

Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat (ANIH)
Trabajo de Incorporación Académica (TIA)

Michael Schmitz¹
(Candidato a Miembro Correspondiente Extranjero)

**Aportes de la Microzonificación Sísmica para la Mitigación del Riesgo Sísmico en Venezuela –
Avances y Desafíos²**

Resumen

Se reportan los avances de los estudios de microzonificación sísmica en Venezuela y se discuten los aportes que pueden dar dichos estudios para la mitigación del riesgo sísmico en el país. Un alto porcentaje de la población venezolana se encuentra asentada en zonas de alta amenaza sísmica, como se evidenció en los terremotos de Caracas de 1967 y Cariaco 1997, donde se observaron daños por efectos de sitio (amplificación de las ondas sísmicas) y efectos inducidos (efectos geológicos como licuación del suelo, deslizamientos o ruptura de falla en superficie). Los estudios de microzonificación sísmica permiten identificar zonas de respuesta similar al movimiento sísmico con el fin de poder ajustar el diseño sísmico de los edificios a los diferentes escenarios dentro de las ciudades y tomar decisiones más acertadas sobre las edificaciones existentes, así como sobre el uso de la tierra para la planificación urbana.

En Venezuela se realizaron estudios de microzonificación sísmica en diferentes ciudades del país con variable estado de avance. Si bien en las áreas metropolitanas de Caracas y Barquisimeto, así como en Carora, se finalizaron los estudios, se encontraron dificultades al momento de la aprobación de ordenanzas municipales en complemento de las indicaciones de la norma de Construcciones Sismorresistentes COVENIN 1756-1 (COVENIN, 2019). Aun cuando dichas ordenanzas estén disponibles para todos los municipios, una eficiente mitigación de los efectos de los terremotos requiere de la puesta en práctica de sus indicaciones a través de planes municipales de gestión del riesgo sísmico.

Otras ciudades, como las áreas metropolitanas de Cumaná, Barcelona, Guarenas-Guatire, Maracay, Valencia y Mérida, entre otras, cuentan con estudios avanzados de la configuración del subsuelo, pero no se han finalizado las evaluaciones de la respuesta sísmica en superficie de las diferentes microzonas sísmicas identificadas. Esto dificulta el uso eficiente de esta información, por lo cual se enfatiza en la necesidad de su finalización y posterior implementación en ordenanzas municipales y planes de gestión del riesgo.

1 Profesor e investigador, Universidad Simón Bolívar - USB, Universidad Central de Venezuela – UCV, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas – FUNVISIS (jubilado), Caracas, Venezuela. E-mail: schmitzschutt@gmail.com

2 Trabajo de Incorporación Académica (TIA) ante la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat (ANIH), como requisito parcial para optar a su incorporación como Miembro Correspondiente Extranjero.

Dedicatoria

Le dedico este trabajo a la memoria del Ing. Enrique Gajardo, quien me ha impulsado hacia la aplicación de la microzonificación sísmica en Venezuela, así como a la memoria de mi gran amigo Dr. Jesús Delgado, quien me ha acompañado en las evaluaciones de los edificios e interacciones con las alcaldías.

Un agradecimiento muy especial va al Ing. Julio J. Hernández, quien ha diseñado la metodología utilizada en los proyectos de microzonificación sísmica y quien ha participado ampliamente en su ejecución.

Por último, quiero agradecer al grupo grande de profesionales y estudiantes de los equipos de trabajo de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y de varias universidades nacionales e internacionales – sin ellos no hubiera sido posible realizar los proyectos.

Índice

Contenido	Página
1 INTRODUCCIÓN	547
1.1 JUSTIFICACIÓN	547
1.2 MOTIVACIÓN	547
1.3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	550
1.4 METODOLOGÍA EMPLEADA	550
1.4.1 Fase I: Revisión y Documentación de la Microzonificación Sísmica	550
1.4.2 Fase II: Evaluación de la Implementación e Impacto en la Mitigación del Riesgo	551
1.4.3 Fase III: Identificación de Desafíos y Limitaciones	551
1.4.4 Fase IV: Conclusiones	551
2 FUNDAMENTOS DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA	551
2.1 DEFINICIÓN Y PROPÓSITO	551
2.2 METODOLOGÍA	553
2.2.1 Amenaza sísmica en roca	553
2.2.2 Evaluación geológica y geomorfológica	554
2.2.3 Evaluación geotécnica	555
2.2.4 Evaluación geofísica somera	555
2.2.5 Evaluación geofísica profunda	556
2.2.6 Espectros de respuesta	557
2.2.7 Determinación de microzonas sísmicas	559
2.2.8 Aplicación en la gestión del riesgo	560
3 AMENAZA SÍSMICA EN VENEZUELA	561
3.1 CARACTERÍSTICAS TECTÓNICAS DEL PAÍS	561
3.2 SISMICIDAD	563
3.3 AMENAZA SÍSMICA	564
4 MARCO LEGAL E INSTITUCIONAL	566
4.1 NORMATIVAS Y POLÍTICAS DE GESTIÓN DEL RIESGO	566
4.2 ORGANISMOS RESPONSABLES	567
4.3 INTEGRACIÓN DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN EL ENTORNO NORMATIVO Y EN LA PLANIFICACIÓN URBANA	567
5 AVANCES DE PROYECTOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA	568
5.1 ÁREA METROPOLITANA DE CARACAS	568
5.2 ÁREA METROPOLITANA DE BARQUISIMETO -CABUDARE	572
5.3 CARORA Y OTRAS CIUDADES EN EL ESTADO LARA (EL TOCUYO, QUÍBOR, DUACA)	579
5.4 CUMANÁ Y CIUDADES EN EL ESTADO SUCRE (CARÚPANO, CARIACO)	587
5.5 CIUDADES EN EL MARCO DEL PROYECTO GESTIÓN INTEGRAL DEL RIESGO EN ESPACIOS URBANOS	595
5.5.1 Área Metropolitana de Valencia	596
5.5.2 Área Metropolitana de Maracay	598
5.5.3 Área Metropolitana de Barcelona	601
5.5.4 Área Metropolitana de Mérida (más San Juan y Lagunillas)	604
5.5.5 Valle de la Pascua	607
5.5.6 Ciudades en el estado Trujillo (Valera, Trujillo, Boconó)	608

5.5.7	<i>Ciudades en el estado Táchira (San Cristóbal, San Antonio del Táchira, Ureña, Michelena, Lobatera y Rubio).....</i>	612
5.5.8	<i>La Guaira y Ciudad Caribia</i>	615
5.5.9	<i>Guarenas-Guatire</i>	618
6	DESAFÍOS Y LIMITACIONES	621
6.1	FINALIZACIÓN O ACTUALIZACIÓN DE ESTUDIOS	621
6.2	RETOS EN LA IMPLEMENTACIÓN NORMATIVA	621
6.3	RESULTADOS Y APLICACIONES PRÁCTICAS	622
6.4	TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	623
7	IMPACTO EN LA MITIGACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO	624
7.1	CONTENIDO DE LAS ORDENANZAS MUNICIPALES	624
7.2	EVALUACIÓN SÍSMICA Y PROPUESTAS DE MITIGACIÓN	625
7.3	PARTICIPACIÓN COMUNITARIA Y EDUCACIÓN SÍSMICA.....	627
8	CONCLUSIONES	628
8.1	APORTES CLAVE DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA.....	628
8.2	REFLEXIÓN FINAL SOBRE LOS AVANCES Y DESAFÍOS	628
9	REFERENCIAS.....	629

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Por su ubicación en el límite de las placas del Caribe y de Suramérica, gran parte del norte de Venezuela está sujeto a una moderada a alta amenaza sísmica, proveniente de las fallas tectónicas y la sismicidad asociada, la cual se ve reflejada en los mapas de zonificación sísmica de la norma COVENIN 1756-1 vigente (COVENIN, 2019). Los referidos mapas representan los movimientos sísmicos en roca; sin embargo, las ondas sísmicas pueden sufrir modificaciones importantes en amplitud, duración y contenido de frecuencias cuando llegan a la superficie, en especial si se trata de cuencas sedimentarias, situación en la cual se ubican la mayoría de las ciudades en Venezuela y otras partes del mundo.

La metodología aplicada en los proyectos de microzonificación sísmica contempla la evaluación del peligro sísmico en roca y la respuesta en superficie. En estos estudios se integra la información existente del subsuelo con los resultados de nuevas mediciones geofísicas y evaluaciones geológicas y geotécnicas en campo. Para la respuesta en superficie de las diferentes situaciones evaluadas se desarrollan perfiles para el cálculo de la respuesta dinámica mediante análisis lineal equivalente, tomando en cuenta la calidad del suelo somero (V_{s30}) y del espesor de los sedimentos hasta el basamento sísmico (H); con esta información se definen las microzonas de similar respuesta sísmica (Hernández et al., 2006). Dependiendo de las condiciones locales se estudia además el peligro de deslizamiento de laderas provocado por el terremoto, el peligro de licuación del suelo y las deformaciones permanentes asociados a la ruptura de fallas en superficie. Los resultados finales de los estudios de microzonificación sísmica se implementan en ordenanzas municipales y planes de gestión del riesgo sísmico para su mitigación.

El análisis de la amenaza sísmica con efectos de sitio y análisis de recurrencia de intensidades en Caracas, que sugiere que un futuro sismo de probable ocurrencia tendría intensidad entre VII y VIII en la escala macrosísmica europea (EMS-98; Grünthal, 2003) y podría ocurrir entre 2024 y 2060 con expectación hacia 2045 (Hernández y Schmitz, 2023), evidenció la necesidad de emprender un esfuerzo de mitigación del riesgo sísmico que bien puede durar dos décadas. Para ello deben priorizarse el tipo de construcciones y las zonas a atender, tal como se indican en dicho estudio. La potencial cercanía en tiempo de un terremoto destructor para Caracas – y en otras partes del país la situación podrá ser similar – requiere tomar acciones que permitan la mitigación del riesgo sísmico. La Microzonificación sísmica es una de las herramientas que impulsan, a través de la implementación de sus resultados, dicha mitigación

1.2 Motivación

Sitios con espesores grandes de suelo, como cuencas sedimentarias en las cuales se asientan muchas ciudades, son sujetos a amplificación del movimiento del terreno en comparación con los sitios en roca (e.g. Aki, 1993). Estas modificaciones de las ondas sísmicas por las condiciones geológicas se ven influenciadas por la forma y el contenido de las cuencas sedimentarias, es decir, el espesor sedimentario, las velocidades de propagación de las ondas sísmicas (sobre todo las ondas de corte), tanto en la parte somera (e.g. Boore, 2004), como profunda. Para estimar las características de las cuencas, y con ello los efectos de sitio, se

pueden utilizar diferentes métodos geofísicos, entre los cuales destacan los métodos sísmicos, gravimétricos y métodos que aprovechan las vibraciones ambientales o microtemores (e.g. Nakamura, 1989; Bard, 1999; Louie, 2001).

El espesor de los sedimentos cuaternarios (H) y sus parámetros (velocidades de onda de corte - Vs), así como como la calidad del suelo somero (Vs30 - la velocidad promedio de las ondas de corte en los primeros 30 m), que afecta significativamente la respuesta sísmica, son la base para la evaluación de las respuestas sísmicas en superficie y la construcción de espectros de diseño, mediante análisis de sitio, ajustados a las diferentes microzonas sísmicas de una ciudad.

Como precursores de la microzonificación sísmica en Venezuela pueden considerarse los estudios realizados posteriores al terremoto de 1967 debido a la concentración de los daños en la cuenca (Los Palos Grandes-Altamira y San Bernardino en Caracas, al igual que Caraballeda en el Litoral). Mediante investigaciones sísmicas posteriores al sismo se pudo determinar la profundidad de los sedimentos en el valle de Caracas con 300 m en Los Palos Grandes y 120 m en San Bernardino (Murphy et al., 1969). Se determinó la importancia de la relación entre la altura de los edificios y los períodos fundamentales de suelos, que alcanzan 1.6 en la parte más profunda del valle, afectando edificios de más de 14 pisos (Seed et al., 1970; Seed y Alonso, 1974), derivando en una primera microzonificación sísmica de Caracas (Alonso, 1975; Alonso y Larotta, 1977), de Mérida (Alonso, 1976) y de Caraballeda (1978).

Estudios piloto de microzonificación sísmica se realizaron entre 1992 y 1994 en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM) en colaboración entre FUNVISIS, PDVSA-INTEVEP y el CETE-Méditerranée de Nice (Francia) (e.g. CETE Méditerranée, 1993; Duval et al., 1995). Estos estudios se centraron en áreas como Tía Juana y Lagunillas y tuvieron como objetivo principal calibrar un método experimental para evaluar la respuesta dinámica del suelo frente a terremotos, además de localizar los riesgos sísmicos. El propósito principal fue validar un nuevo método experimental (método de Nakamura) y de modelajes numéricos de los efectos locales para la microzonificación sísmica e identificar los riesgos derivados de terremotos, incluyendo efectos de sitio y secundarios.

A raíz del Seminario para conmemorar el 30 aniversario del terremoto de Caracas de 1967 llegaron en 1997 investigadores de Francia y del Japón a Venezuela y realizaron mediciones de ruido ambiental. Para Caracas determinaron que los periodos más largos coincidían con las zonas de mayor acumulación de sedimentos (1-1,6 s en Los Palos Grandes), mientras los periodos bajaron a 0,2 s en roca (Abeki et al., 1998a; Duval et al., 1998), aunque los valores de máxima amplificación no coinciden directamente con los periodos máximos, fenómeno atribuido a la influencia de la geometría del basamento.

En Cumaná se realizaron posterior al sismo de Cariaco de 1997 mediciones de ruido ambiental (Abeki et al., 1998b), pudiendo correlacionarse los periodos predominantes mayores a 1 s con los sedimentos deltaicos del río Manzanares y los depósitos marinos costeros. Debido al gran volumen de daños se realizaron en Cariaco mediciones de ruido ambiental (Masaki et al., 1999); los períodos predominantes reportados varían desde valores de 0,1 s en la parte rocosa hasta valores de 0,4 s en la parte norte de la cuenca. Mediante mediciones sísmicas de refracción se determinó un espesor mínimo de sedimentos blandos

del orden de 45 m en Cariaco (González et al., 1999) y espesores de sedimentos de 2500 m en Cariaco, disminuyendo hacia Casanay al este (e.g. Schmitz et al., 2005). Mediante 12 perforaciones geotécnicas hasta 22 m de profundidad se determinó la naturaleza del subsuelo como suelos blandos degradables sísmicamente saturados con alto potencial de licuación (De Santis y Hernández, 1999); estos estudios fueron referidos en Audemard et al. (2000a) como aportes de FUNVISIS a la evaluación de la amenaza sísmica.

Posteriormente, en Venezuela se realizaron estudios de microzonificación sísmica en varias ciudades, de los cuales destacan los siguientes: en los años 2005-2010 se realizó el “Proyecto de Microzonificación Sísmica en las Ciudades Caracas y Barquisimeto”, cuyos resultados finales han sido implementados en ordenanzas municipales en Caracas y Barquisimeto (Rodríguez et al., 2005; Reinoza et al., 2011; Schmitz et al., 2009a, 2009b, 2020a; 2020b; 2023a). En la región centro-occidental se adelantaron además estudios en las ciudades Carora, El Tocuyo, Quíbor y Duaca en el marco del proyecto de microzonificación sísmica en el estado Lara (Ávila et al., 2014; Schmitz et al., 2023b). En el año 2006 se inició el proyecto Investigación Aplicada a la Gestión del Riesgo en Espacios Urbanos en las áreas metropolitanas de Mérida, Valencia, Maracay y Barcelona, así como en Valle de La Pascua. Los resultados parciales han sido utilizados en la planificación urbana y se espera terminar el desarrollo de los espectros en superficie refinados en comparación con los normativos, que conducen a una más precisa estimación de los efectos esperados, y por tanto una confiable herramienta para la mitigación del riesgo sísmico (Schmitz et al., 2015).

En Cumaná se realizaron desde el año 2008 estudios en el marco del Proyecto de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Cumaná (Aray et al., 2015) y en Guarenas-Guatire desde el mismo año en el marco de los proyectos de microzonificación sísmica de la Cooperación Cuba-Venezuela (González et al., 2009). Desde el año 2011 se realizan estudios en Trujillo, Valera y Boconó en el marco del Proyecto de Microzonificación Sísmica del estado Trujillo (Mazuera et al., 2015). Además, se lograron avances en las ciudades Carúpano (Acosta et al., 2021), Cariaco (González et al., 2004), Lagunillas (Guillen, 2016) y San Juan (Rodríguez y Sánchez, 2016) en el estado Mérida, San Cristóbal (Durán, 2015), Rubio (Cárdenas et al., 2015), Lobatera y Michelena (Molina, 2016), San Antonio y Ureña (Molina et al., 2015) en el estado Táchira.

Los resultados de los proyectos de microzonificación sísmica podrían contribuir considerablemente a la mitigación del riesgo sísmico si son tomados en cuentas en el diseño de nuevas construcciones y su ubicación dentro de la ciudad (planificación urbana), así como en la evaluación y eventual reforzamiento sismorresistente de edificaciones existentes. Para ello, se requiere por un lado su finalización con espectros de diseño en las diferentes microzonas (existen varios proyectos en Venezuela a la espera de esta última fase), así como su implementación en ordenanzas municipales en complemento de las indicaciones de la norma de Construcciones Sismorresistentes COVENIN 1756-1 (COVENIN, 2019). Hasta la fecha se han aprobado ordenanzas en los municipios Iribarren y Palavecino del Área Metropolitana de Barquisimeto, así como Libertador, El Hatillo y Sucre del Área Metropolitana de Caracas. La eficiente mitigación de los efectos de los terremotos se lograría con la puesta en marcha de planes de gestión del riesgo sísmico que se basan en los detalles de la microzonificación sísmica y permitirían la definición de planes de evaluación y eventual reforzamiento sismorresistente de las edificaciones existentes.

1.3 Objetivos generales y específicos

El objetivo general del trabajo es la evaluación de los avances de los estudios de microzonificación sísmica realizados en Venezuela y su contribución a la mitigación del riesgo sísmico a nivel nacional, analizando los avances logrados en su implementación y los desafíos pendientes para su aplicación efectiva y extensión a otras ciudades.

Para lograr este objetivo, se debe revisar y documentar la metodología y los resultados clave de los principales estudios de microzonificación sísmica realizados en áreas urbanas venezolanas de alta amenaza sísmica e identificar los mecanismos y normativas a través de los cuales los resultados de la microzonificación sísmica han sido incorporados en los planes de ordenación territorial, ordenanzas municipales y en las estrategias de gestión del riesgo en Venezuela.

Asociado a ello se deben revisar los mecanismos para la generación de planes de gestión del riesgo que se basan en los estudios de microzonificación sísmica realizados. Existe un cúmulo de información sobre la vulnerabilidad de edificaciones con sus respectivos planes de reforzamiento sismorresistente, en específico edificaciones escolares, cuyo reforzamiento sismorresistente podría gestionarse en el marco de la aplicación de los resultados de la microzonificación sísmica.

Para poder evaluar el éxito de los programas, se debe determinar el impacto percibido de la aplicación de la microzonificación sísmica en la reducción de la vulnerabilidad estructural y el riesgo en las zonas estudiadas y analizar los obstáculos técnicos, económicos, institucionales, políticos y sociales que limitan la ejecución, actualización y ampliación de los estudios de microzonificación sísmica a otras áreas críticas del país.

Se deberán proponer recomendaciones estratégicas para superar los desafíos identificados, buscando fortalecer el rol de la microzonificación sísmica como herramienta fundamental en la mitigación del riesgo sísmico en Venezuela.

1.4 Metodología empleada

La metodología empleada consiste en un análisis, estructurado en cuatro fases interrelacionadas de: 1) Revisión y documentación de la microzonificación sísmica, 2) Evaluación de la Implementación e Impacto en la Mitigación del Riesgo, 3) Identificación de Desafíos y Limitaciones, 4) Conclusiones.

