cierra if Colinas B
    end % cierra FOR l2
    end % cierra FOR l1
end % cierra c == 6

if (c == 7)    % DETERMINAR AREA TERRAZAS B
    for l1 = 1:size(mapacompleto,1)
        for l2 = 1:size(mapacompleto,2)
            if (mapacompleto(l1,l2,1) <= 162) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 123)...
                && (mapacompleto(l1,l2,2) <=170) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=90)...
                && (mapacompleto(l1,l2,3) <=160) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 83)
                    A = mapacompleto(l1,l2,1) + 50;
                    B = mapacompleto(l1,l2,2) - 160;
                    C = mapacompleto(l1,l2,3) - 140;
                    D = mapacompleto(l1,l2,1) + 110;
                    E = mapacompleto(l1,l2,2) - 160;
                    F = mapacompleto(l1,l2,3) - 140;
                    G = mapacompleto(l1,l2,1) + 100;
                    H = mapacompleto(l1,l2,2) + 30;
                    I = mapacompleto(l1,l2,3) - 140;
                    J = mapacompleto(l1,l2,1) + 100;
                    K = mapacompleto(l1,l2,2) + 90;
                    L = mapacompleto(l1,l2,3) - 100;
                    M = mapacompleto(l1,l2,1) + 0;
                    N = mapacompleto(l1,l2,2) + 40;
                    O = mapacompleto(l1,l2,3) - 60;
                    P = mapacompleto(l1,l2,1) + 50;
                    Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 60;
                    R = mapacompleto(l1,l2,3) + 30;
                if est == "Porticos" && (Nivel == "3")
                    if dato > 0.050                                % Vinotinto
                        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
                    elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050          % Rojo
                        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
                    elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020          % Naranja
                        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
                    elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015          % Amarillo
                        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
                    elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010          % Verde oscuro
                        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
                    elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008          % Verde claro
                        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
                    end
                elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
                    if dato > 0.033                                % Vinotinto
                        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
                    elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033          % Rojo
                        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
                    elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133          % Naranja
                        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
                    elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113          % Amarillo
                        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
                    elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083          % Verde oscuro
                        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
                    elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053          % Verde claro
                        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
                    end
                elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
                    if dato > 0.0250                                % Vinotinto

```

```

        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250      % Rojo
    mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120      % Naranja
    mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100      % Amarillo
    mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.070      % Verde oscuro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040    % Verde claro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    if dato > 0.00850                        % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085    % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068      % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005      % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034    % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.00170  % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
end
end % cierra if Terrazas B
end % cierra FOR l2
end % cierra FOR l1
end % cierra c == 7

if (c == 8)      % DETERMINAR AREA PLANICIES
    for l1 = 1:size(mapacompleto,1)
        for l2 = 1:size(mapacompleto,2)
            if (mapacompleto(l1,l2,1) <= 238) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 170)...
                && (mapacompleto(l1,l2,2) <=218) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=147)...
                && (mapacompleto(l1,l2,3) <=164) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 100)
                A = mapacompleto(l1,l2,1) - 50;
                B = mapacompleto(l1,l2,2) - 200;
                C = mapacompleto(l1,l2,3) - 140;
                D = mapacompleto(l1,l2,1) + 40;
                E = mapacompleto(l1,l2,2) - 200;
                F = mapacompleto(l1,l2,3) - 140;
                G = mapacompleto(l1,l2,1) + 45;
                H = mapacompleto(l1,l2,2) - 20;
                I = mapacompleto(l1,l2,3) - 140;
                J = mapacompleto(l1,l2,1) + 45;
                K = mapacompleto(l1,l2,2) + 50;
                L = mapacompleto(l1,l2,3) - 100;
                M = mapacompleto(l1,l2,1) - 60;
                N = mapacompleto(l1,l2,2) + 10;
                O = mapacompleto(l1,l2,3) - 60;
                P = mapacompleto(l1,l2,1) - 10;
                Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 20;
                R = mapacompleto(l1,l2,3) + 30;
                if est == "Porticos" && Nivel == "3"
                    if dato > 0.050            % Vinotinto
                        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
                    elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050    % Rojo

```

```

        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020 % Naranja
    mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015 % Amarillo
    mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010 % Verde oscuro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008 % Verde claro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
    if dato > 0.033 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
    if dato > 0.0250 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.0070 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    if dato > 0.00850 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.0017 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
end
end % cierra if Planicies B
end % cierra FOR l2
end % cierra FOR l1
end % cierra c == 8

imshow(mapacompleto, 'Parent', app.UIAxes);

```

end

```

fprintf("Entre a riesgoooo ");
app.UITable.Visible = "on";
app.UITable_2.Visible = "off";
app.UITable.Data = cfg_est(4:8)';

```

end

```

if app.UAN.Value == 1
    app.UITable.Visible = "off";
    app.UITable_2.Visible = "off";
    if (est == "Porticos" && Nivel == "3")
        app.Image.Visible = 1;
        P3 = imread("Graficos tesis/Derivas, portico de 3 pisos UAN.png");
        imshow(P3, 'Parent',app.UIAxes);
    elseif (est == "Porticos" && Nivel == "5")
        app.Image.Visible = 1;
        P10 = imread("Graficos tesis/Derivas, portico de 5 pisos UAN.png");
        imshow(P10, 'Parent',app.UIAxes);
    elseif (est == "Porticos" && Nivel == "7")
        app.Image.Visible = 1;
        P10 = imread("Graficos tesis/Derivas, portico de 7 pisos UAN.png");
        imshow(P10, 'Parent',app.UIAxes);
    elseif (est == "Porticos" && Nivel == "10")
        app.Image.Visible = 1;
        P10 = imread("Graficos tesis/Derivas, portico de 10 pisos UAN.png");
        imshow(P10, 'Parent',app.UIAxes);
    elseif (est == "Muros de mamposteria" && Nivel == "2")
        app.Image.Visible = 1;
        P10 = imread("Graficos tesis/Derivas, muros 2 pisos UAN.png");
        imshow(P10, 'Parent',app.UIAxes);
    elseif (est == "Muros de mamposteria" && Nivel == "3")
        app.Image.Visible = 1;
        P10 = imread("Graficos tesis/Derivas, muros 3 pisos UAN.png");
        imshow(P10, 'Parent',app.UIAxes);
    end
end

```

end

```

if app.NSR.Value == 1
    for c = 1:3
        dato = cfg_est(c,1);

        if (c == 1) % DETERMINAR AREA TERRAZAS A
            for l1 = 1:size(mapacompleto,1)
                for l2 = 1:size(mapacompleto,2)
                    if ((mapacompleto(l1,l2,1) <= 130) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 100)...
                        && (mapacompleto(l1,l2,2) <=139) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=110)...
                        && (mapacompleto(l1,l2,3) <=124) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 100))
                        A = mapacompleto(l1,l2,1) + 115;
                        B = mapacompleto(l1,l2,2) - 140;
                        C = mapacompleto(l1,l2,3) - 120;
                        D = mapacompleto(l1,l2,1) + 115;
                        E = mapacompleto(l1,l2,2) - 140;
                        F = mapacompleto(l1,l2,3) - 120;
                        G = mapacompleto(l1,l2,1) + 125;
                        H = mapacompleto(l1,l2,2) + 40;
                        I = mapacompleto(l1,l2,3) - 120;
                        J = mapacompleto(l1,l2,1) + 115;
                        K = mapacompleto(l1,l2,2) + 140;
                        L = mapacompleto(l1,l2,3) - 70;
                        M = mapacompleto(l1,l2,1) + 40;
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

N = mapacompleto(l1,l2,2) + 80;
O = mapacompleto(l1,l2,3) - 20;
P = mapacompleto(l1,l2,1) + 90;
Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 100;
R = mapacompleto(l1,l2,3) + 20;
if (est == "Porticos" && Nivel == "3")
    if dato > 0.050 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
    if dato > 0.033 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
    if dato > 0.0250 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.0070 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    if dato > 0.00850 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.00170 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
end

```

```

        end
    end % cierra if terrazas
end % cierra FOR l2
end % cierra FOR l1
end % cierra c == 4

if (c == 2) % DETERMINAR AREA COLINAS A
    for l1 = 1:size(mapacompleto,1)
        for l2 = 1:size(mapacompleto,2)
            if ((mapacompleto(l1,l2,1) <= 155) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 70)...
                && (mapacompleto(l1,l2,2) <=250) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=110)...
                && (mapacompleto(l1,l2,3) <=107) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 30))
                A = mapacompleto(l1,l2,1) + 70;
                B = mapacompleto(l1,l2,2) - 180;
                C = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
                D = mapacompleto(l1,l2,1) + 115;
                E = mapacompleto(l1,l2,2) - 180;
                F = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
                G = mapacompleto(l1,l2,1) + 125;
                H = mapacompleto(l1,l2,2) - 10;
                I = mapacompleto(l1,l2,3) - 120;
                J = mapacompleto(l1,l2,1) + 120;
                K = mapacompleto(l1,l2,2) + 70;
                L = mapacompleto(l1,l2,3) - 50;
                M = mapacompleto(l1,l2,1) + 10;
                N = mapacompleto(l1,l2,2) + 20;
                O = mapacompleto(l1,l2,3) - 0;
                P = mapacompleto(l1,l2,1) + 60;
                Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 40;
                R = mapacompleto(l1,l2,3) + 100;
            if (est == "Porticos" && Nivel == "3")
                if dato > 0.050 % Vinotinto
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
                elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050 % Rojo
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
                elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020 % Naranja
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
                elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015 % Amarillo
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
                elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010 % Verde oscuro
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
                elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008 % Verde claro
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
                end
            elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
                if dato > 0.033 % Vinotinto
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
                elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033 % Rojo
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
                elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133 % Naranja
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
                elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113 % Amarillo
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
                elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083 % Verde oscuro
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
                elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053 % Verde claro
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
                end
            elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
                if dato > 0.0250 % Vinotinto

```