1.4.1 Fase I: Revisión y Documentación de la Microzonificación Sísmica

Esta fase se centra en la recopilación de la información sobre los estudios de microzonificación sísmica realizados en Venezuela, liderados por FUNVISIS, las universidades nacionales y otras instituciones. Se identifican los estudios realizados, sus alcances en la ejecución y los productos generados. Se realiza un análisis detallado de la

metodología aplicada en cada estudio (geofísica, geotécnica, determinación de Vs30, uso de H/V), los mapas de zonificación generados (isoperíodos, aceleraciones) y sus principales resultados (espectros). En los productos se revisan los informes, tesis, publicaciones, entre otros.

1.4.2 Fase II: Evaluación de la Implementación e Impacto en la Mitigación del Riesgo

En esta fase se analiza cómo los resultados de la microzonificación han sido integrados en la práctica de la gestión del riesgo sísmico y su impacto. Se revisa la norma de Construcciones Sismorresistentes COVENIN 1756-1 (COVENIN, 2019) con las implicaciones respecto al uso de la microzonificación sísmica con sus implicaciones jurídicas. Se indaga sobre la aplicación real de la microzonificación en el diseño de proyectos y en la toma de decisiones de ordenamiento urbano, reforzamiento estructural (por ejemplo: edificaciones escolares; López et al., 2015) y otras edificaciones (López y Coronel, 2024) en el marco de la gestión del riesgo.

1.4.3 Fase III: Identificación de Desafíos y Limitaciones

Esta fase busca determinar los obstáculos que impiden la aplicación efectiva de los resultados y la realización de estudios de la microzonificación sísmica en otras ciudades a nivel nacional. Se comparan los logros en la implementación de los resultados de los estudios de microzonificación sísmica con lo alcanzado en otros países de la región.

1.4.4 Fase IV: Conclusiones

Basado en la síntesis de la información se formulan las conclusiones y las recomendaciones, con propuestas concretas y viables, dirigidas a fortalecer la actualización, financiación e implementación de estudios de microzonificación sísmica en el marco de la Gestión del Riesgo Sísmico en Venezuela.

2 FUNDAMENTOS DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

2.1 Definición y propósito

Los estudios de microzonificación sísmica son una herramienta fundamental en la mitigación del riesgo sísmico en áreas urbanas o zonas metropolitanas. Es el proceso de dividir un área geográfica, en zonas más pequeñas (microzonas) que presentan un comportamiento similar ante la ocurrencia de un sismo. El propósito principal es proporcionar información detallada y validada mediante modelos científicos para reducir la vulnerabilidad y mitigar el riesgo sísmico considerando la planificación y el diseño sismorresistente de las construcciones.

Se basa en estudios multidisciplinarios que combinan la geología, la geofísica, la sismología y la ingeniería geotécnica y sismorresistente para caracterizar el subsuelo y su respuesta sísmica en caso de un terremoto. El primer paso es la evaluación de la amenaza sísmica en roca en la zona de estudio. Para poder definir cuánto se amplificaría la vibración del suelo en

cada sector específico de la ciudad en comparación con el estrato rocoso (lo que se llama los "efectos de sitio") se debe estudiar la geología y geomorfología, la topografía, investigar el subsuelo mediante la aplicación de perforaciones geotécnicas y estudios geofísicos, y modelar el comportamiento de las ondas sísmicas para obtener la respuesta en superficie de cada zona específica determinada durante el estudio. Adicionalmente, se determinan los efectos geológicos o inducidos (licuación del suelo, deslizamientos o ruptura de falla en superficie) basados en la amenaza sísmica local.

De esta manera, se puede proveer los parámetros de diseño específicos para cada microzona (espectros de respuesta de aceleración de diseño, factor de amplificación). Esto permite a los ingenieros diseñar estructuras que no entren en resonancia con el período predominante del suelo, lo cual es vital para su seguridad.

Esta información puede ser usada en la planificación urbana y la ordenación territorial (Figura 1) al suministrar información crítica para establecer restricciones de uso del suelo o exigir requisitos de construcción más rigurosos en las microzonas de mayor peligro (donde la amplificación es alta). Igualmente se puede guiar la ubicación de infraestructura vital (hospitales, escuelas, etc.) en las zonas de mejor comportamiento sísmico.

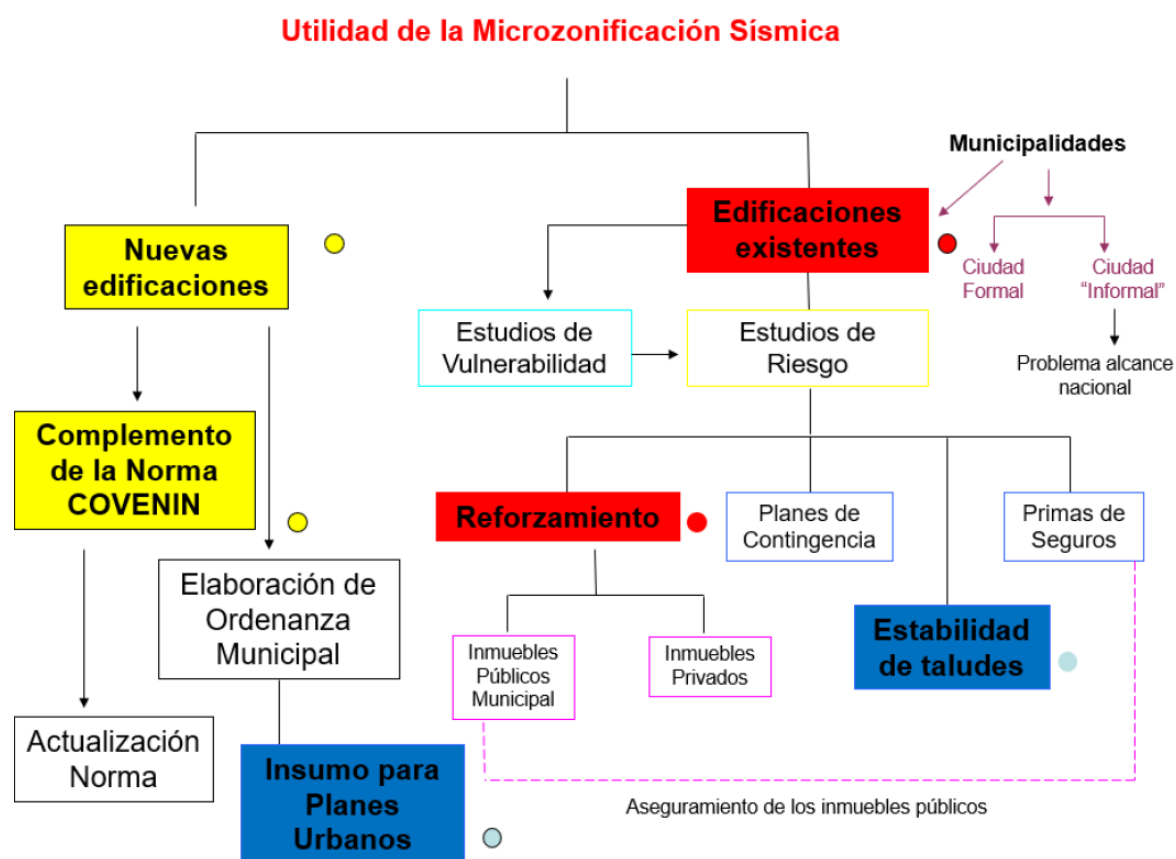


Figura 1. Esquema de uso de los resultados de estudios de microzonificación sísmica para la mitigación del riesgo sísmico (Schmitz et al., 2020a).

Los resultados de la microzonificación sísmica pueden ser utilizados en la preparación para emergencias como insumo fundamental para la evaluación del riesgo sísmico (cálculo de pérdidas humanas y materiales) en una ciudad. Permiten la elaboración de escenarios de daños (mapas de intensidad y daños probables) necesarios para la planificación de la respuesta a desastres y los planes de evacuación.

Los resultados se presentan en mapas que muestran la respuesta sísmica esperada y el potencial de la ocurrencia de efectos inducidos en las diferentes zonas de la ciudad. Para las diferentes microzonas sísmicas se elaboran las recomendaciones para el diseño.

Aunque la nomenclatura exacta puede variar ligeramente entre países y normativas, la guía elaborada por las regiones y provincias autónomas de Italia (Bramerini et al., 2015 – en su versión en italiano de 2008), impulsado por una ley nacional posterior al terremoto de los Abruzzos en 2009, puede servir de orientación.

2.2 Metodología

La metodología utilizada en los estudios de microzonificación sísmica se refiere a las diferentes partes de los estudios, tales como la evaluación de la amenaza sísmica en roca, las características del suelo desde el punto de vista geológico, geofísico y geotécnico (lo que incide en las características de las vibraciones en superficie, su potencial amplificación de las vibraciones por efectos de sitio y la ocurrencia de efectos inducidos como licuación del suelo o deslizamientos) y la metodología para evaluar la respuesta sísmica en superficie y su delimitación en microzonas de similar respuesta sísmica. En líneas generales, los estudios de microzonificación sísmica realizados en Venezuela recientemente han seguido la metodología propuesta por Hernández et al. (2006) para los estudios en las ciudades de Caracas y Barquisimeto, en la cual se hace énfasis también en el uso de la información para la gestión del riesgo y el refuerzo estructural. A continuación, se identifican los detalles para cada parte de los estudios con ejemplos de los estudios realizados en Caracas, resumidos en Schmitz y Singer (2015).

2.2.1 Amenaza sísmica en roca

La amenaza sísmica en roca se establece comúnmente mediante un estudio probabilístico de amenaza sísmica (PSHA - Probabilistic Seismic Hazard Assessment) siguiendo las indicaciones de Esteva (1967) y Cornell (1968). Para ello se analizan las fuentes sísmicas y se condensa la información en un modelo sismogénico (Hernández, 2009a), basado en evaluaciones neotectónicas y paleosísmicas para las fallas activas y un análisis espacio-temporal de la sismicidad, incluyendo sismos históricos e instrumentales (registrados con equipos sismológicos desde 1900).

Una vez determinadas las fuentes sísmicas, se evalúan los patrones de atenuación de las ondas sísmicas desde la fuente hasta el sitio. Como resultado se obtienen estimados de las tasas de ocurrencias de diversos eventos sísmicos (en términos de aceleraciones pico y aceleraciones espectrales) con valores del período medio de retorno (PMR) asociados a las acciones de diseño y el tipo de construcción aplicando programas como EZFRISK (RISK ENGINEERING, 1998) o EASP (Hernández, 2007).

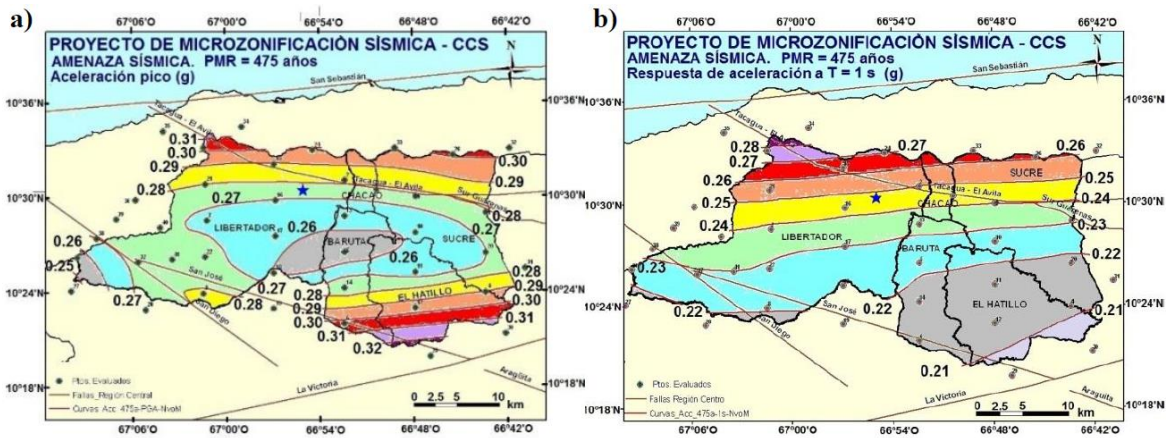
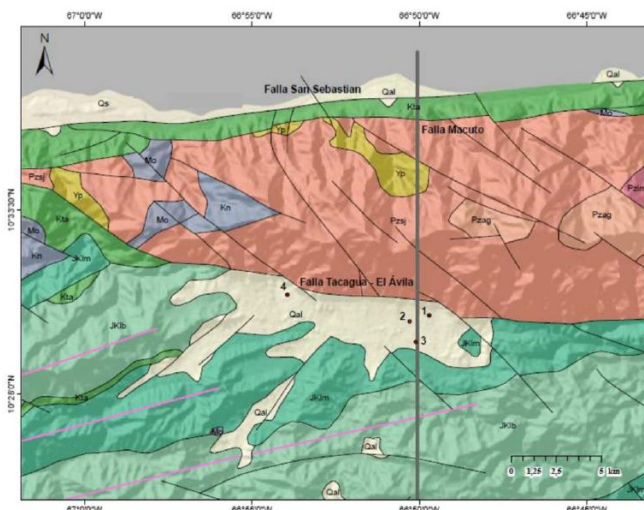


Figura 2. Amenaza sísmica en roca, PMR = 475 años, para Caracas: a) A0; b) A1. Los círculos indican los lugares de la evaluación. La estrella azul representa el centro de Caracas (Hernández y Schmitz, 2023).

Partiendo del mapa de amenaza sísmica realizado para la norma COVENIN 1756 (COVENIN, 2001), en el marco del proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas se calculó la amenaza sísmica regional (Hernández et al., 2009), la cual fue actualizada aplicando un nuevo modelo sismogénico y modernas relaciones de atenuación (Hernández y Schmitz, 2023). En la Figura 2 se muestra la amenaza sísmica en roca de Caracas para PMR = 475 años, correspondientes a A0 y A1.

2.2.2 Evaluación geológica y geomorfológica

El primer paso de evaluación del subsuelo en la microzonificación es el estudio de la geología y geomorfología del lugar, siendo en muchos casos la diferencia entre la roca y los sedimentos cuaternarios de primer orden para la respuesta sísmica. En Caracas se han realizado evaluaciones de la geología desde los primeros mapas (e.g. Dengo, 1951) hasta los más recientes (Figura 3).



Unidades geológicas (de joven a viejo): Qal = Pleistoceno a Holoceno; sedimentos aluviales, Qs = sedimentos del Pleistoceno, Kn = complejo Nirgua, Kta = esquisto de Tacagua y mármol Antímano, JKlm = esquisto de Las Mercedes, JKlb = esquisto de Las Brisas, Mo = rocas ultramáficas, Pzsj = complejo San Julián, Pzag = asociación metamórfica de Ávila, rocas metagraníticas, Pzim = asociación metamórfica de Ávila, intermedia a rocas metaplutónicas máficas, Yp = Asociación metamórfica de Ávila, Peña de Mora augengneiss.

Figura 3. Mapa geológico del valle aluvial de Caracas, rodeado de afloramientos de rocas metamórficas (Schmitz et al., 2020a; modificado de Hackley et al., 2006).

Para el valle aluvional de Caracas se elaboró un mapa con las unidades geológicas y fallas cuaternarias a escala 1:25.000 basado en evaluaciones fotogeológicas de misiones de los años 1936-1938, así como observaciones de campo efectuadas en unas 250 excavaciones sobre las características depositacionales. Se utilizó la información litoestratigráfica del banco de datos geotécnicos (Feliziani et al., 2004) para mayor diferenciación de los diferentes cuerpos sedimentarios identificados (Singer et al., 2007; 2023; Figura 4). Esta definición de las diferentes unidades sedimentológicas ha sido utilizada para la delimitación detallada de las microzonas sísmicas, basada en los valores de Vs30.

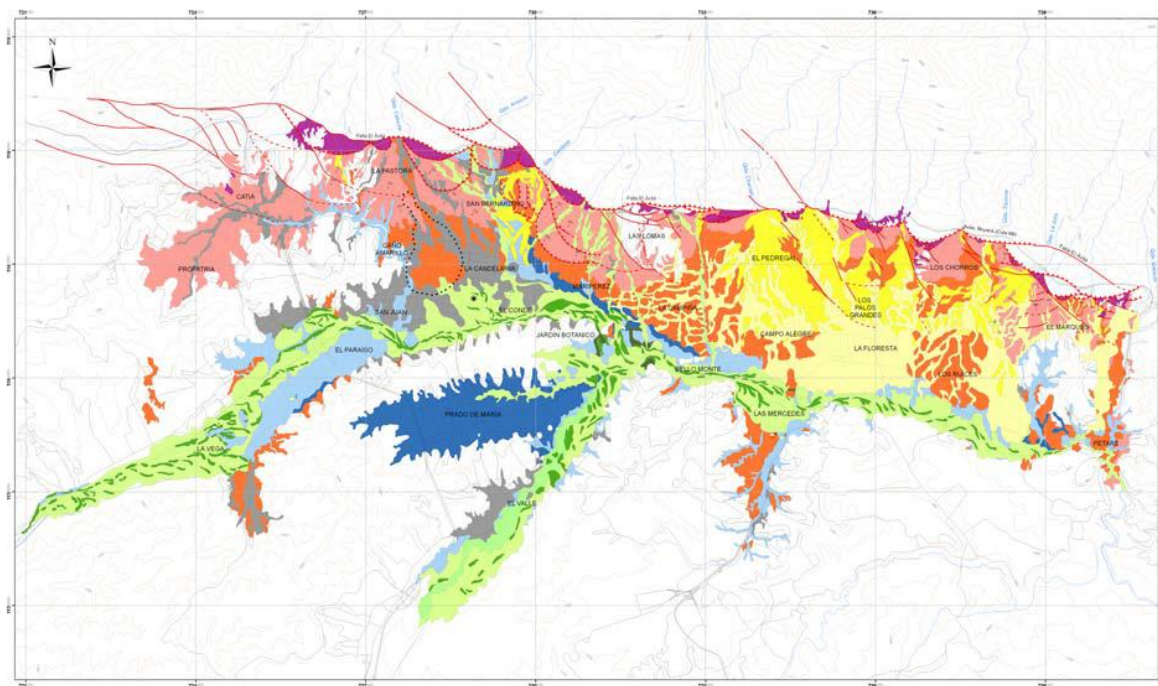


Figura 4. Unidades geológicas y fallas cuaternarias del valle de Caracas (leyenda ver: Singer et al., 2007).

2.2.3 Evaluación geotécnica

La información del banco de datos geotécnicos (Feliziani et al., 2004) fue utilizada en Caracas para la evaluación de los valores Vs30 dentro del valle aluvional. Con el fin de generar un mapa de velocidades de ondas de corte en los primeros 30 m (Vs30) se aplicó la ecuación de ajuste de la NEHRP (BSSC, 2003; fórmula 1), que convierte los de número de golpes (SPT) de los ensayos geotécnicos a valores Vs, a unas 1000 perforaciones geotécnicas.

$$V_s = 37.86 * N^{0.5757} \quad (1)$$

Los valores obtenidos mediante la conversión de SPT a VS fueron calibrados con mediciones geofísicas.

2.2.4 Evaluación geofísica somera

Para las calibraciones de Vs30 se aplicaron 21 mediciones de refracción sísmica, 16 análisis de ondas superficiales tipo de SASW y 13 mediciones sísmicas de pozos con crosshole y downhole (Kantak et al. 2005; Campos et al., 2004; Morales, 2006; García et al., 2006;

Flores, 2006). Para incluir las zonas de laderas, se utilizó una aproximación del valor Vs30 según los valores de la pendiente topográfica (Allen y Wald, 2009), a la cual se aplicó un ajuste (Morales et al., 2011). Los valores Vs30 se ubican en un rango de 185-325 m/s en gran parte del valle, con valores superiores a 325 m/s en el oeste y en partes del este del valle, así como en las zonas de ladera (Figura 5).

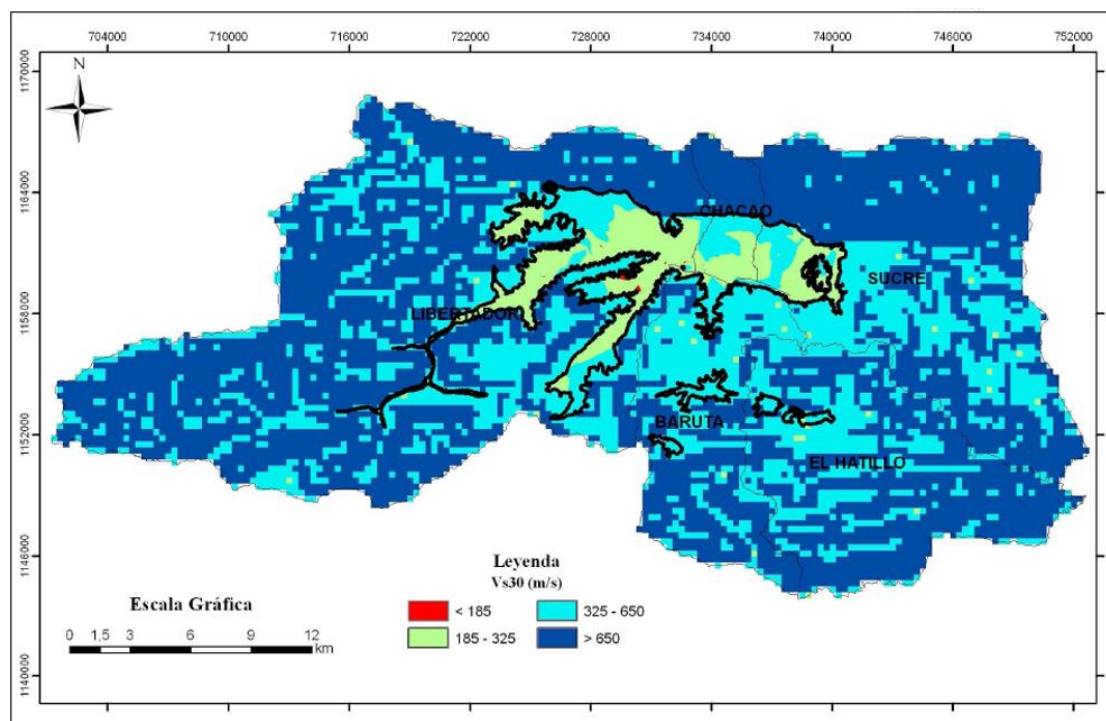


Figura 5. Mapa de Vs30 de Caracas (Morales et al., 2011); la línea negra delimita el área de sedimentos aluviales.

2.2.5 Evaluación geofísica profunda

Los primeros estudios que permitieron estimar los espesores de sedimentos fueron los estudios sísmicos realizados posterior al terremoto de Caracas de 1967 (Murphy et al., 1969). Kantak (2001) analizó estos datos junto con la recopilación de pozos de agua para determinar los espesores de sedimentos. En el año 2001 se realizaron mediciones sísmicas de gran ángulo para la determinación del espesor de sedimentos (Sánchez et al., 2005a).

Esta información se complementó con unas 2000 mediciones de ruido ambiental en una malla de 250 m aproximadamente para determinar los períodos predominantes del suelo (Rocabado et al., 2006; Figura 6). Los valores de Vs hasta el basamento se corroboraron con mediciones de arreglos de microtremores en 5 sitios en el valle (Cornou et al., 2011).

Con el fin de tener una visión 3D de la profundidad al basamento se realizaron unas 1500 mediciones gravimétricas que fueron analizadas mediante un modelado 3D para un mapa integrado de los espesores de sedimentos (Amarís et al., 2011a; Schmitz et al., 2023c; Figura 7).

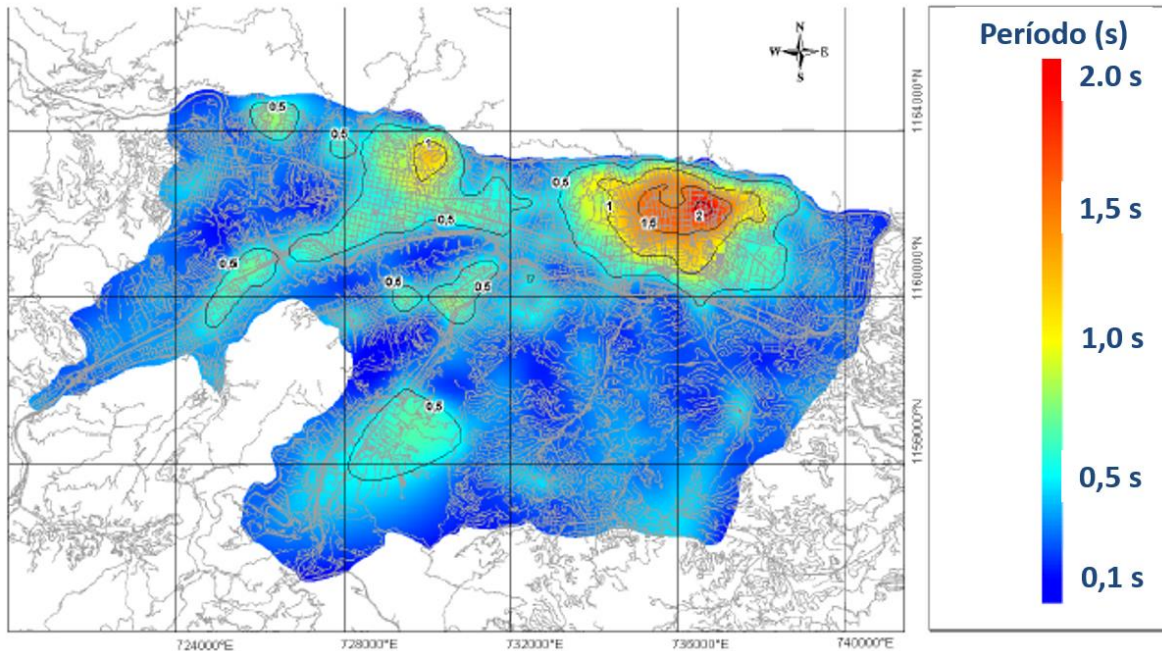


Figura 6. Períodos fundamentales del suelo en Caracas (Rocabado et al., 2006).

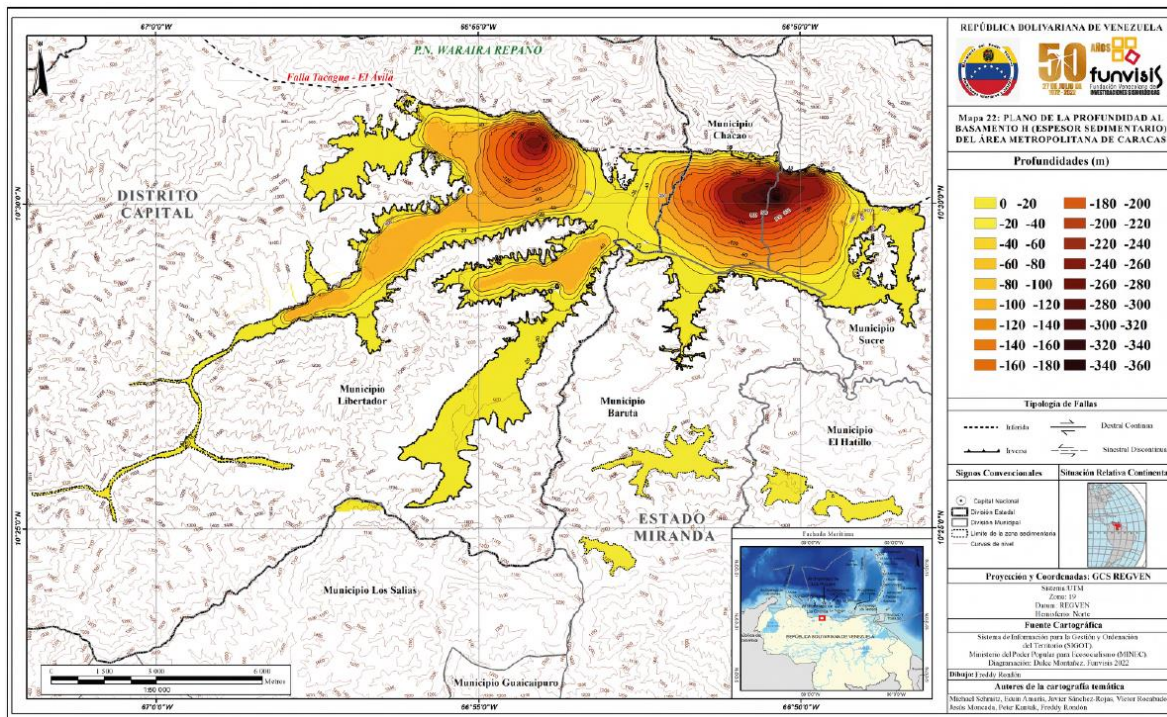


Figura 7. Espesores de sedimentos en Caracas (Schmitz et al., 2019; 2023c).

2.2.6 Espectros de respuesta

Para obtener los espectros de respuesta en superficie se realizó un estudio paramétrico de respuesta dinámica 1D usando análisis equivalente lineal con el programa SHAKE (Schnabel *et al.* 1972), variando el espesor de sedimentos (entre 10 y 350 m) y la velocidad promedio

de ondas de corte de los primeros 30 m ($V_{s,30}$ entre 150 y 650 m/s), los cuales se agruparon dentro de 12 clases (Figura 8) de acuerdo con su comportamiento típico.

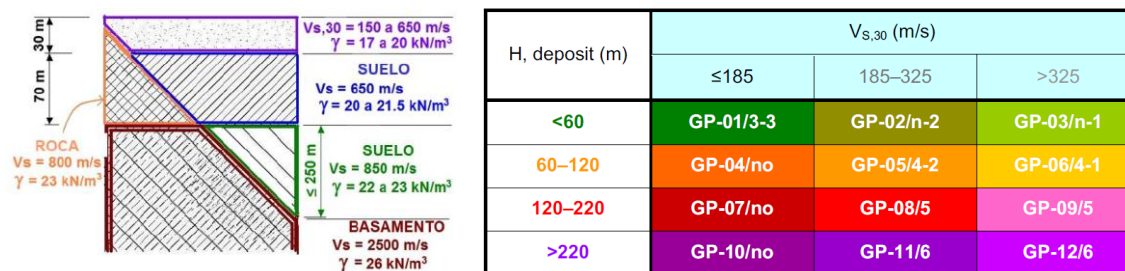


Figura 8. Esquema de velocidades de ondas de corte y peso unitario para el modelo geofísico/geotécnico utilizado para el estudio paramétrico de respuesta dinámica 1-D (izquierda) y grupos de perfiles de suelo genéricos (derecha) utilizados para la respuesta dinámica de sedimentos y las microzonas resultantes asociadas (Schmitz et al., 2020a).

Adicionalmente, se toman en cuenta los efectos 2D y 3D de la cuenca, un factor determinante en la distribución de los daños del terremoto de Caracas de 1967. Utilizando los espectros obtenidos por Papageorgiou & Kim (1991) para la zona de Los Palos Grandes, se obtuvieron amplificaciones 2D respecto a 1D hasta un período de 2 s, con una ampliación del rango hasta 4 s con los resultados de un modelado 3D de la respuesta sísmica (Delavaud, 2007). Los espectros resultantes se grafican respecto a los espectros correspondientes de la norma COVENIN 1756 (2001) para los diferentes tipos de suelo (en la figura 9 se muestran ejemplos de los espectros de los grupos de perfiles de mayor profundidad de sedimentos). Detalles del procedimiento, incluyendo los efectos de topografía, se indican en Hernández et al. (2011) y en Schmitz et al. (2011).

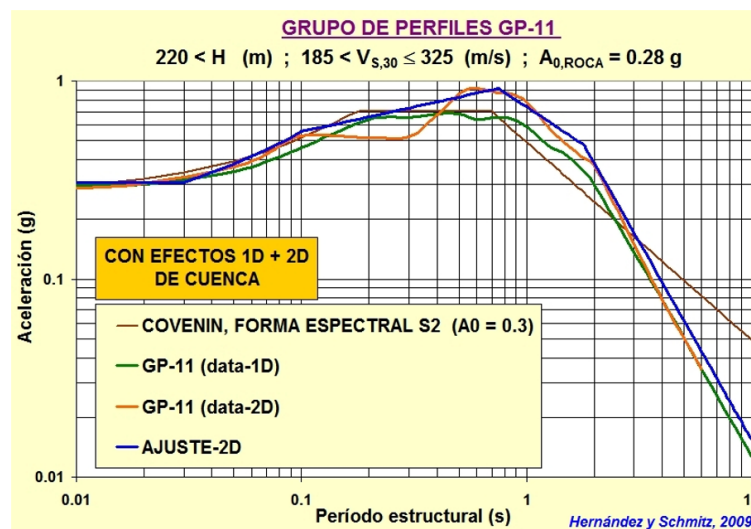


Figura 9. Ejemplo de espectros de respuesta elástica ($\xi = 5\%$) para microzonas con espesor de sedimentos > 220 m (derecha), para $V_{s,30} > 325$ m/s (Hernández et al., 2011; Schmitz et al., 2011).

2.2.7 Determinación de microzonas sísmicas

Con el fin de ubicar las respectivas microzonas sísmicas se agruparon los mapas de Vs30 (Figura 5) y de espesores de sedimentos (Figura 10) según los grupos de perfiles en la Figura 8. Para la definición de las microzonas de respuesta sísmica similar se añadieron varias fuentes de información, como el análisis geomorfológico, geológico y geofísico de los sedimentos en el valle, el análisis de las rocas expuestas en laderas, la evaluación de la topografía y el análisis de los daños reportados durante el terremoto de Caracas de 1967.

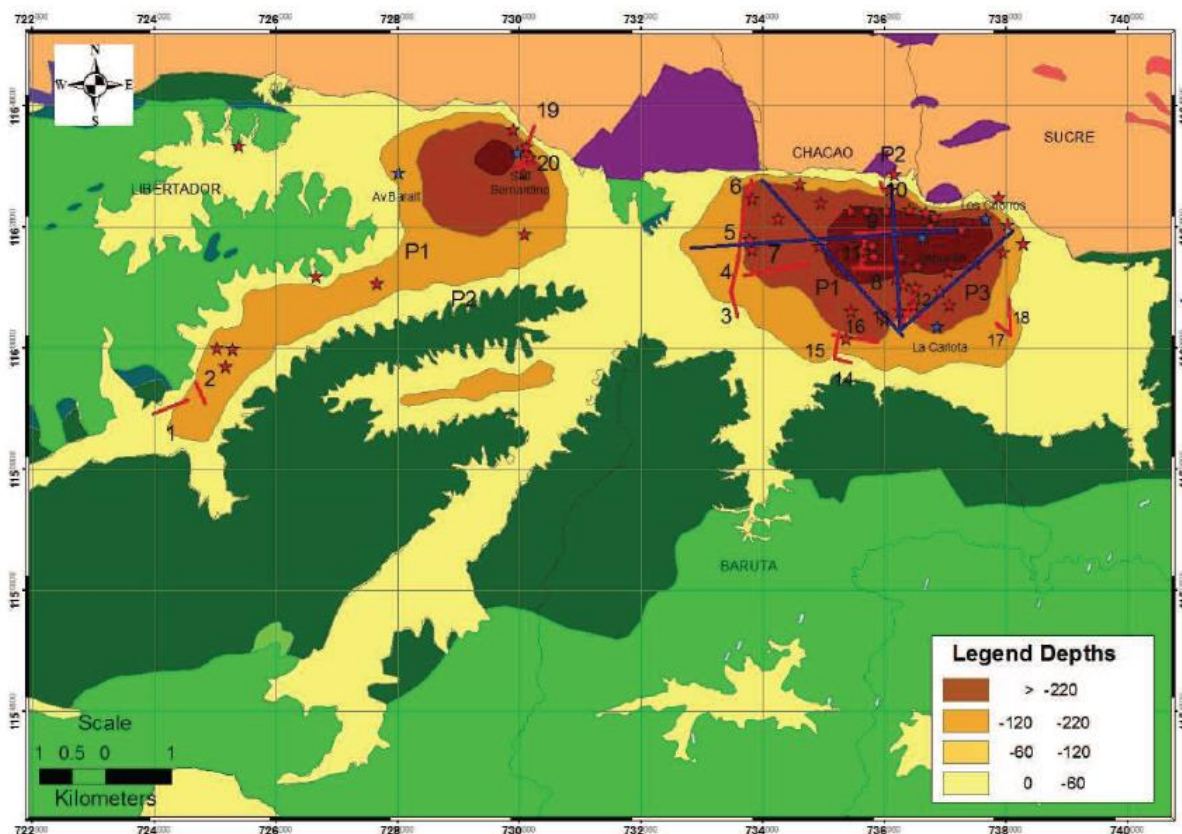


Figura 10. Espesores de sedimentos distribuidos en 4 clases para la definición de microzonas en Caracas (Amarís et al., 2011a).

En la Figura 11 se muestra el mapa final de microzonas con similar respuesta sísmica obtenido para el Área Metropolitana de Caracas (AMC). A cada microzona delimitada se le asigna un espectro de diseño según su clase de sitio (Figura 8). Esta distribución de microzonas se calibró a través de diferentes variables, tales como perfiles de suelos “reales” de pozos profundos, períodos predominantes de H/V y funciones de transferencia experimental.

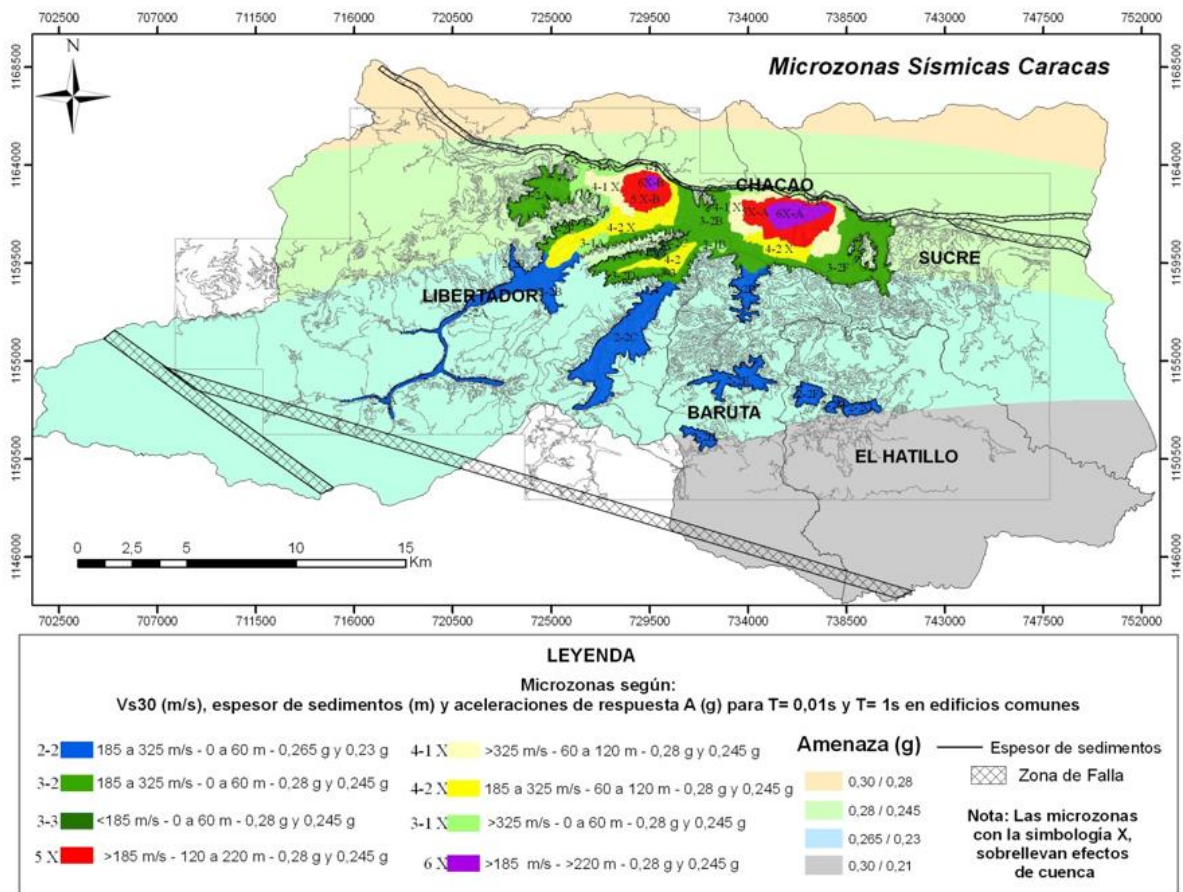


Figura 11. Zonificación de la amenaza sísmica en afloramientos de roca (macrozonas) y microzonas de comportamiento sísmico similar en el AMC (Schmitz et al., 2011).