```

        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250      % Rojo
    mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120      % Naranja
    mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100      % Amarillo
    mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.070      % Verde oscuro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040    % Verde claro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    if dato > 0.00850                        % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085    % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068      % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005      % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034     % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.00170  % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
end
elseif (mapacompleto(l1,l2,1)<=172) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 148)...
    && (mapacompleto(l1,l2,2) <=250) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=168)...
    && (mapacompleto(l1,l2,3) <=110) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 70)
    A = mapacompleto(l1,l2,1) + 70;
    B = mapacompleto(l1,l2,2) - 180;
    C = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
    D = mapacompleto(l1,l2,1) + 115;
    E = mapacompleto(l1,l2,2) - 180;
    F = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
    G = mapacompleto(l1,l2,1) + 125;
    H = mapacompleto(l1,l2,2) - 10;
    I = mapacompleto(l1,l2,3) - 120;
    J = mapacompleto(l1,l2,1) + 120;
    K = mapacompleto(l1,l2,2) + 70;
    L = mapacompleto(l1,l2,3) - 50;
    M = mapacompleto(l1,l2,1) + 10;
    N = mapacompleto(l1,l2,2) + 20;
    O = mapacompleto(l1,l2,3) - 0;
    P = mapacompleto(l1,l2,1) + 60;
    Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 40;
    R = mapacompleto(l1,l2,3) + 100;
if (est == "Porticos" && Nivel == "3")
    if dato > 0.050                        % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050      % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020      % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015      % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010      % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008    % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];

```

```

end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
    if dato > 0.033 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
    if dato > 0.0250 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.0070 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    if dato > 0.00850 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.00170 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
end
end % cierra if Colinas A
end % cierra FOR l2
end % cierra FOR l1
end % cierra c == 5

if (c == 2) % DETERMINAR AREA COLINAS B
    for l1 = 1:size(mapacompleto,1)
        for l2 = 1:size(mapacompleto,2)
            if ((mapacompleto(l1,l2,1) <= 222) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 160)...
                && (mapacompleto(l1,l2,2) <=188) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=134)...
                && (mapacompleto(l1,l2,3) <=100) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 49))
                A = mapacompleto(l1,l2,1) - 15;
                B = mapacompleto(l1,l2,2) - 150;
                C = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
                D = mapacompleto(l1,l2,1) + 80;
                E = mapacompleto(l1,l2,2) - 150;
            end
        end
    end
end

```

```

F = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
G = mapacompleto(l1,l2,1) + 45;
H = mapacompleto(l1,l2,2) + 20;
I = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
J = mapacompleto(l1,l2,1) + 45;
K = mapacompleto(l1,l2,2) + 80;
L = mapacompleto(l1,l2,3) - 30;
M = mapacompleto(l1,l2,1) - 60;
N = mapacompleto(l1,l2,2) + 30;
O = mapacompleto(l1,l2,3) - 10;
P = mapacompleto(l1,l2,1) - 10;
Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 50;
R = mapacompleto(l1,l2,3) + 90;
if (est == "Porticos" && Nivel == "3")
    if dato > 0.050 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
    if dato > 0.033 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
    if dato > 0.0250 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.0070 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    if dato > 0.00850 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068 % Naranja

```