2.2.8 Aplicación en la gestión del riesgo

Fuera de las áreas sedimentarias, el peligro de movimientos en masa activados por terremotos ha sido evaluado usando información geológica, geotécnica, geomorfológica, de pendientes y modificaciones antrópicas, mediante índices cuantitativos (detalles ver Hernández et al., 2008; 2023). Los resultados (Figura 12) permiten identificar las áreas de mayor prioridad para intervención y para la planificación urbana (ver Figura 1).

Para la toma de decisiones sobre potenciales intervenciones para la mitigación del riesgo sísmico se incluyó la evaluación de edificaciones existentes respecto a su comportamiento estructural típico, orientada a establecer prioridades para su reforzamiento según su localización en las diferentes microzonas (Hernández y Domínguez, 2009). Esta información ha sido incorporada en un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual permitirá la interacción con las instituciones locales y planificadores urbanos para la rápida implementación de las recomendaciones, así como la interacción con las comunidades locales.

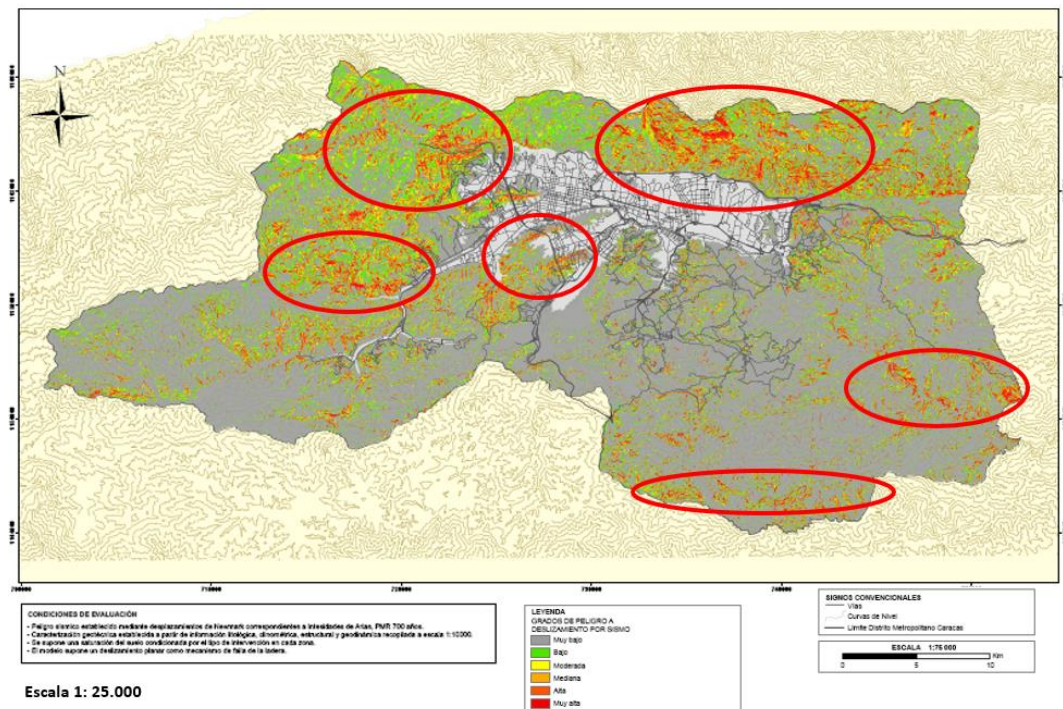


Figura 12. Peligro de deslizamientos por sismos en el AMC (Hernández et al., 2008); las zonas identificadas en rojo presentan regiones de mayor peligro.

3 AMENAZA SÍSMICA EN VENEZUELA

3.1 Características tectónicas del país

La geodinámica de Venezuela está caracterizada por la interacción de las placas del Caribe y Sudamérica, lo que ha dado lugar a la formación de cordilleras y cuencas asociadas. Con base en el trabajo de Hackley et al. (2006) y Urbani (2018) se identifican las provincias geológicas y las principales fallas activas (Audemard et al., 2000b) en la Figura 13.

La placa del Caribe se mueve con una velocidad de $\sim 19,6 \pm 2$ mm/año hacia el este con respecto a la placa Sudamericana (e.g. Weber et al., 2001), con una distribución compleja del movimiento que genera una triple unión Caribe-Andina en el norte de Sudamérica (Figura 14).

Las estructuras de las diferentes placas han sido evaluadas por métodos sísmicos (Schmitz et al., 2021), gravimétricos (Sánchez et al., 2010) y diferentes métodos sismológicos como funciones receptoras (Niu et al., 2007) y tomográficas (Bezada et al., 2010; Cornthwaite et al., 2021). El espesor de la corteza aumenta de 25 km en el Caribe a 45 km en el Escudo de Guayana, con mayores espesores a 50 km en la Cuenca Oriental y en los Andes de Mérida (Schmitz et al., 2021; Niu et al., 2007). La placa del Caribe subduce debajo de la placa Sudamericana con una gran complejidad (Cornthwaite et al., 2021; Sun et al., 2022).

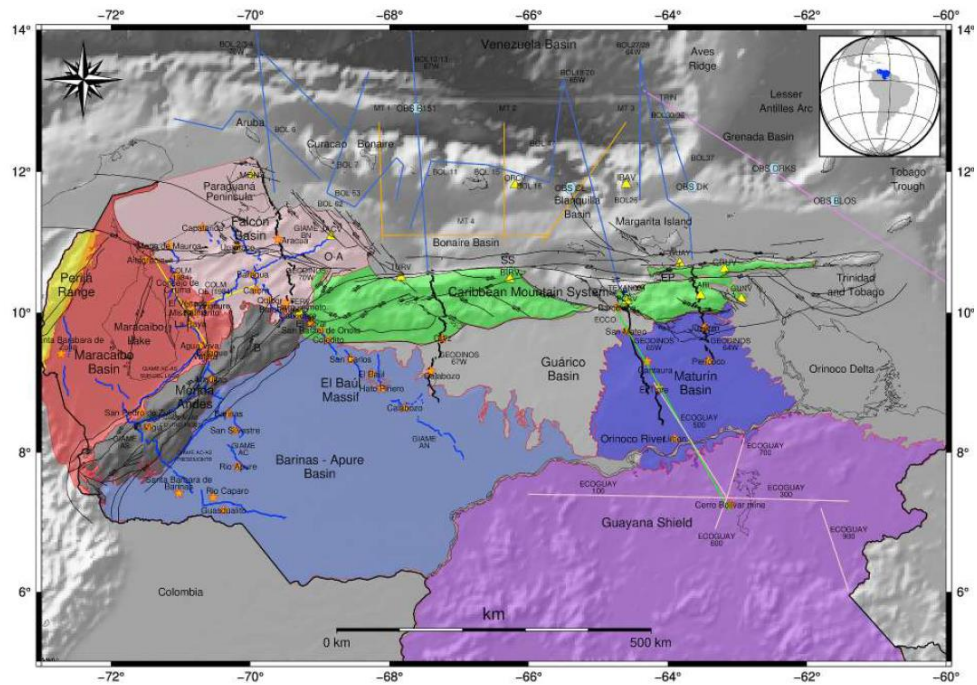


Figura 13. Principales provincias geológicas de Venezuela, según la geología de Hackley et al. (2006) y siguiendo la clasificación de Urbani (2018), así como fallas activas (líneas negras; Audemard et al., 2000b) y líneas sísmicas de gran ángulo (Schmitz et al., 2021). Los principales sistemas de fallas de rumbo (líneas negras) son Oca-Ancón (O-A), Boconó (B), San Sebastián (SS) y El Pilar (EP).

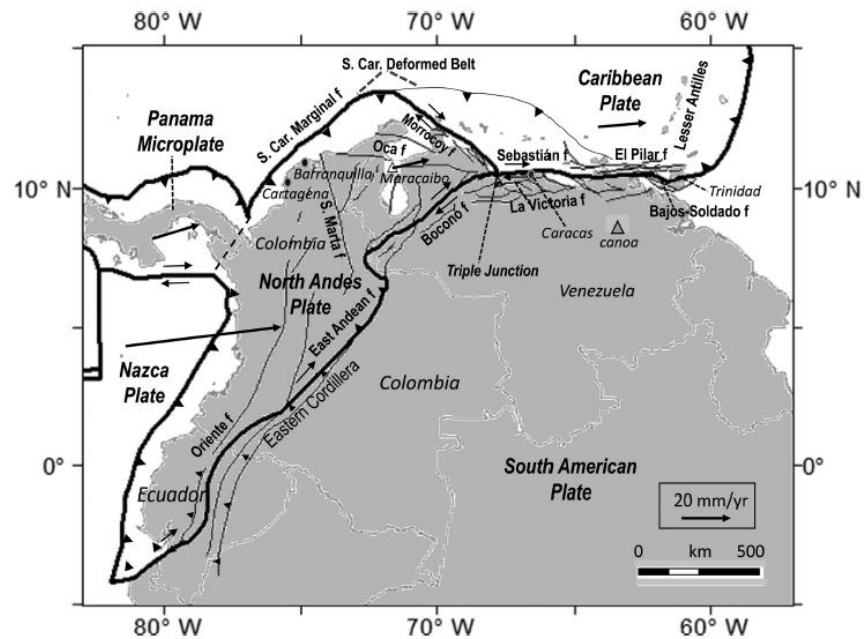


Figura 14. Configuración tectónica del sur de la placa del Caribe y del norte de la placa Suramericana (Pérez et al., 2018). El bloque Norandino (placa Norandina según estos autores) es importante para la dinámica en el noroeste de Venezuela.

3.2 Sismicidad

La sismicidad en Venezuela coincide con las zonas de fallas activas y fajas de deformación (Figuras 13 y 15). La mayor parte de la sismicidad es somera en los primeros 20 km (Figura 15), asociada a la ubicación de las fallas activas, con mayor actividad en el Oriente del país y en los Andes de Mérida.

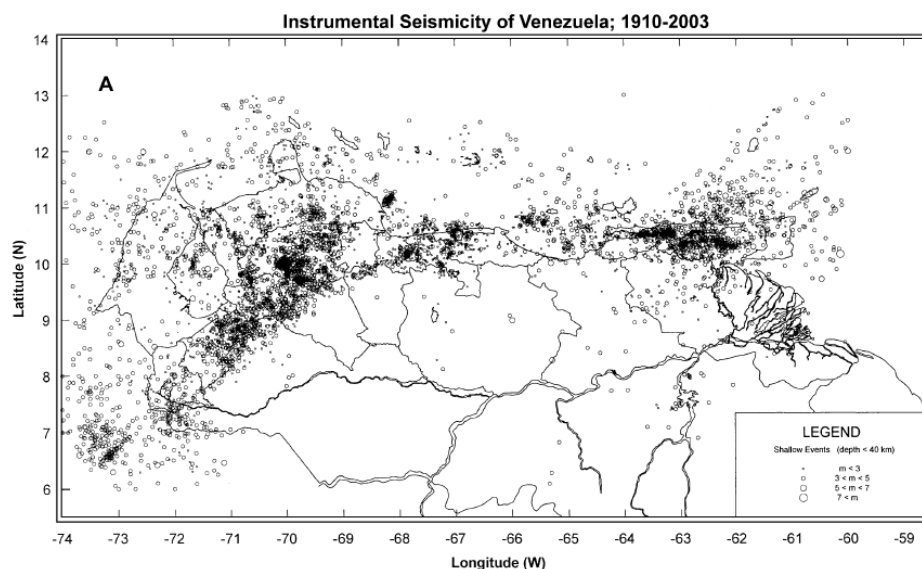


Figura 15. Sismicidad (fuente: catálogo de FUNVISIS) de eventos someros (menos de 40 km de profundidad) en Venezuela (Audemard et al., 2005).

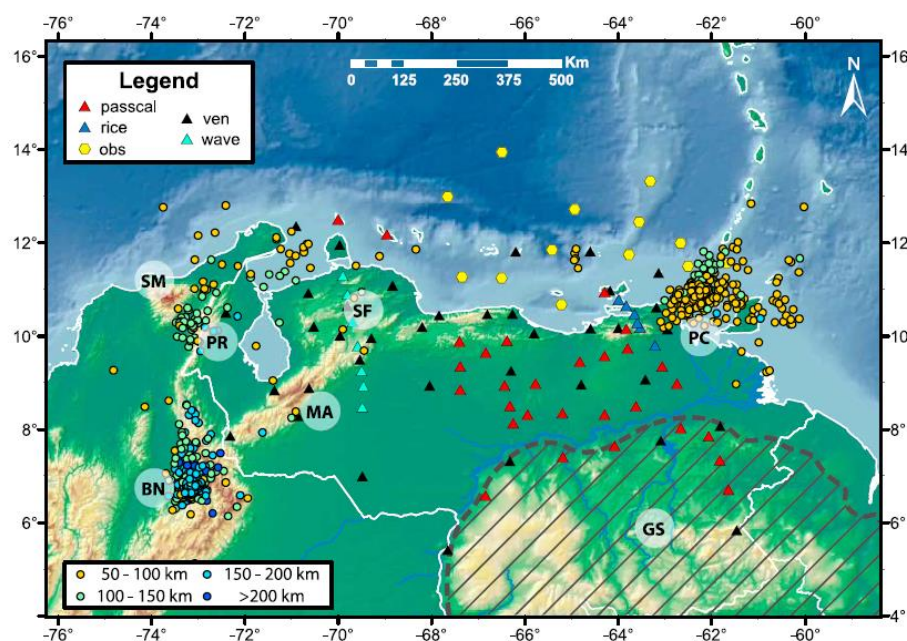


Figura 16. Sismicidad profunda (más de 50 km de profundidad) en Venezuela (fuente: catálogo de FUNVISIS); BN, Nido de Bucaramanga; PC, Paria Cluster; MA, Andes de Mérida; PR, Cordillera de Perijá; SM, Macizo de Santa Marta; SF, Serranía de Falcón; GS, Escudo de Guayana (Bezada et al., 2010).

En la imagen de la sismicidad profunda destacan dos zonas de elevada sismicidad, en el oeste el Nido de Bucaramanga con sismicidad a una profundidad alrededor de 150 km y en el este el llamado “Paria Cluster” a una profundidad de unos 70 km (Figura 16). Ambas zonas han sido estudiadas ampliamente por muchos autores. Si bien el origen del Nido de Bucaramanga ha sido asociado tanto a la placa de Nazca como a la placa del Caribe, Sun et al. (2022) lo ubican dentro de la Placa del Caribe y que coincide con la flexión de la losa en dos planos, donde tanto el rumbo como la inclinación de la losa cambian. Audemard et al. (2025) asocian la actividad del “Paria Cluster” a un desgarre litosférico de la losa oceánica atlántica adherida al continente sudamericano, también llamado STEP – “Subduction-Transform Edge Propagator” (e.g. Arnaiz-Rodríguez et al., 2026). Otra zona de sismicidad intermedia-profunda entre 50 y 150 km de profundidad está asociada a la subducción de la placa del Caribe debajo del noroeste de Sudamérica, analizada por Van der Hilst y Mann (1994) y Malavé y Suárez (1995).

3.3 Amenaza sísmica

Los mapas de amenaza sísmica constituyen la base para las normas sísmicas; se desarrollan en el tiempo debido al avance en el conocimiento de las fuentes sismogénicas y en la metodología de su evaluación. Las dos normas más recientes, la Norma Venezolana de Edificaciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2001) y de la actualmente vigente Norma Venezolana de Construcciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2019) expresan la amenaza sísmica en roca (Figuras 17 y 18).

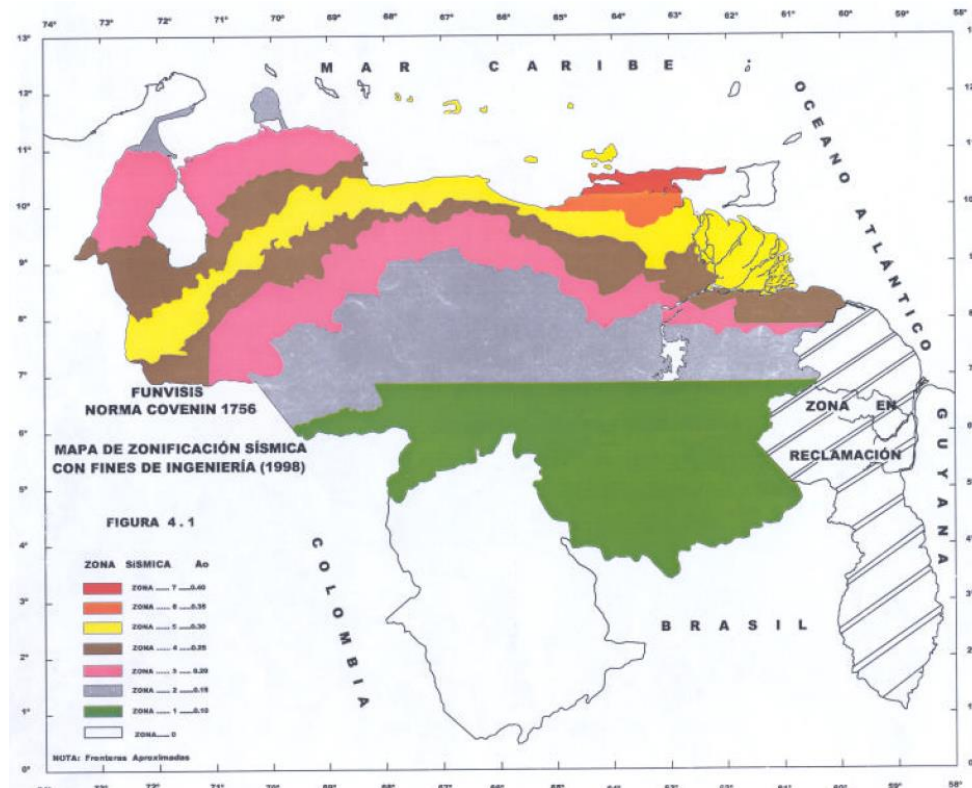


Figura 17. Mapa de zonificación sísmica de la norma COVENIN 1756 (2001).

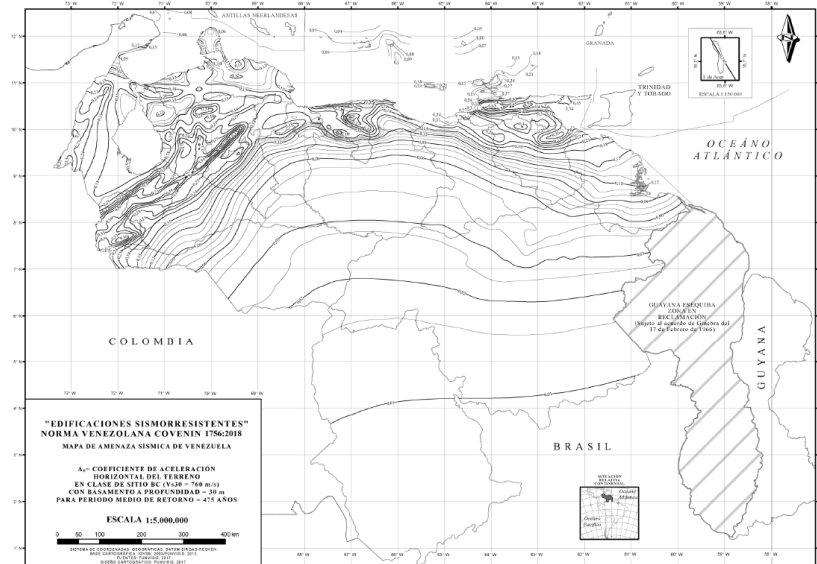


Figura 18. Mapa del parámetro A0 de la norma COVENIN 1756 (2019).