```

        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005           % Amarillo
    mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034           % Verde oscuro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.00170        % Verde claro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
end
end
elseif((mapacompleto(l1,l2,1)<=177) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 159)...
    && (mapacompleto(l1,l2,2) <=144) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=104)...
    && (mapacompleto(l1,l2,3) <=58) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 30))
    A = mapacompleto(l1,l2,1) - 15;
    B = mapacompleto(l1,l2,2) - 150;
    C = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
    D = mapacompleto(l1,l2,1) + 80;
    E = mapacompleto(l1,l2,2) - 150;
    F = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
    G = mapacompleto(l1,l2,1) + 45;
    H = mapacompleto(l1,l2,2) + 20;
    I = mapacompleto(l1,l2,3) - 80;
    J = mapacompleto(l1,l2,1) + 45;
    K = mapacompleto(l1,l2,2) + 80;
    L = mapacompleto(l1,l2,3) - 30;
    M = mapacompleto(l1,l2,1) - 60;
    N = mapacompleto(l1,l2,2) + 30;
    O = mapacompleto(l1,l2,3) - 10;
    P = mapacompleto(l1,l2,1) - 10;
    Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 50;
    R = mapacompleto(l1,l2,3) + 90;
if (est == "Porticos" && Nivel == "3")
    if dato > 0.050                                % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050           % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020           % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015           % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010           % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008         % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
    if dato > 0.033                                % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033           % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133           % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113           % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083           % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053         % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
    if dato > 0.0250                                % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    end
end

```

```

elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250      % Rojo
    mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120      % Naranja
    mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100      % Amarillo
    mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.070      % Verde oscuro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040    % Verde claro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    if dato > 0.00850                        % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068   % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005    % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034   % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.0017 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
end
end % cierra if Colinas B
end % cierra FOR l2
end % cierra FOR l1
end % cierra c == 6

if (c == 2) % DETERMINAR AREA TERRAZAS B
    for l1 = 1:size(mapacompleto,1)
        for l2 = 1:size(mapacompleto,2)
            if (mapacompleto(l1,l2,1) <= 162) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 123)...
                && (mapacompleto(l1,l2,2) <=170) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=90)...
                && (mapacompleto(l1,l2,3) <=160) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 83)
                A = mapacompleto(l1,l2,1) + 50;
                B = mapacompleto(l1,l2,2) - 160;
                C = mapacompleto(l1,l2,3) - 140;
                D = mapacompleto(l1,l2,1) + 110;
                E = mapacompleto(l1,l2,2) - 160;
                F = mapacompleto(l1,l2,3) - 140;
                G = mapacompleto(l1,l2,1) + 100;
                H = mapacompleto(l1,l2,2) + 30;
                I = mapacompleto(l1,l2,3) - 140;
                J = mapacompleto(l1,l2,1) + 100;
                K = mapacompleto(l1,l2,2) + 90;
                L = mapacompleto(l1,l2,3) - 100;
                M = mapacompleto(l1,l2,1) + 0;
                N = mapacompleto(l1,l2,2) + 40;
                O = mapacompleto(l1,l2,3) - 60;
                P = mapacompleto(l1,l2,1) + 50;
                Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 60;
                R = mapacompleto(l1,l2,3) + 30;
            if est == "Porticos" && (Nivel == "3")
                if dato > 0.050                % Vinotinto
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
                elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050 % Rojo
                    mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
                end
            end
        end
    end
end

```

```

elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020 % Naranja
    mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015 % Amarillo
    mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010 % Verde oscuro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008 % Verde claro
    mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
    if dato > 0.033 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
    if dato > 0.0250 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.0070 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Muros de mamposteria"
    if dato > 0.00850 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.00170 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
end
end % cierra if Terrazas B
end % cierra FOR l2
end % cierra FOR l1
end % cierra c == 7

if (c == 3) % DETERMINAR AREA PLANICIES
    for l1 = 1:size(mapacompleto,1)
        for l2 = 1:size(mapacompleto,2)

```

```

if (mapacompleto(l1,l2,1) <= 238) && (mapacompleto(l1,l2,1) >= 170)...
    && (mapacompleto(l1,l2,2) <=218) && (mapacompleto(l1,l2,2) >=147)...
    && (mapacompleto(l1,l2,3) <=164) && (mapacompleto(l1,l2,3) >= 100)
A = mapacompleto(l1,l2,1) - 50;
B = mapacompleto(l1,l2,2) - 200;
C = mapacompleto(l1,l2,3) - 140;
D = mapacompleto(l1,l2,1) + 40;
E = mapacompleto(l1,l2,2) - 200;
F = mapacompleto(l1,l2,3) - 140;
G = mapacompleto(l1,l2,1) + 45;
H = mapacompleto(l1,l2,2) - 20;
I = mapacompleto(l1,l2,3) - 140;
J = mapacompleto(l1,l2,1) + 45;
K = mapacompleto(l1,l2,2) + 50;
L = mapacompleto(l1,l2,3) - 100;
M = mapacompleto(l1,l2,1) - 60;
N = mapacompleto(l1,l2,2) + 10;
O = mapacompleto(l1,l2,3) - 60;
P = mapacompleto(l1,l2,1) - 10;
Q = mapacompleto(l1,l2,2) + 20;
R = mapacompleto(l1,l2,3) + 30;
if est == "Porticos" && Nivel == "3"
    if dato > 0.050 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.020 < dato && dato <= 0.050 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.015 < dato && dato <= 0.020 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.010 < dato && dato <= 0.015 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.008 < dato && dato <= 0.010 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.005 <= dato && dato <= 0.008 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "5" || Nivel == "7")
    if dato > 0.033 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0133 < dato && dato <= 0.033 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0113 < dato && dato <= 0.0133 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0083 < dato && dato <= 0.0113 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0053 < dato && dato <= 0.0083 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0033 <= dato && dato <= 0.0053 % Verde claro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
elseif est == "Porticos" && (Nivel == "10")
    if dato > 0.0250 % Vinotinto
        mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
    elseif 0.0120 < dato && dato <= 0.0250 % Rojo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
    elseif 0.0100 < dato && dato <= 0.0120 % Naranja
        mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
    elseif 0.0070 < dato && dato <= 0.0100 % Amarillo
        mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
    elseif 0.0040 < dato && dato <= 0.0070 % Verde oscuro
        mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
    elseif 0.0025 <= dato && dato <= 0.0040 % Verde claro

```

```

        mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
    end
    elseif est == "Muros de mamposteria"
        if dato > 0.00850 % Vinotinto
            mapacompleto(l1,l2,:) = [A, B, C];
        elseif 0.00680 < dato && dato <= 0.0085 % Rojo
            mapacompleto(l1,l2,:) = [D, E, F];
        elseif 0.005 < dato && dato <= 0.0068 % Naranja
            mapacompleto(l1,l2,:) = [G, H, I];
        elseif 0.0034 < dato && dato <= 0.005 % Amarillo
            mapacompleto(l1,l2,:) = [J, K, L];
        elseif 0.0017 < dato && dato <= 0.0034 % Verde oscuro
            mapacompleto(l1,l2,:) = [M, N, O];
        elseif 0.0001 <= dato && dato <= 0.00170 % Verde claro
            mapacompleto(l1,l2,:) = [P, Q, R];
        end
    end
end % cierra if Planicies B
end % cierra FOR l2
end % cierra FOR l1
end % cierra c == 8

imshow(mapacompleto, 'Parent',app.UIAxes);

end

app.UITable.Visible = "off";
app.UITable_2.Visible = "on";
app.UITable_2.Data = cfg_est(1:3)';
end

end

% Value changed function: PlanificacionCheckbox
function PlanificacionCheckboxValueChanged(app, event)
if app.PlanificacionCheckbox.Value == 1
    app.Button.Enable = 1; % Habilita Boton de calcular
    app.RiesgoSismicoCheckbox.Value = 0; % Deshabilita el checkbox de mapa riesgo
    app.SagTerrazasAEditField.Enable = 0; % Deshabilita campos de Sa
    app.SagColinasAEditField.Enable = 0;
    app.SagColinasBEditField.Enable = 0;
    app.SagTerrazasBEditField.Enable = 0;
    app.SagPlaniciesAEditField.Enable = 0;
    app.SagPlaniciesBEditField.Enable = 0;
    app.SGC.Enable = 1; %habilita los botones de los estudios
    app.UAN.Enable = 1;
    app.NSR.Enable = 1;
    app.Label1.Text = "";
end

if app.PlanificacionCheckbox.Value == 0 && app.RiesgoSismicoCheckbox.Value == 0
    app.Button.Enable = 0; % Deshabilita boton de calcular si no hay ningun
checkbox marcado
end

end

% Value changed function: RiesgoSismicoCheckbox
function RiesgoSismicoCheckboxValueChanged(app, event)

```

```

value2 = app.Estructura_2.Value;
if app.RiesgoSismicoCheckbox.Value == 1
    app.Button.Enable = 1;           % Habilita Boton de calcular
    app.PlanificacionCheckbox.Value = 0; % Deshabilita el checkbox de planificación
    app.SagTerrazasAEditField.Enable = 1; % Habilita campos de Sa
    app.SagColinasAEditField.Enable = 1;
    app.SagColinasBEditField.Enable = 1;
    app.SagTerrazasBEditField.Enable = 1;
    app.SagPlaniciesAEditField.Enable = 1;
    app.SagPlaniciesBEditField.Enable = 1;
    app.SGC.Enable = 0;           %Desabilita los botones de los
estudios
    app.UAN.Enable = 0;
    app.NSR.Enable = 0;
    if value2 == "2"
        app.Label.Text = "* Rango de Sa:0.72 - 1.1";
    elseif value2 == "3"
        app.Label.Text = "* Rango de Sa:0.72 - 1.1";
    end
end

if app.PlanificacionCheckbox.Value == 0 && app.RiesgoSismicoCheckbox.Value == 0
    app.Button.Enable = 0;           % Deshabilita boton de calcular si no hay ningun
checkbox marcado
end
end