En la norma COVENIN 1756 (2019) se define A0 como el coeficiente de la aceleración horizontal del terreno en la clase de sitio referencial para un periodo medio de retorno de 475 años. La clase de sitio referencial es la clase de sitio BC con V_{s30} de 760 m/s en condición topográfica leve, lo que corresponde a un sitio clasificado como roca sin efectos topográficos. Además, se definen dos mapas con los coeficientes A1 y el período de transición TL (Figura 19). A1 es el coeficiente de aceleración espectral horizontal para periodo estructural de 1 segundo en la clase de sitio referencial, para coeficiente de amortiguamiento de 5% y un periodo medio de retorno de 475 años, y TL es el período de transición entre periodos intermedios y periodos largos del espectro elástico de respuesta horizontal, en la clase de sitio referencial para coeficiente de amortiguamiento de 5% y un periodo medio de retorno de 475 años. Para cada parámetro sísmico básico, en el lugar geográfico del proyecto se seleccionará el mayor valor dado por las curvas adyacentes al lugar en el mapa correspondiente o bien se interpolará entre ellas.

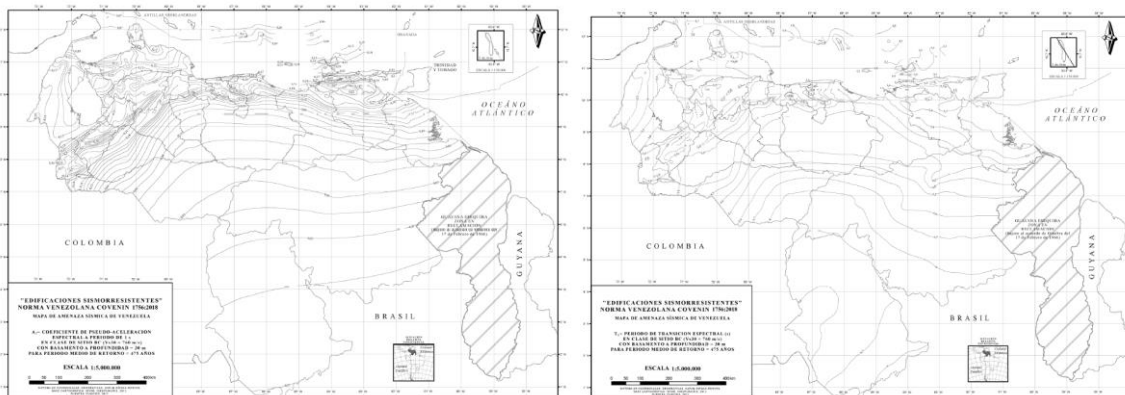


Figura 19. Mapa del parámetro A1 (izquierda) y TL (derecha) de la norma COVENIN 1756 (2019).

El análisis de la amenaza sísmica se basa en un modelo sismogénico que identifica las fuentes sísmicas como un catálogo sismológico instrumental (Rendón et al., 2014), en terremotos históricos ocurridos en el país (Hernández, 2009b) y una base de datos de fallas tectónicas (Paolini et al., 2012); véanse detalles en Hernández y Schmitz (2019). Estas características quedan plasmadas en un conjunto de parámetros sismogénicos que describen la sismicidad esperada y derivan en las curvas de isoaceleraciones del nuevo mapa, las cuales expresan la variación del grado de actividad sísmica de norte a sur y la influencia de la cercanía a las fallas, junto con las relaciones de atenuación que estiman la intensidad que produce la actividad sísmica a diversas distancias de las fuentes siguiendo la metodología propuesta por Esteva (1967) y Cornell (1968) y siguiendo las recomendaciones mundiales del “Global Earthquake Model” (GEM) (Stewart et al., 2013). Los valores indicados en las figuras 18 y 19 son válidos para construcciones comunes; para todas las construcciones, las acciones sísmicas se determinan a partir de un periodo medio de retorno (PMR) (o probabilidad de excedencia) asociado al desempeño deseado en función de su importancia y tipo de respuesta mediante la definición de factores de importancia asociados.

Los sitios de ubicación de las construcciones deben clasificarse de acuerdo con las características del terreno y se deben emplear los factores de sitio indicados en la norma COVENIN 1756 (2019) a los fines de la construcción de los espectros de respuesta para el diseño de las edificaciones. El sitio quedará definido por uno o varios perfiles geotécnicos, dependiendo de la extensión del sitio y se caracterizará por su clase de sitio (descripción del perfil de suelo y V_{s30}), su condición topográfica y la profundidad al basamento rocoso. En caso de pendientes superiores al 40% en el sitio o en sus cercanías, debe evaluarse el peligro de deslizamientos. Según las características del lugar se decide la eventual necesidad de evaluar el potencial de licuación y se revisará la posible ruptura de fallas cercanas.

4 MARCO LEGAL E INSTITUCIONAL

4.1 Normativas y políticas de gestión del riesgo

La Ley de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos (2009) establece el marco general de las políticas públicas en materia de gestión de riesgos. Como obligaciones del estado define 1) garantizar que las acciones propias de la ordenación del territorio y de la planificación del desarrollo a todos los niveles de gestión, eviten potenciar o incrementar las condiciones de vulnerabilidad o de amenazas en el país, 2) propiciar la ejecución de acciones orientadas a la reducción de la vulnerabilidad existente y 3) fortalecer las actividades de prevención, mitigación y preparación en todas las instancias de gobierno, así como en la población, con el propósito de reducir los riesgos socionaturales y tecnológicos. Para su funcionamiento ordena la creación de consejos y gabinetes de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos a nivel nacional, estatal y municipal. Dentro de las acciones se plantea la creación del Registro Nacional de Información para la Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos.

El marco legal para fortalecer las capacidades institucionales requeridas para las labores de reconstrucción ante la ocurrencia de desastres en el territorio nacional está dado por la Ley

de la Organización Nacional de Protección Civil y Administración de Desastres (2001), que regula la organización y funcionamiento de la Organización de Protección Civil y Administración de Desastres en el ámbito nacional, estatal y municipal.

En la Norma Venezolana de Construcciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2019) se establecen los criterios y procedimientos mínimos para el análisis, diseño y evaluación de edificaciones tipificadas sujetas a la acción de movimientos sísmicos, así como las acciones sísmicas que deben ser aplicadas a todo tipo de construcciones según su desempeño esperado. En el capítulo Amenaza Sísmica se presentan los mapas con los parámetros a ser aplicados en cada sitio de Venezuela.

4.2 Organismos responsables

El organismo rector en la materia es la Dirección Nacional de Protección Civil y Administración de Desastres (Protección Civil), así como sus direcciones estatales y municipales. En el Sistema Nacional de Protección Civil y Administración de Desastres están integradas las instituciones Protección Civil, los Bomberos, la Fuerza Armada Nacional Bolivariana (FANB) y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). Protección Civil, Bomberos y la FANB se enfocan en las actividades preventivas, comunitarias y en la respuesta y coordinación de emergencias, trabajando articuladamente ante eventos sísmicos. FUNVISIS es la institución oficial encargada de la investigación científica en sismología e ingeniería sísmica y opera la Red Sismológica Nacional para monitorear y reportar la actividad sísmica; además, participa en la divulgación de los conocimientos.

La permisología de construcción es fundamentalmente responsabilidad de las Alcaldías (Oficinas de Urbanismo y de Ingeniería Municipal) para permisos locales como uso de suelo y licencias de obra. Para los estudios ambientales el responsable es el Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo y para la infraestructura vial asociada a las construcciones el Ministerio del Poder Popular para Obras Públicas. Toda la normativa, tal como la norma COVENIN 1756, sigue los estándares establecidos por la Comisión Nacional de Normas Industriales.

4.3 Integración de la microzonificación sísmica en el entorno normativo y en la planificación urbana

Las leyes que rigen la planificación territorial son la Ley Orgánica para la Planificación y Gestión de la Ordenación del Territorio (LOOT) (1983) (posteriormente modificada en los años 2005 y 2006 y derogadas las modificaciones en el año 2007) y la Ley Orgánica de Ordenación Urbanística (LOOU) (1987) junto con normativas posteriores como la Ley de Tierras Urbanas (2009) y el Decreto de Regularización Integral de la Tenencia de la Tierra de los Asentamientos Urbanos o Periurbanos (2011) que complementan su aplicación en temas específicos sobre todo en asentamientos informales, siendo el Reglamento de la LOOU (1991) una pieza clave para su ejecución. En este reglamento se define qué se considera variable urbana fundamental para urbanizaciones y edificaciones, como uso, densidad

poblacional, espacios viales, retiros, alturas y restricciones ambientales o de seguridad. Establece normas técnicas y disposiciones que regulan la subdivisión de terrenos, lotificación, urbanización y construcción y complementa los instrumentos de planificación territorial, lo cual lo convierte en un documento fundamental para la aplicación práctica de la legislación urbanística en Venezuela.

La Norma Venezolana de Construcciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2019) establece criterios y procedimientos mínimos para el análisis, diseño y evaluación de edificaciones tipificadas sujetas a la acción de movimientos sísmicos y especifica acciones sísmicas para aplicación a todo tipo de construcciones según su desempeño esperado. Está dirigida a edificaciones de vivienda, oficinas, comercios, industriales, escuelas, hospitales, entre otras, de comportamiento tipificable, construidas con los materiales permitidos y empleando las normas de diseño respectivas. Se basa en la LOOU (1987), el Reglamento de la LOOU (1991) y en la Ley Orgánica del Sistema Venezolano para la Calidad (2002). Para la revisión de proyectos estructurales y las variables urbanas se remite a los organismos municipales con los procedimientos indicados en las leyes previamente indicadas.

La norma COVENIN 1756 (2009) indica que las ciudades con más de 100.000 habitantes deberán disponer de un estudio de microzonificación sísmica en su territorio y, en caso de existir una microzonificación sísmica avalada por la autoridad competente (en este caso FUNVISIS), los valores de amenaza y los espectros elásticos deben sustituirse por los dados en ésta. En específico, deben aplicarse los resultados de las microzonificaciones sísmicas del Área Metropolitana de Caracas y de los Municipios Iribarren y Palavecino del Estado Lara; en el futuro deberán emplearse otras microzonificaciones sísmicas avaladas que lleguen a generarse. Las autoridades municipales deben apoyar a las autoridades nacionales en el desarrollo de las microzonificaciones sísmicas que se planteen en su ámbito territorial, particularmente suministrando toda la información geológica y geotécnica existente en él y velar por la implementación de los resultados de las microzonificaciones sísmicas en decretos u ordenanzas municipales.

5 AVANCES DE PROYECTOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

5.1 Área Metropolitana de Caracas

Durante el terremoto de Caracas/Litoral en el año 1967 hubo una concentración de los daños en las cuencas (Los Palos Grandes-Altamira y San Bernardino y Caraballeda) para edificaciones altas, lo que motivó al desarrollo de los primeros estudios de la relación espesores de sedimentos – altura de edificios versus daños (Seed et al., 1970; Seed y Alonso, 1974). Murphy et al. (1969) realizaron estudios sísmicos, estimando una profundidad de los sedimentos con 300 m en Los Palos Grandes y 120 m en San Bernardino. Mediante análisis de mediciones de ruido ambiental mediante H/V se determinaron periodos de vibración del suelo entre 0,2 s en roca y 1-1,6 s en Los Palos Grandes (Abeki et al., 1998a; Duval et al., 1998). Mediciones sísmicas realizadas en el año 2001 permitieron corroborar los espesores de sedimentos propuestos por Murphy et al. (1969) (cuyos datos originales nunca se

publicaron) con definiciones detalladas de las velocidades de propagación de las ondas P y S (Sánchez et al., 2005a).

Se contó también con la información recopilada por el Proyecto Ávila (liderado por el IGVS/MARNR en los años 2000 y 2003) y por el Estudio sobre el Plan Básico de Prevención de Desastres en el Distrito Metropolitano de Caracas en los años 2003-2005 (con el financiamiento de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón, JICA). Durante este proyecto se estudiaron varios escenarios para desastres originados por terremotos (Yamazaki et al., 2005). Sin embargo, como no se pudo explicar la concentración de daños en la cuenca, se solicitó financiamiento en el marco del programa FONACIT- BID II 200400738 para el estudio de microzonificación sísmica de Caracas y Barquisimeto en los años 2005-2009. Para su ejecución, así como para los demás proyectos de microzonificación sísmica desarrollados, se siguió la metodología propuesta por Hernández et al. (2006), la cual se detalla en el Capítulo 2 “Fundamentos de la Microzonificación Sísmica” con los respectivos resultados, los cuales se exponen en detalle en Schmitz et al. (2009a; 2011; 2020a; 2023c) y en Schmitz y Singer (2015).

Para la implementación de los resultados se iniciaron conversaciones con las direcciones municipales de Ingeniería Municipal, Planificación Urbana y Protección Civil de los 5 municipios del Área Metropolitana de Caracas en el año 2010. Después de definir el contenido de la ordenanza municipal, se sometió la ordenanza del municipio Libertador al concejo municipal en el año 2015. Después de su discusión en el concejo municipal, la primera ordenanza fue publicada en el año 2018 (Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital, 2018), basándose los espectros elásticos en la norma COVENIN 1756 (2001).

En el mismo año se reimpulsaron las conversaciones en los demás municipios del Área Metropolitana de Caracas. Los espectros elásticos y demás artículos en las ordenanzas municipales se ajustaron a las indicaciones de la norma COVENIN 1756 (2019). En el año 2021 se publicaron las respectivas ordenanzas en los municipios El Hatillo (Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio El Hatillo del Estado Bolivariano de Miranda, 2021) y Sucre (Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Sucre del Estado Miranda, 2021). Dada la vigencia de la nueva norma COVENIN 1756 (2019), la ordenanza del Municipio Libertador fue actualizada a las indicaciones de esta norma actualizada (Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital, 2024). En los municipios Chacao y Baruta se iniciaron conversaciones sobre la publicación de las respectivas ordenanzas municipales, sin embargo, aún no han sido discutidas en concejo municipal. En las ordenanzas municipales, los mapas de microzonificación sísmica se delimitan al territorio de los respectivos municipios (Figuras 20 y 21).

A cada microzona sísmica se asocia un espectro elástico (por ejemplo: Municipio Libertador; Figura 22) con sus respectivos parámetros. Para la construcción de los espectros de respuesta se toma en consideración el Período Medio de Retorno (PMR = 475 años para edificaciones comunes) de acuerdo con la microzona respectiva. Se emplean los factores de importancia para el grupo de importancia y el PMR del proyecto. Se definen factores de reducción de respuesta R , factores de amplificación de desplazamiento, factores de sobrerresistencia, factores de irregularidad y factores de redundancia en cada dirección de acción sísmica en

cada dirección de la acción sísmica, acorde a las características particulares del proyecto (tipos estructurales, materiales y nivel de diseño), según los previstos en la norma COVENIN 1756 (2019). Ejemplos de los espectros de respuesta resultantes en el municipio Libertador se presentan en la Figura 23.

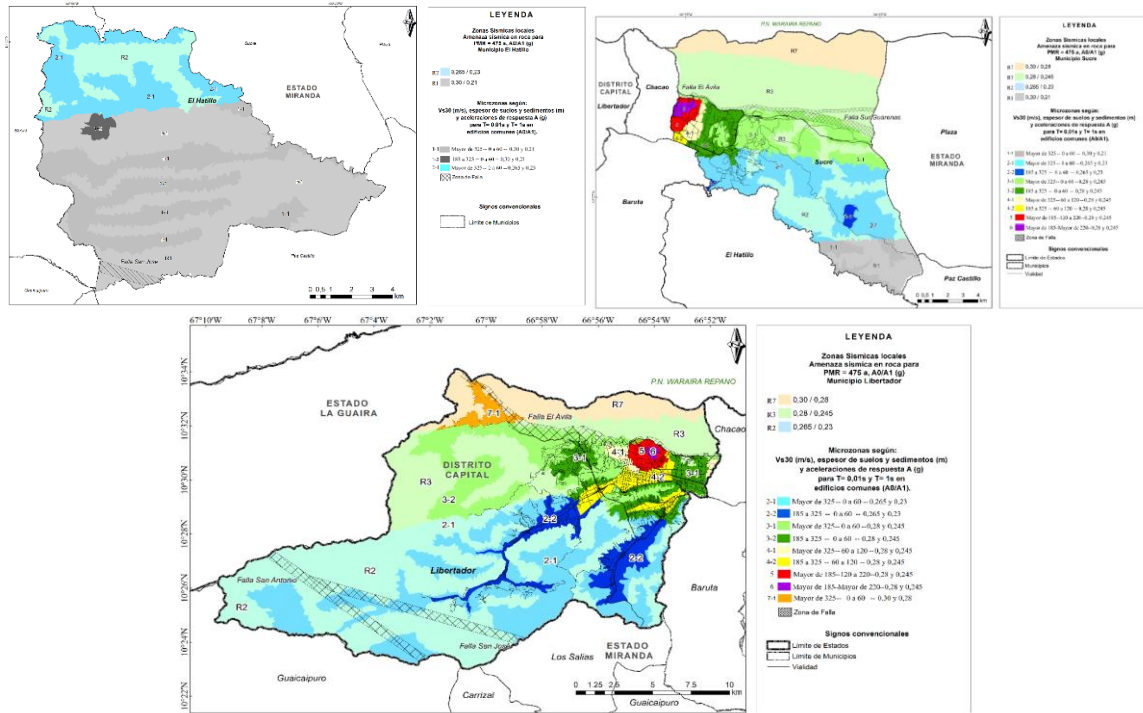


Figura 20. Planos de microzonas sísmicas y fallas tectónicas activas de los municipios El Hatillo (arriba, izquierda), Sucre (arriba, derecha) y Libertador (abajo).

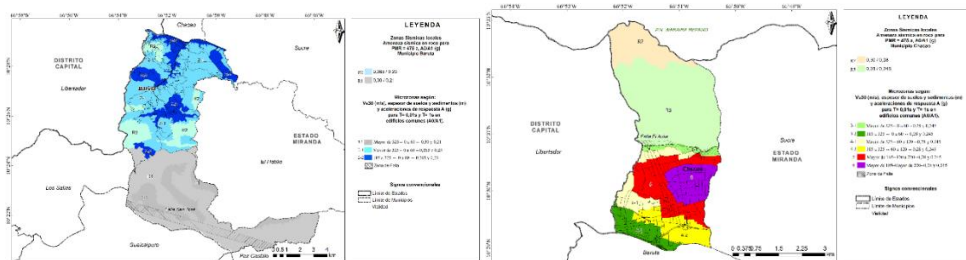


Figura 21. Planos de microzonas sísmicas y fallas tectónicas activas de los municipios Baruta (izquierda) y Chacao (derecha) de los respectivos proyectos de ordenanza municipal.

Las ordenanzas municipales para edificaciones sismorresistentes contemplan la puesta en marcha de planes de gestión del riesgo sísmico, el reforzamiento estructural y sismorresistente. Dentro de estos planes toman un rol importante los mapas de peligro de deslizamientos (ver Figura 12), así como el reforzamiento estructural según la evaluación de vulnerabilidad en las diferentes microzonas de los municipios. En las ordenanzas se indica el orden de revisión (priorización general) para los estudios de vulnerabilidad de edificaciones con el fin de definir las edificaciones de mayor urgencia para la realización de estudios de vulnerabilidad y su respectivo reforzamiento estructural, si amerita.