% Value changed function: Estructura_2
function Estructura_2ValueChanged(app, event)
    value = app.Estructura_2.Value;
    if app.RiesgoSismicoCheckbox.Value == 1
        if value == "3"
            app.Label.Text = "* Rango de Sa:0.42 - 1.7";
        elseif value == "5"
            app.Label.Text = "* Rango de Sa:0.62 - 1.1";
        elseif value == "7"
            app.Label.Text = "* Rango de Sa:0.24 - 1.18";
        elseif value == "10"
            app.Label.Text = "* Rango de Sa:0.32 - 0.74";
        end
    end
end

% Value changed function: SGC
function SGCValueChanged(app, event)
    if app.SGC.Value == 1
        app.UAN.Value = 0;
        app.NSR.Value = 0;
    end
end

% Value changed function: UAN
function UANValueChanged(app, event)
    if app.UAN.Value == 1
        app.SGC.Value = 0;
        app.NSR.Value = 0;
    end
end
end

```

```

% Value changed function: NSR
function NSRValueChanged(app, event)
    if app.NSR.Value == 1
        app.UAN.Value = 0;
        app.SGC.Value = 0;
    end
end

% Component initialization
methods (Access = private)

% Create UIFigure and components
function createComponents(app)

    % Get the file path for locating images
    pathToMLAPP = fileparts(mfilename('fullpath'));

    % Create UIFigure and hide until all components are created
    app UIFigure = uifigure('Visible', 'off');
    app UIFigure.Color = [0.9804 0.9804 0.9804];
    app UIFigure.Position = [100 100 1036 607];
    app UIFigure.Name = 'MATLAB App';

    % Create UIAxes
    app.UIAxes = uiaxes(app UIFigure);
    title(app.UIAxes, 'Mapa de riesgo sismico de Popayán en función de la deriva')
    zlabel(app.UIAxes, 'Z')
    app.UIAxes.FontSize = 14;
    app.UIAxes.Position = [296 21 708 543];

    % Create TextArea
    app.TextArea = uitextarea(app UIFigure);
    app.TextArea.FontColor = [1 1 1];
    app.TextArea.BackgroundColor = [0.9412 0.9412 0.9412];
    app.TextArea.Position = [1 0 280 607];

    % Create NSR
    app.NSR = ucheckbox(app UIFigure);
    app.NSR.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app, @NSRValueChanged, true);
    app.NSR.Text = 'NSR-10';
    app.NSR.WordWrap = 'on';
    app.NSR.Position = [212 330 75 28];

    % Create UAN
    app.UAN = ucheckbox(app UIFigure);
    app.UAN.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app, @UANValueChanged, true);
    app.UAN.Text = 'MS de UAN';
    app.UAN.WordWrap = 'on';
    app.UAN.Position = [119 330 85 28];

    % Create SGC
    app.SGC = ucheckbox(app UIFigure);
    app.SGC.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app, @SGCValueChanged, true);
    app.SGC.Text = 'MS de SGC';
    app.SGC.WordWrap = 'on';
    app.SGC.Position = [28 330 84 28];

    % Create PlanificacionCheckbox
    app.PlanificacionCheckbox = ucheckbox(app UIFigure);

```

```

        app.PlanificacionCheckbox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@PlanificacionCheckboxValueChanged, true);
        app.PlanificacionCheckbox.Text = 'Comportamiento bajo escenario sísmico de diseño';
        app.PlanificacionCheckbox.WordWrap = 'on';
        app.PlanificacionCheckbox.Position = [10 377 241 39];

        % Create RiesgoSismicoCheckbox
        app.RiesgoSismicoCheckbox = uicontrol(app.UIFigure);
        app.RiesgoSismicoCheckbox.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@RiesgoSismicoCheckboxValueChanged, true);
        app.RiesgoSismicoCheckbox.Text = 'Comportamiento bajo escenario sísmico específico ';
        app.RiesgoSismicoCheckbox.WordWrap = 'on';
        app.RiesgoSismicoCheckbox.Position = [10 273 239 35];

        % Create Button
        app.Button = uicontrol(app.UIFigure, 'push');
        app.Button.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @CalcularButtonPushed, true);
        app.Button.Icon = fullfile(pathToMLAPP, 'Calcular2.png');
        app.Button.IconAlignment = 'center';
        app.Button.BackgroundColor = [0.8706 0.8706 0.8706];
        app.Button.Position = [78 21 124 52];
        app.Button.Text = '';

        % Create SistemaestructuralLabel
        app.SistemaestructuralLabel = uicontrol(app.UIFigure);
        app.SistemaestructuralLabel.HorizontalAlignment = 'right';
        app.SistemaestructuralLabel.Position = [11 469 106 22];
        app.SistemaestructuralLabel.Text = 'Sistema estructural';

        % Create Estructura
        app.Estructura = uicontrol(app.UIFigure);
        app.Estructura.Items = {'Muros de mamposteria', 'Porticos'};
        app.Estructura.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app, @EstructuraValueChanged, true);
        app.Estructura.BackgroundColor = [1 1 1];
        app.Estructura.Position = [125 466 135 28];
        app.Estructura.Value = 'Porticos';

        % Create NivelesLabel
        app.NivelesLabel = uicontrol(app.UIFigure);
        app.NivelesLabel.HorizontalAlignment = 'right';
        app.NivelesLabel.Position = [72 436 44 22];
        app.NivelesLabel.Text = 'Niveles';

        % Create Estructura_2
        app.Estructura_2 = uicontrol(app.UIFigure);
        app.Estructura_2.Items = {'3', '5', '7', '10'};
        app.Estructura_2.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app, @Estructura_2ValueChanged,
true);
        app.Estructura_2.BackgroundColor = [1 1 1];
        app.Estructura_2.Position = [125 433 68 28];
        app.Estructura_2.Value = '3';

        % Create SagTerrazasAEditFieldLabel
        app.SagTerrazasAEditFieldLabel = uicontrol(app.UIFigure);
        app.SagTerrazasAEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
        app.SagTerrazasAEditFieldLabel.Position = [33 226 108 22];
        app.SagTerrazasAEditFieldLabel.Text = 'Sa (%) Terrazas A';

        % Create SagTerrazasAEditField
        app.SagTerrazasAEditField = uicontrol(app.UIFigure, 'numeric');
        app.SagTerrazasAEditField.Position = [154 228 84 20];

```

```

% Create SagColinasAEditFieldLabel
app.SagColinasAEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.SagColinasAEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.SagColinasAEditFieldLabel.Position = [38 197 102 22];
app.SagColinasAEditFieldLabel.Text = 'Sa (%g) Colinas A';

% Create SagColinasAEditField
app.SagColinasAEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.SagColinasAEditField.Position = [154 199 84 20];

% Create SagColinasBEditField
app.SagColinasBEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.SagColinasBEditField.Position = [154 170 84 20];

% Create SagColinasBEditFieldLabel
app.SagColinasBEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.SagColinasBEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.SagColinasBEditFieldLabel.Position = [36 169 103 22];
app.SagColinasBEditFieldLabel.Text = 'Sa (%g) Colinas B';

% Create SagTerrazasBEditFieldLabel
app.SagTerrazasBEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.SagTerrazasBEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.SagTerrazasBEditFieldLabel.Position = [32 142 109 22];
app.SagTerrazasBEditFieldLabel.Text = 'Sa (%g) Terrazas B';

% Create SagTerrazasBEditField
app.SagTerrazasBEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.SagTerrazasBEditField.Position = [154 143 84 20];

% Create SagPlaniciesAEditFieldLabel
app.SagPlaniciesAEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.SagPlaniciesAEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.SagPlaniciesAEditFieldLabel.Position = [30 113 110 22];
app.SagPlaniciesAEditFieldLabel.Text = 'Sa (%g) Planicies A';

% Create SagPlaniciesAEditField
app.SagPlaniciesAEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.SagPlaniciesAEditField.Position = [154 114 84 21];

% Create SagPlaniciesBEditField
app.SagPlaniciesBEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.SagPlaniciesBEditField.Position = [154 86 84 20];

% Create SagPlaniciesBEditFieldLabel
app.SagPlaniciesBEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.SagPlaniciesBEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.SagPlaniciesBEditFieldLabel.Position = [30 87 111 22];
app.SagPlaniciesBEditFieldLabel.Text = 'Sa (%g) Planicies B';

% Create TextArea_2
app.TextArea_2 = uitextarea(app.UIFigure);
app.TextArea_2.FontColor = [1 1 1];
app.TextArea_2.BackgroundColor = [0.0118 0.3608 0.6706];
app.TextArea_2.Position = [1 580 1037 28];

% Create MapadeRiesgoSsmicoenPopaynLabel
app.MapadeRiesgoSsmicoenPopaynLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.MapadeRiesgoSsmicoenPopaynLabel.FontName = 'Verdana';
app.MapadeRiesgoSsmicoenPopaynLabel.FontSize = 20;

```