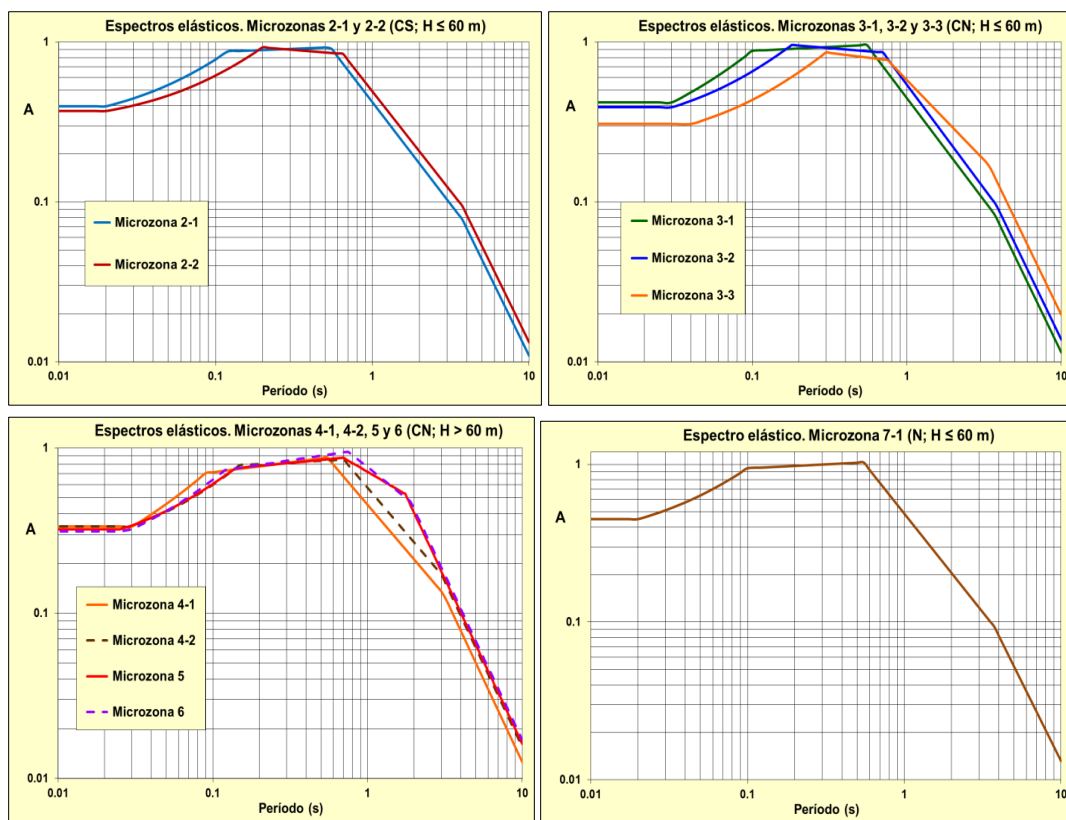


Figura 22. Espectros elásticos en las microzonas sobre roca meteorizada y depósitos sedimentarios para PMR = 475 años del Municipio Libertador; microzonas 2-1 y 2-2 (arriba a la izquierda), microzonas 3-1, 3-2 y 3-3 (arriba a la derecha), microzonas 4-1, 4-2, 5 y 6 (abajo a la izquierda) y microzona 7-1 (abajo a la derecha; Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital, 2024).

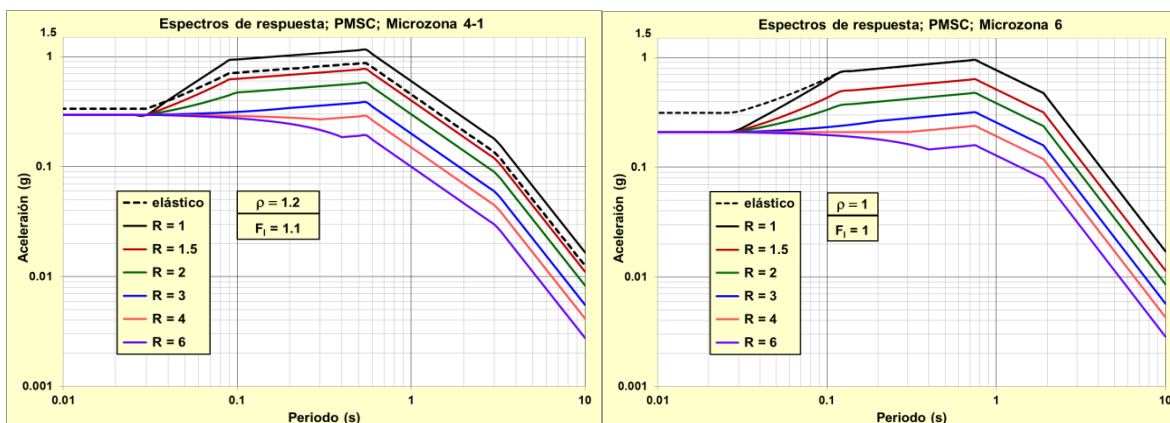


Figura 23. Ejemplos de espectros de respuesta para varios factores de reducción de respuesta R , con determinados factores de redundancia e irregularidad; grupo de importancia B2; PMR = 475 años, para las microzonas 4-1 (izquierda) y 6 (derecha; Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital, 2024).

5.2 Área Metropolitana de Barquisimeto -Cabudare

El proyecto de Microzonificación sísmica del Área Metropolitana de Barquisimeto - Cabudare se inició en el marco del programa FONACIT- BID II 200400738 para el estudio de microzonificación sísmica de Caracas y Barquisimeto. Barquisimeto había sido afectado por terremotos destructivos en varias oportunidades, entre ellas 1812 y en el terremoto de El Tocuyo 1950 (Grases et al., 1999). La información técnica elaborada en las ciudades Barquisimeto y Cabudare ha sido presentada en Schmitz et al. (2009b) y se resume en Schmitz y Morales (2016) y Schmitz et al. (2020b)

La evaluación de la amenaza sísmica se efectuó en términos probabilísticos, establecida como la frecuencia de excedencia anual de respuestas de aceleraciones espectrales, de estructuras elásticas con un amortiguamiento igual a 5% del crítico, ubicadas sobre el basamento rocoso, considerando las incertidumbres asociadas a la fuente de generación sísmica y a la propagación de las ondas (Figura 24). Como valor promedio se consideró 0,28 g que corresponde a la zona característica de la terraza de Barquisimeto y de la cuenca de Cabudare. Además, este valor corresponde al valor expresado para la macrozona Centro-Norte de Caracas (Hernández y Schmitz, 2009; Morales et al., 2015) en el valle sedimentario y permite comparar los espectros resultantes para el Área Metropolitana de Barquisimeto-Cabudare.

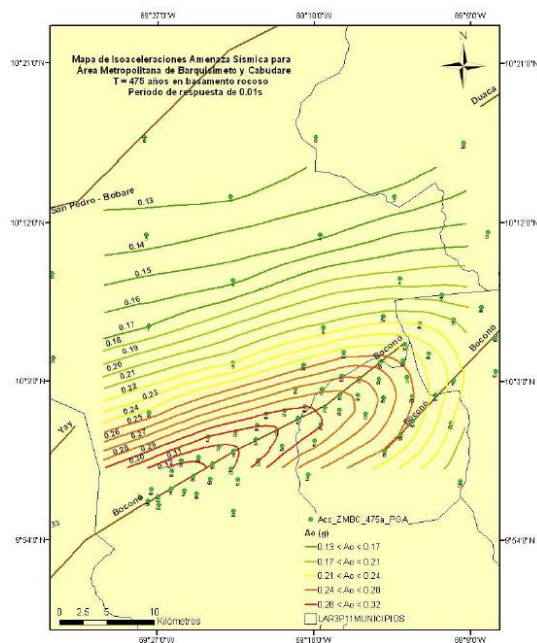


Figura 24. Mapa de amenaza sísmica para el Área Metropolitana de Barquisimeto – Cabudare para un PMR de 475 años con valores de aceleración pico del terreno en “g” para 0,01 s (Hernández et al., 2016).

Basado en trabajos de fotointerpretación realizados a partir de las misiones 020266 (escala 1:20.000) del año 1968 y la misión 0201106 (escala 1:50.000) del año 1975, completados con trabajos de campo, Bechtold (2004) logró mejorar la delimitación de las unidades cuaternarias (Figura 25).

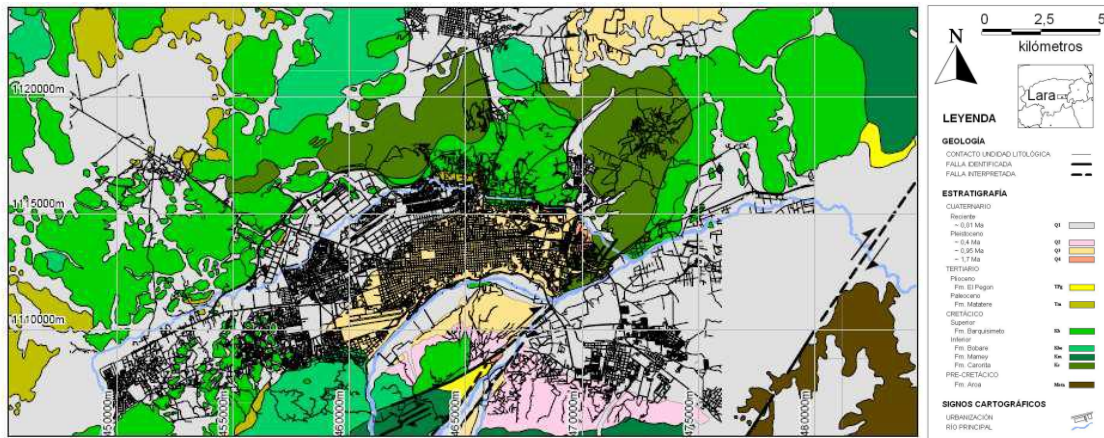


Figura 25. Mapa geológico digital de Barquisimeto y alrededores (Bechtold, 2004).

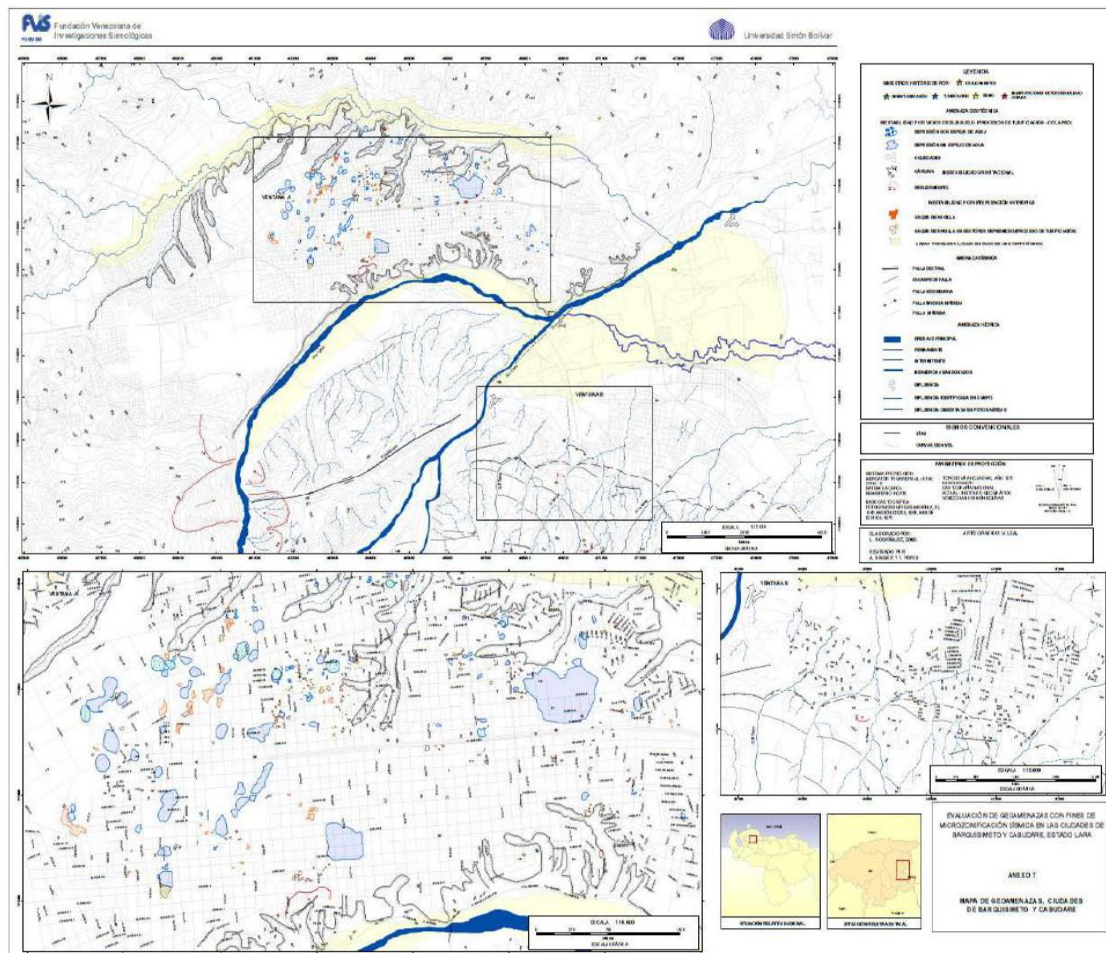


Figura 26. Mapa de geoamenazas sísmicas, geotécnicas e hídricas en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare (Rodríguez y Singer, 2016).

Mediante el reconocimiento geomorfológico se identificaron las geoamenazas, siendo los vicios de suelo y subsuelo originados por procesos de tubificación – colapso en el tope de la terraza de Barquisimeto y de menor extensión en la planicie aluvial de los ríos Claro y Turbio

la principal amenaza (Figura 26). Además, se evaluaron las áreas posibles a ser afectadas por licuación de suelo y las inestabilidades por movimientos gravitacionales originados en el talud sur de la terraza de Barquisimeto (Timaure et al., 2016; Figura 27) y en las laderas adyacentes a Cabudare, así como las amenazas de origen hidrogeomorfológico (Rodríguez y Singer, 2016).



Figura 27. Mapa de susceptibilidad a movimientos de la terraza sur de Barquisimeto (Timaure et al., 2016),

Para la caracterización de los sedimentos se emplearon diversos métodos, tanto geofísicos como geotécnicos, apoyados en su ejecución por trabajos de campo e información existente. La caracterización somera se llevó a cabo mediante empleo de información geotécnica existente (más de 100 ensayos SPT), sísmica de pozos (*downhole*) en dos pozos al basamento sísmico e instrumentado con acelerógrafos (uno en Barquisimeto y uno en Cabudare), exploración geotécnica y análisis de topografía. Mediante los ensayos SPT existentes, suministrados por la Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado (UCLA), y mediante conversión de N° de golpes a Vs se generó un mapa de Vs30 (Figura 28).

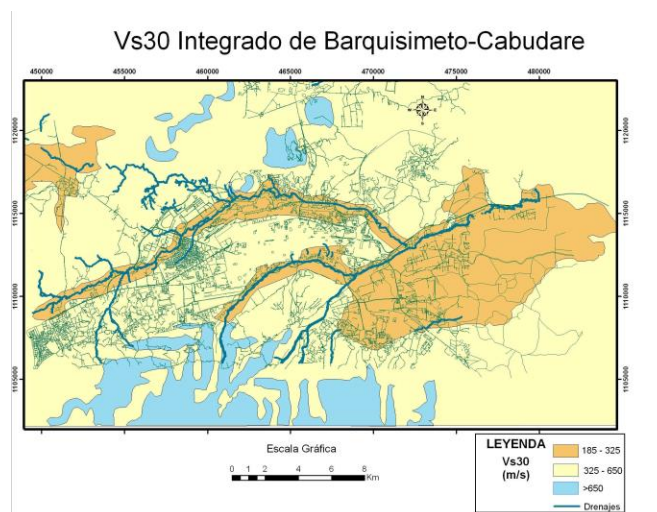


Figura 28. Mapa de Vs30 del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare (García et al., 2016).

Para la determinación de los espesores y las características de los sedimentos profundos que suprayacen a rocas cretácicas de las formaciones Barquisimeto, Bobare y Mamey, se consideró la geología local, así como estudios geofísicos (método de Nakamura o H/V, mediciones gravimétricas, sísmica de refracción profunda) y los pozos perforados hasta roca con fines de instrumentación acelerográfica. Del análisis de unas 1200 mediciones de ruido ambiental con el método H/V resultan valores máximos del período fundamental del suelo de 0,8 s y 3,0 s en Barquisimeto y Cabudare, respectivamente, con menores valores hacia el norte y el oeste (Figura 29).

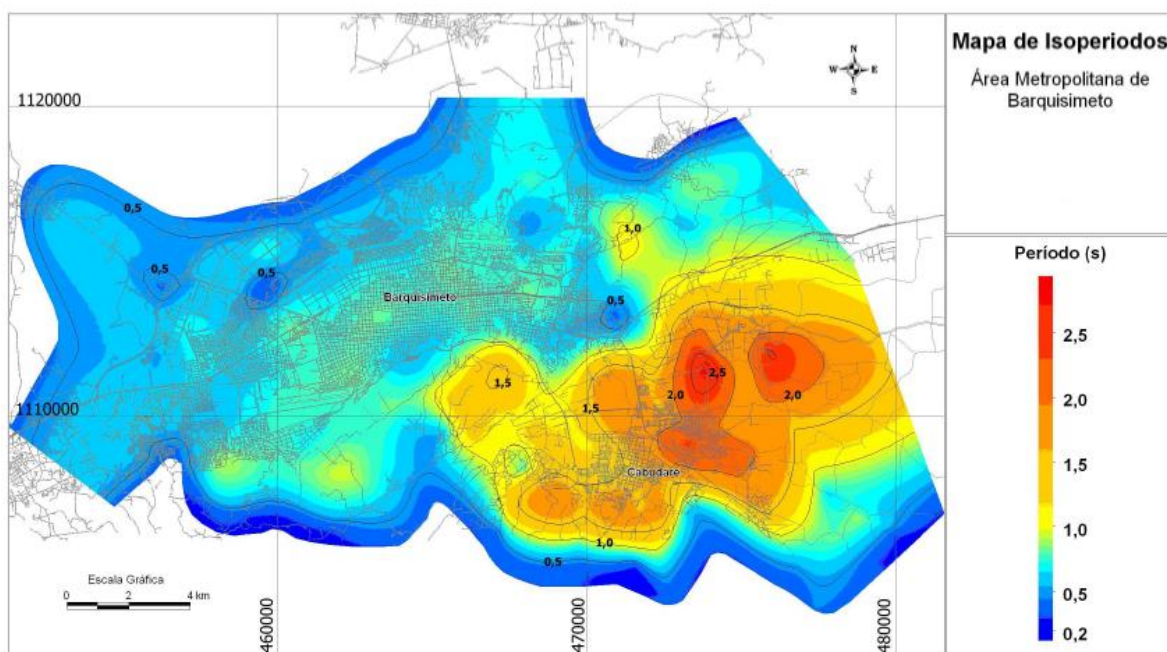


Figura 29. Mapa de períodos fundamentales del suelo del Área Metropolitana de Barquisimeto-Cabudare (Rocabado et al., 2007).

Para determinar la profundidad de los sedimentos se realizaron 5 perfiles sísmicos de hasta 3 km de longitud con explosivos como fuente, lo que permitió determinar las velocidades de propagación de las ondas P y S de los sedimentos y del basamento (Figura 30).