```

app.MapadeRiesgoSsmicoenPopaynLabel.FontWeight = 'bold';
app.MapadeRiesgoSsmicoenPopaynLabel.FontColor = [1 1 1];
app.MapadeRiesgoSsmicoenPopaynLabel.Position = [27 581 419 27];
app.MapadeRiesgoSsmicoenPopaynLabel.Text = 'Mapa de Riesgo Sísmico en Popayán';

% Create UITable_2
app.UITable_2 = uitable(app.UIFigure);
app.UITable_2.ColumnName = {'Tipo C=Terrazas A'; 'Tipo D=Terrazas B Colinas A y B'; 'Tipo
E=Planicies'};
app.UITable_2.RowName = {'Deriva Max.'};
app.UITable_2.Position = [377 21 556 52];

% Create UITable
app.UITable = uitable(app.UIFigure);
app.UITable.BackgroundColor = [1 1 1;0.9412 0.9412 0.9412];
app.UITable.ColumnName = {'Terrazas A'; 'Colinas A'; 'Colinas B'; 'Terrazas B';
'Planicies'};
app.UITable.RowName = {'Deriva Max.'};
app.UITable.RowStriping = 'off';
app.UITable.Multiselect = 'off';
app.UITable.Position = [377 21 546 52];

% Create Label
app.Label = uilabel(app.UIFigure);
app.Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.Label.FontAngle = 'italic';
app.Label.FontColor = [0.502 0.502 0.502];
app.Label.Position = [68 254 170 22];
app.Label.Text = '';

% Create Image
app.Image = uiimage(app.UIFigure);
app.Image.Position = [801 116 173 131];

% Create RiesgossmicoenPopaynsegnmicrozonificacindelSGC2020Label
app.RiesgossmicoenPopaynsegnmicrozonificacindelSGC2020Label = uilabel(app.UIFigure);
app.RiesgossmicoenPopaynsegnmicrozonificacindelSGC2020Label.WordWrap = 'on';
app.RiesgossmicoenPopaynsegnmicrozonificacindelSGC2020Label.FontWeight = 'bold';
app.RiesgossmicoenPopaynsegnmicrozonificacindelSGC2020Label.Position = [20 540 256 35];
app.RiesgossmicoenPopaynsegnmicrozonificacindelSGC2020Label.Text = 'Riesgo sísmico en
Popayán según microzonificación del SGC (2020)';

% Create microzonificacindelSGC2020Label_2
app.microzonificacindelSGC2020Label_2 = uilabel(app.UIFigure);
app.microzonificacindelSGC2020Label_2.WordWrap = 'on';
app.microzonificacindelSGC2020Label_2.Position = [14 501 241 30];
app.microzonificacindelSGC2020Label_2.Text = 'Edificios prototipo diseñados con una
deriva de 1% en suelo tipo D de la NSR-10';

% Create microzonificacindelSGC2020Label_3
app.microzonificacindelSGC2020Label_3 = uilabel(app.UIFigure);
app.microzonificacindelSGC2020Label_3.WordWrap = 'on';
app.microzonificacindelSGC2020Label_3.FontName = 'Verdana';
app.microzonificacindelSGC2020Label_3.FontSize = 10;
app.microzonificacindelSGC2020Label_3.Position = [763 0 274 22];
app.microzonificacindelSGC2020Label_3.Text = 'Realizado por: Anderson Ortiz, Ana Maria
Rodriguez';

% Create microzonificacindelSGC2020Label_4
app.microzonificacindelSGC2020Label_4 = uilabel(app.UIFigure);
app.microzonificacindelSGC2020Label_4.WordWrap = 'on';

```

```

app.microzonificacindelSGC2020Label_4.Position = [31 356 241 22];
app.microzonificacindelSGC2020Label_4.Text = 'Factores Fa y Fv provenientes de:';

% Create MSdelSGC2020Label_5
app.MSdelSGC2020Label_5 = uilabel(app.UIFigure);
app.MSdelSGC2020Label_5.WordWrap = 'on';
app.MSdelSGC2020Label_5.FontSize = 10;
app.MSdelSGC2020Label_5.Position = [754 86 222 25];
app.MSdelSGC2020Label_5.Text = 'Mapa de Popayán tomado de Diaz et. al. (2020)
Zonificación de respuesta sísmica de Popayán';

% Show the figure after all components are created
app.UIFigure.Visible = 'on';
end
end

% App creation and deletion
methods (Access = public)

% Construct app
function app = Interfaz_tesis2

% Create UIFigure and components
createComponents(app)

% Register the app with App Designer
registerApp(app, app.UIFigure)

% Execute the startup function
runStartupFcn(app, @startupFcn)

if nargin == 0
    clear app
end
end

% Code that executes before app deletion
function delete(app)

% Delete UIFigure when app is deleted
delete(app.UIFigure)
end
end
end

```