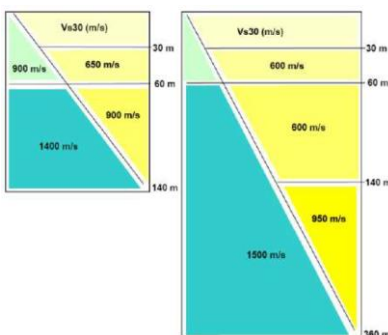
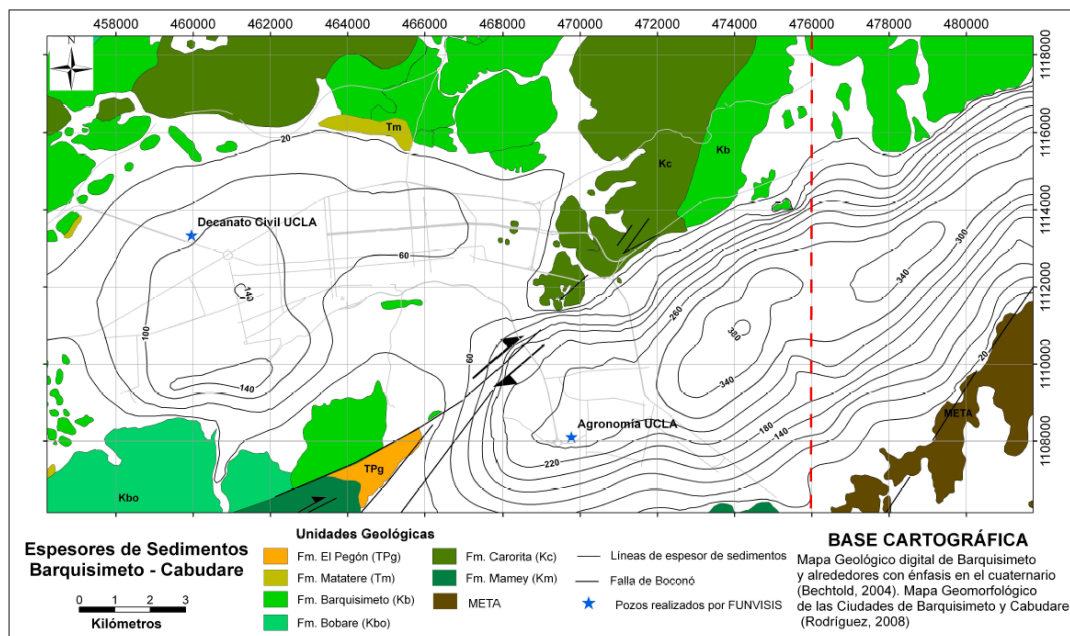


Figura 30. Modelo geológico/geofísico con velocidades Vs para los sedimentos de la terraza aluvial de Barquisimeto (izquierda) y para los sedimentos que rellenan la Cuenca de Tracción de Cabudare (derecha).

Como base para el modelado gravimétrico 3D sirvieron unas 670 mediciones gravimétricas, así como la información de profundidad proveniente de la conversión de períodos (Figura 29) a profundidad, las perforaciones geotécnicas profundas, así como los resultados de la sísmica como control. Se pudieron determinar profundidades del espesor de sedimentos de máximo 140 m en Barquisimeto y cercanas a 400 m en Cabudare (Figura 31).



de Caracas (Schmitz *et al.*, 2011), ajustadas las microzonas a los límites catastrales. Mediante la calibración del modelo de subsuelo con estudios geofísicos y registros sísmicos en los observatorios acelerográficos en Barquisimeto y Cabudare se efectuaron comparaciones con los espectros de respuesta para estas microzonas (Morales *et al.*, 2015). Los espectros (Figura 33) son asociados a cada microzona en el Área Metropolitana de Barquisimeto-Cabudare (Figura 34).

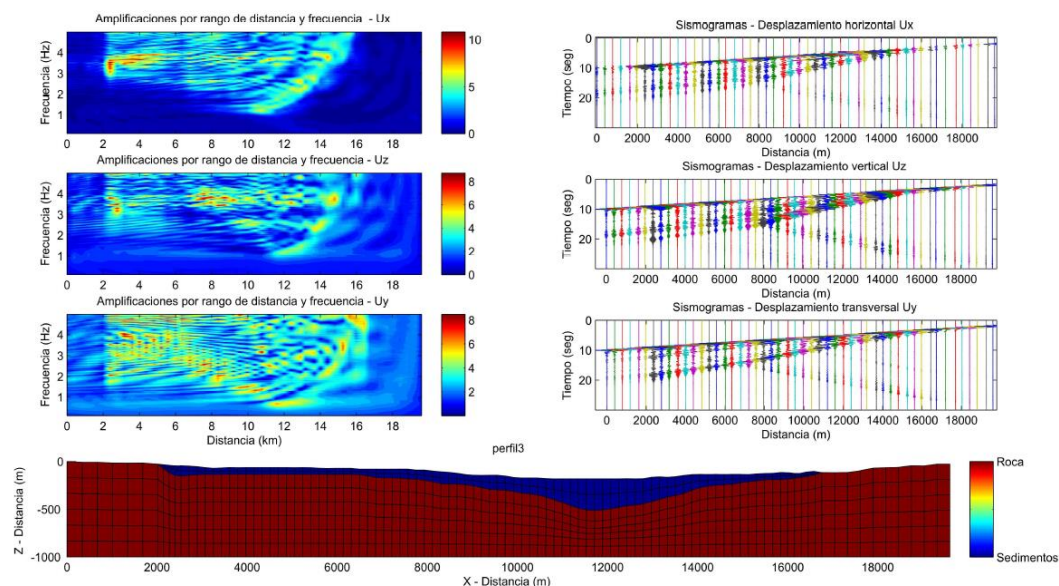


Figura 32. Amplificaciones y sismogramas sintéticos de las 3 componentes (Ux y Uy Horizontal, Uz vertical) de un perfil en dirección sureste – noroeste desde la terraza de Barquisimeto a la cuenca de Cabudare (Abreu *et al.*, 2016).

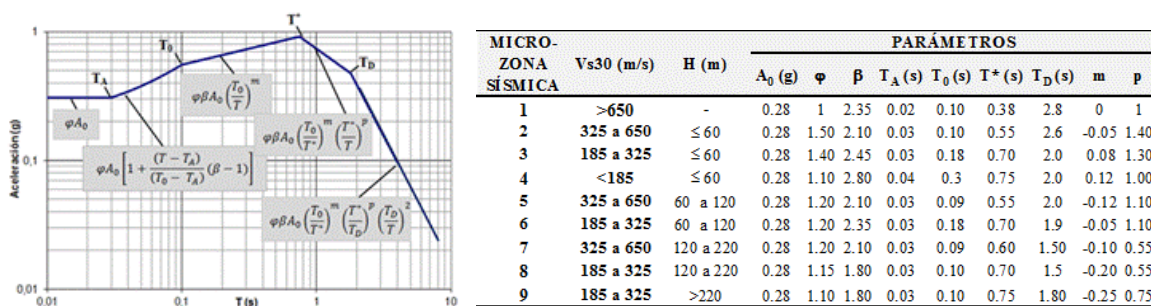


Figura 33. Espectro Elástico para el Área Metropolitana de Barquisimeto-Cabudare según Hernández *et al.* (2011) (izquierda) con los respectivos parámetros para su construcción (derecha).

Las ordenanzas municipales fueron preparadas junto con las respectivas alcaldías y concejos municipales (Schmitz *et al.*, 2017) y publicadas en el año 2018 (Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes del Municipio Iribarren, 2018; Ordenanza de Microzonificación Sísmica del Municipio Palavecino, 2018). Dentro de las ordenanzas, la evaluación de vulnerabilidad de las edificaciones en las diferentes microzonas y su eventual reforzamiento estructural y sismorresistente dentro de los planes de gestión del riesgo toman un lugar importante. Se basan en gran parte en la distribución de las edificaciones en

Barquisimeto y Cabudare (Rojas et al., 2016; Figura 35) y en la evaluación de edificaciones tipificadas (Hernández y Domínguez, 2009) y se realizó la sectorización de las ciudades, siendo de mayor urgencia el reforzamiento de las edificaciones escolares (López et al., 2015).

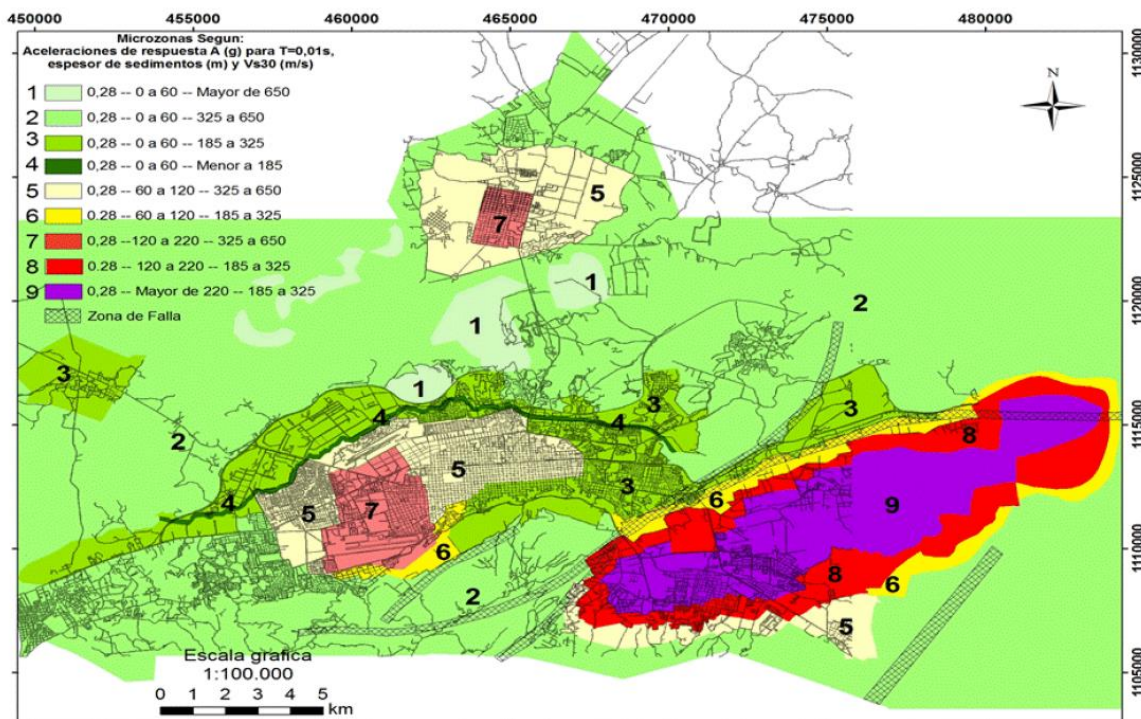


Figura 34. Mapa de microzonas sísmicas y fallas activas del Área Metropolitana de Barquisimeto-Cabudare (García et al., 2016).

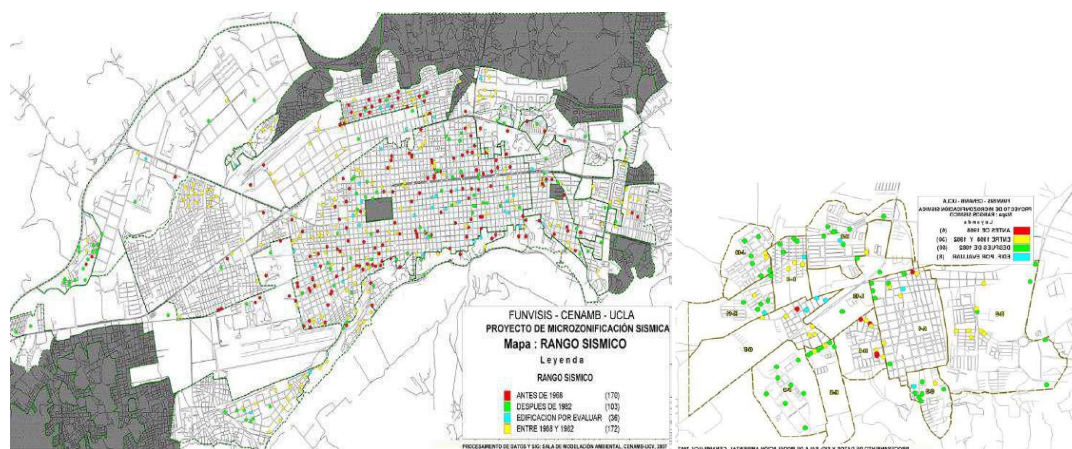


Figura 35. Mapa de ubicación de la información levantada en Barquisimeto (izquierda) y Cabudare (derecha) por año de construcción (Rojas et al., 2016).

Para la evaluación de las edificaciones existentes se requirió una interacción con las comunidades y alcaldías, a las cuales se impartieron cursos de sistemas de información geográfica (SIG) para el manejo de la información recopilada en el proyecto en el marco de los planes de gestión del riesgo.

5.3 Carora y otras ciudades en el Estado Lara (El Tocuyo, Quíbor, Duaca)

En el marco del Proyecto de Microzonificación Sísmica del Estado Lara iniciado en el año 2006, que contó con el apoyo económico de la Gobernación del Estado Lara y FUNVISIS, se realizaron estudios en las ciudades Carora, El Tocuyo, Quíbor y Duaca. La ciudad de Carora está ubicada en el borde suroriental de la cuenca con el mismo nombre, sobre sedimentos cuaternarios, depositados discordantemente sobre rocas de las formaciones Barquisimeto (Cretácico Superior) y Matatere (Paleoceno – Eoceno) (Figura 36) en una zona de moderada sismicidad con un valor A0 de 0,18 g (Hernández y Schmitz, 2019).

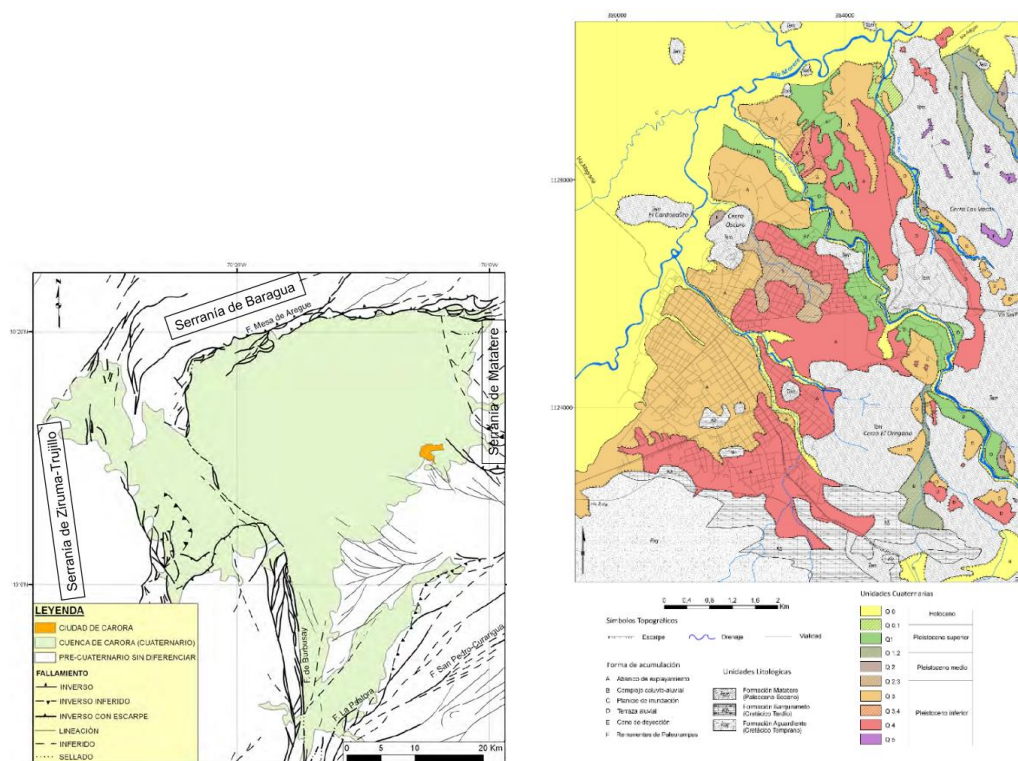


Figura 36. Ubicación de la ciudad de Carora respecto a la cuenca Sabana de Carora y su marco estructural (izquierda) y mapa geológico de Carora y alrededores (derecha) (Ávila et al., 2014, modificado de Oropeza, 2012).

La evaluación del subsuelo se inició con mediciones gravimétricas en el marco del proyecto Tupure-Carora (Cooperación FUNVISIS-PDVSA-INTEVEP), para el cual se procesaron 915 datos correspondientes a la cuenca Sabana de Carora; adicionalmente, se midieron 86 puntos en la ciudad de Carora con una distancia aproximada de 500 m entre puntos (Martínez, 2007). Se adquirieron 192 mediciones de ruido ambiental con una duración de 20 minutos y una distancia entre puntos de aproximadamente 250 m; resultaron valores de los períodos de vibración del suelo entre 0,6 y 1,7 s con valores menores a 0,6 s en el sur y oeste (Paolini, 2006). Mediante la adquisición de perfiles largos de refracción de microtemores (ReMi) se pudieron determinar profundidades a un basamento sísmico con Vs de 1600 m/s entre 75 y 135 m (Figura 37; Duque et al., 2011).

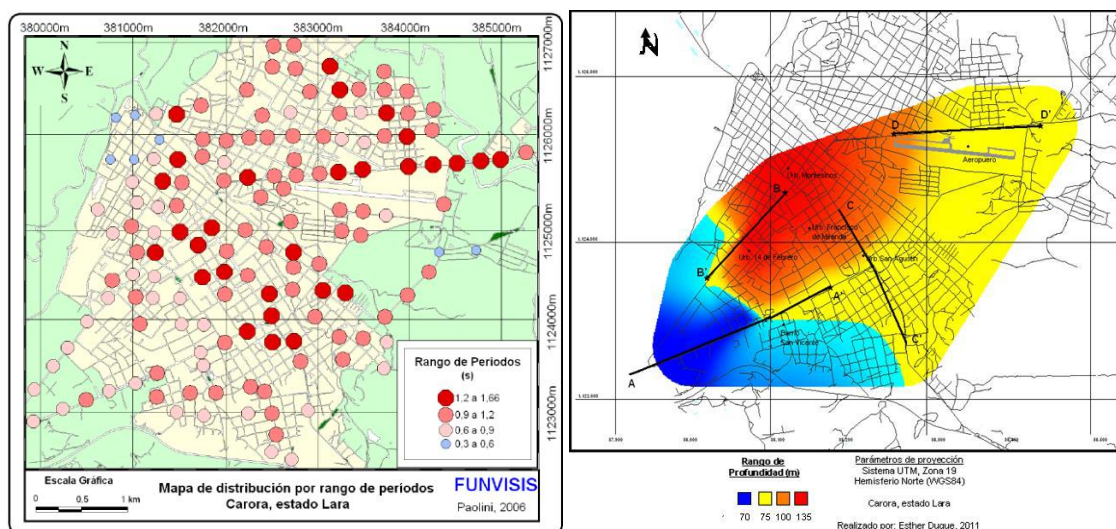


Figura 37. Períodos de vibración del suelo de Carora (izquierda; Paolini, 2006) y mapa de espesores obtenido mediante ReMi, considerando que la velocidad de ondas S del basamento es mayor a 1600 m/s (derecha; Duque et al., 2011).

Zerpa (2019) aplicó la técnica de decremento aleatorio (RayDec; Hobiger et al., 2009) para la inversión de las curvas de elipticidad de las ondas Rayleigh a los datos de Paolini (2006), lo que permitió desarrollar perfiles de Vs versus profundidad con espesores entre 30 y 230 para Vs del basamento entre 1250 m/s y 1550 m/s para la Formación Matatere (Centro, Norte y Este de Carora) y entre 1550 m/s y 1800 m/s para la Formación Barquisimeto (suroeste de Carora) con un valor promedio del basamento sísmico de Vs = 1400 m/s (Figura 38).

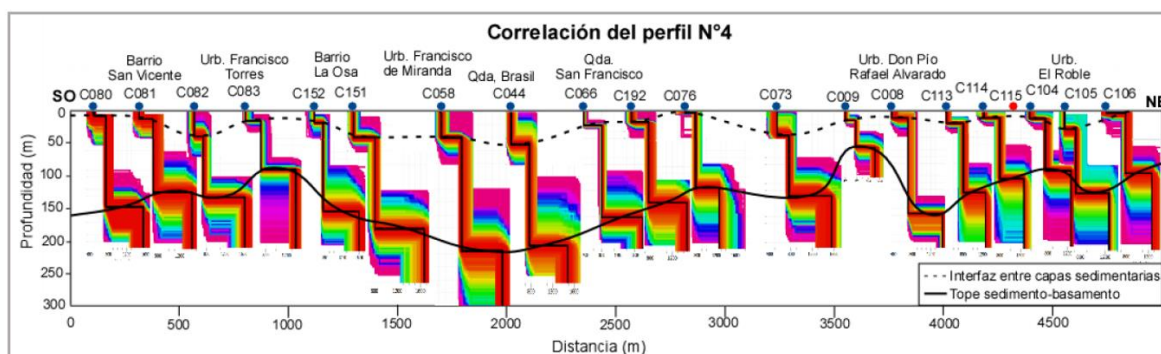


Figura 38. Perfiles 1-D de Vs/profundidad obtenidos con la técnica RayDec a lo largo de un perfil de orientación SO-NE en Carora (Zerpa, 2019).

Con la integración de la información disponible (gravimétrica, H/V, ReMi) y los perfiles Vs mediante la inversión RayDec (Figura 38), se elaboraron mapas de espesores de sedimentos de Carora clasificados en 3 rangos (30-80 m, 80-150 m y 150-230 m) y de Vs30 inferido desde el relieve (siguiendo la metodología de Allen y Wald, 2009) clasificado en 2 rangos, de 200-400 m/s y mayor a 400 m/s (Figura 39). Para estimar la respuesta sísmica en superficie se desarrollaron evaluaciones de la amenaza sísmica en roca y en los sitios sedimentarios mediante relaciones de atenuación apropiadas (Hernández et al., 2021). Basado en el análisis

de los resultados se distinguen dos microzonas sísmicas, una en sedimentos someros de hasta 80 m con $V_{s30} > 400$ m/s, y otra con V_{s30} de 200-400 m/s y profundidad del basamento sísmico mayor a 80 m (diferenciada para espesores menores y mayores de 110 m). Se especificaron los espectros de diseño asociados a cada una, para diferentes períodos de retorno (PMR = 225, 475, 689 y 975 años). Los espectros de respuestas (Figura 40; Schmitz et al., 2023b) deberán ser implementados a través de una ordenanza municipal que oriente las nuevas construcciones, así como la gestión del riesgo sísmico de las edificaciones existentes, tal como lo estipula la norma COVENIN 1756 (2019).

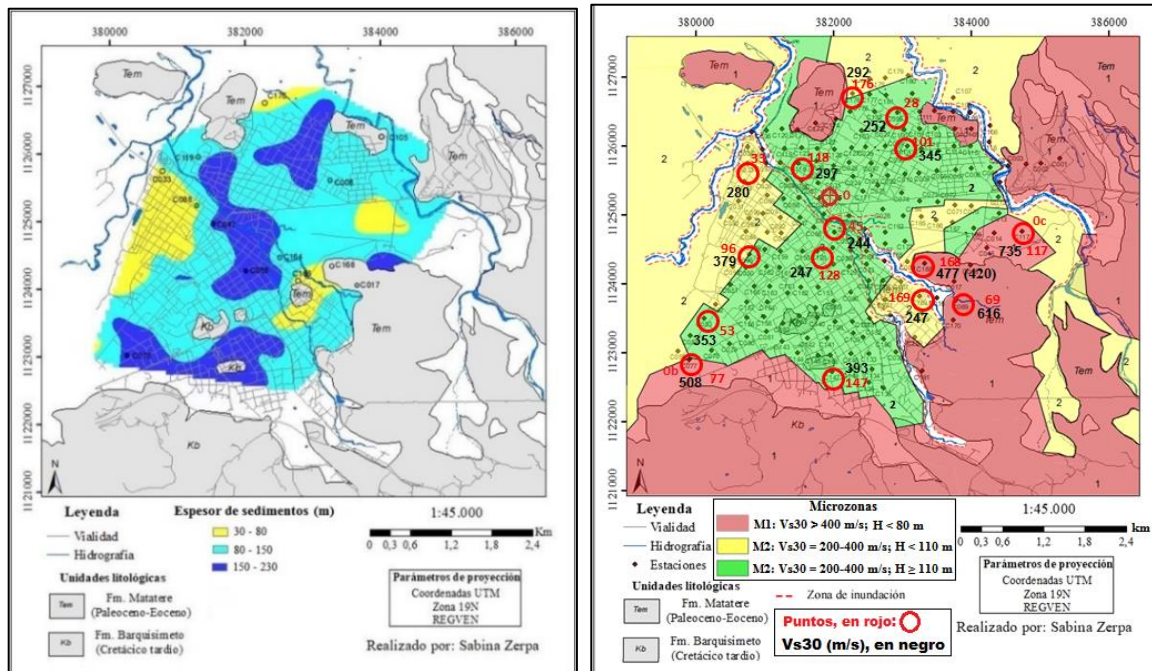


Figura 39. Mapa de espesores de sedimentos de Carora clasificado en 3 rangos en Carora (izquierda). Mapa de microzonas sísmicas de Carora; se muestran los sitios de evaluación de la respuesta sísmica indicando V_{s30} (derecha; Zerpa, 2019).

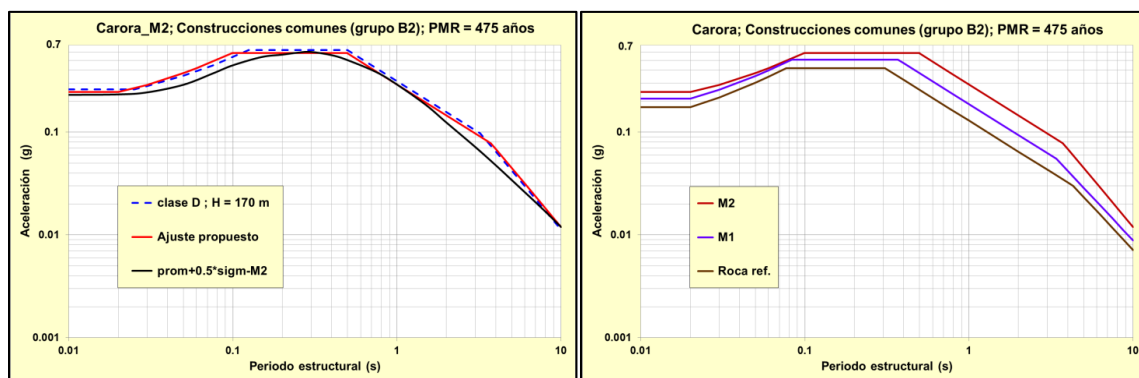


Figura 40. Espectro representativo, ajuste propuesto y normativo para la microzona M2 (izquierda) y espectros ajustados en roca y para las microzonas M1 y M2 (derecha) para PMR = 475 años (Schmitz et al., 2023b).

El Tocuyo se encuentra ubicado en la cercanía de importantes fallas, como es el sistema de fallas de Boconó, responsables de la elevada amenaza sísmica de $A_0=0,33$ g (Hernández y Schmitz, 2019). Entre las fallas que podrían generar rupturas en superficie en El Tocuyo se presentan las fallas de Boconó, Río Tocuyo y Hato Viejo (a la cual se le atribuye el sismo del 3 de agosto de 1950; Figuras 41 y 42). El Tocuyo, ubicado en un valle cuaternario (Figura 41, izquierda), fue parcialmente destruida por el terremoto del 3 de agosto de 1950 con una magnitud de $\sim 6,9$ y una profundidad estimada de 27 km con una intensidad epicentral MCS de entre X y XI (Fiedler, 1961).

Los trabajos realizados en El Tocuyo comprendieron estudios geológicos (Colón, 2009) y geofísicos (Aray, 2008; Duque et al., 2011; Ávila et al., 2012; 2016) con el fin de determinar microzonas sísmicas preliminares basados en la integración de información del subsuelo y plantear espectros de respuesta asociados a ellas (Silva et al., 2023).

El mapa de Vs 30 (Figura 41, derecha) se desarrolló aplicando la metodología de Allen & Wald (2009) basada en el análisis de la topografía, integrado con resultados de mediciones sísmicas. La distribución de los resultados de Vs30 observados está relacionada con la geología de El Tocuyo, en su mayoría terrazas, las cuales fueron identificadas por zonas planas muy erosionadas, encontrándose éstas sobre rocas pertenecientes a la Formación Morán (Paleoceno-Eoceno), específicamente a su Miembro de Lutitas de El Tocuyo (Colón, 2009).

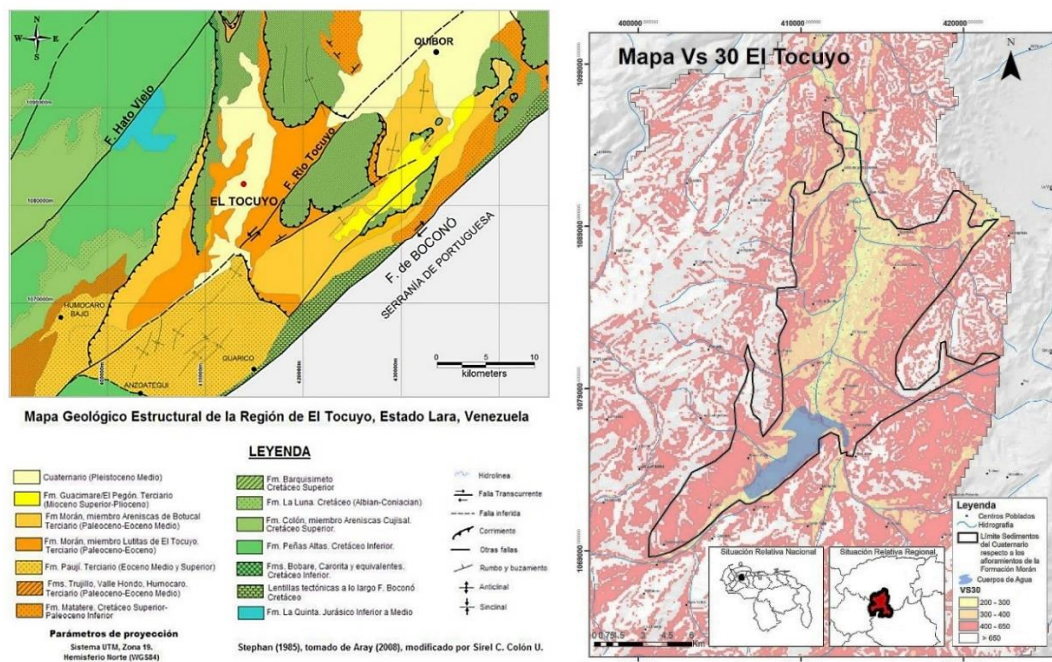


Figura 41. Mapa geológico estructural de la región El Tocuyo (izquierda; Silva et al. 2023; modificado de Stephan, 1985) y mapa de Vs30 por topografía (derecha; Silva et al. 2023)

Basado en los análisis de mediciones de ReMi se obtuvieron para los primeros 30m velocidades Vs entre 250m/s y 450m/s. Los sedimentos no consolidados poseen un espesor

promedio de 60m y están asociados a velocidades de 540m/s y los sedimentos consolidados están caracterizados por velocidades de 900m/s, cuyas capas tienen espesores promedios de 50m (Figura 42, izquierda). Se considera que la base de la cuenca sedimentaria del Cuaternario la forman tanto lutitas como areniscas, por lo cual la respuesta sísmica no necesariamente está dominada por el tope de las formaciones, sino por un estrato que supere un Vs de aproximadamente 1200 m/s que podría ubicarse a cierta profundidad dentro de las lutitas de la Formación Morán o en el tope de las formaciones Colón y Barquisimeto.

Para la realización del mapa de microzonas sísmicas se empleó el mapa de profundidad al basamento sísmico y el mapa de Vs30. Se establecieron perfiles de respuesta sísmica con variación de litología para una orientación general, teniendo como referencia información geotécnica. Se definieron para El Tocuyo 4 grupos de microzonas sísmicas preliminares (Figura 42, derecha), basado en los valores Vs30. Las bajas velocidades Vs30 de 200 - 300 m/s (grupo MS-4) se deben a los sedimentos aluvionales con un relieve bajo en el centro de la cuenca. Hacia los bordes de la cuenca se encuentran microzonas sísmicas correspondientes a los grupos MS-3 (con Vs30 de 300-400 m/s) y MS-2 (propiedades intermedias con Vs30 de 400-650 m/s), diferenciados por su profundidad al basamento (hasta 150 m o más de 150 m). En las zonas de alto relieve topográfico predomina los grupos MS-2 y MS-1 (roca). Las partes bajas de la cuenca (grupo de microzonas sísmicas MS-4) podrían ser propensos a fenómenos de licuación del suelo, mientras en la zona de alta topografía (grupos de MS-1 y MS-2) podría haber un peligro de deslizamientos.

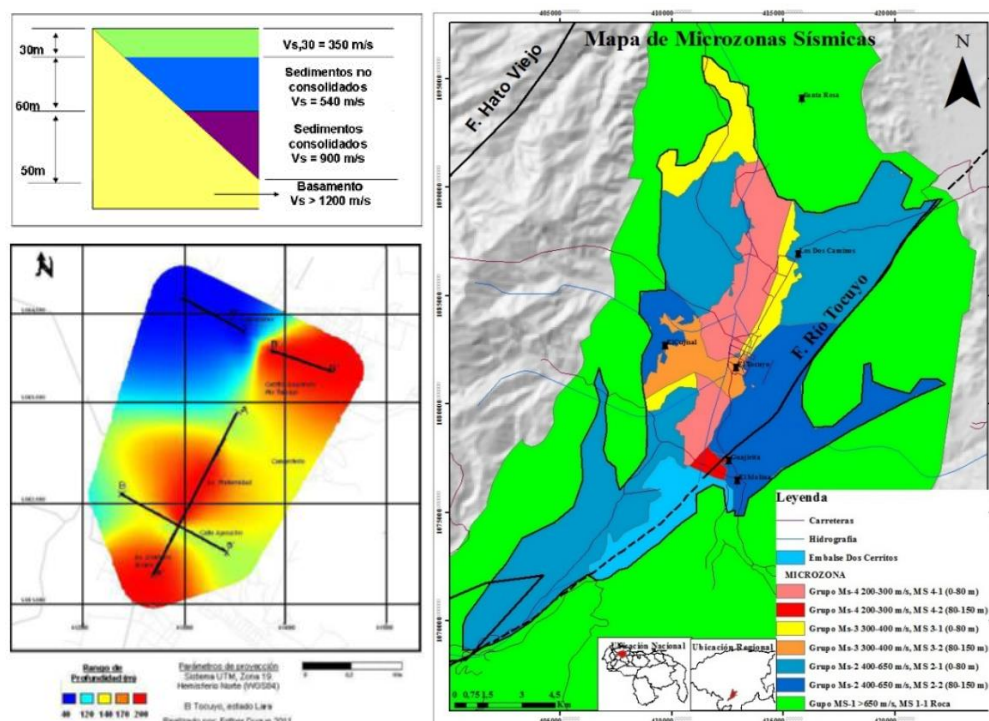


Figura 42. Izquierda: Esquema de velocidades de ondas de corte de El Tocuyo (arriba) basado en el análisis de perfiles ReMi (abajo; Duque et al., 2011). Derecha: Mapa de microzonas sísmicas preliminares para El Tocuyo (Silva et al., 2023).

La ciudad de Quíbor (Municipio Jiménez) se ubica al sur de la depresión del Valle de Quíbor (Figura 41, izquierda), una región fértil de gran producción agrícola. Se ubica cercano a la Falla Río Tocuyo; el valor de la amenaza sísmica A0 es 0,25 g (Hernández y Schmitz, 2019). Para la caracterización del subsuelo de la ciudad se realizaron investigaciones geológicas y geofísicas (Valls, 2008; Wurst, 2010; Duque et al., 2011; Ávila et al., 2012; 2016). Se midió el ruido ambiental en 158 sitios en la zona, obteniendo períodos predominantes entre 0,2 s en la cercanía de los afloramientos de la Formación Morán y 1,6 s en la zona más distante a los afloramientos (Figura 43).

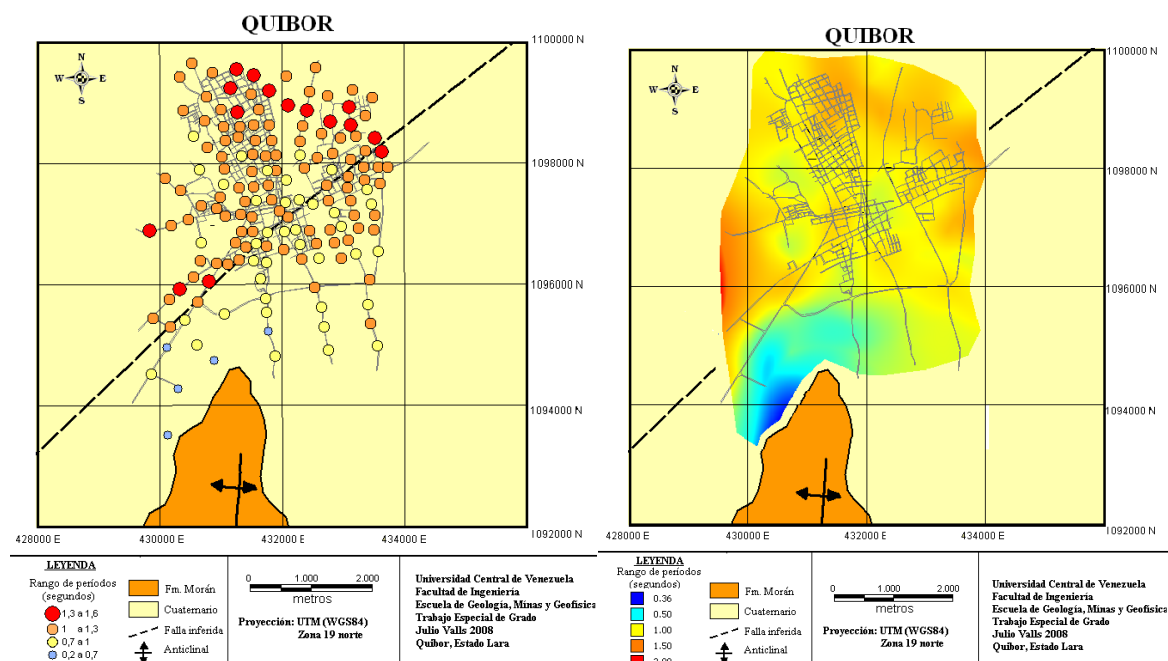


Figura 43. Ubicación de mediciones de ruido ambiental y los resultantes períodos predominantes de Quíbor (izquierda) y mapa con los valores interpolados de períodos predominantes del suelo (derecha) (Valls, 2008).

Basado en los resultados de perfiles ReMi se obtuvieron espesores de sedimentos de aproximadamente 200 m con Vs30 promedio de 350 m/s y velocidades Vs de 550 m/s hasta 110 m de profundidad y 840 m/s hasta el tope del basamento con 1300 m/s (Duque et al., 2011). Para el modelado 3D de los espesores de sedimentos se realizaron unas 200 mediciones gravimétricas distribuidas en la ciudad de Quíbor (Figura 44) y en toda la depresión del Valle de Quíbor (Figura 45). Tanto a nivel de la ciudad de Quíbor como en todo el valle se observan variaciones importantes en los espesores de sedimentos, que varían entre 250 y 400 m con una topografía importante del tope de roca (Formación Morán). En la parte montañosa del municipio Jiménez se activó en el año 2012 un deslizamiento que abarcó gran parte del pueblo de Cubiro. Se trata de deslizamientos fósiles reactivados por las filtraciones de nuevos desarrollos y falta de mantenimiento de quebradas, lo que requiere el reasentamiento de una parte de la población (Dasco et al., 2013).

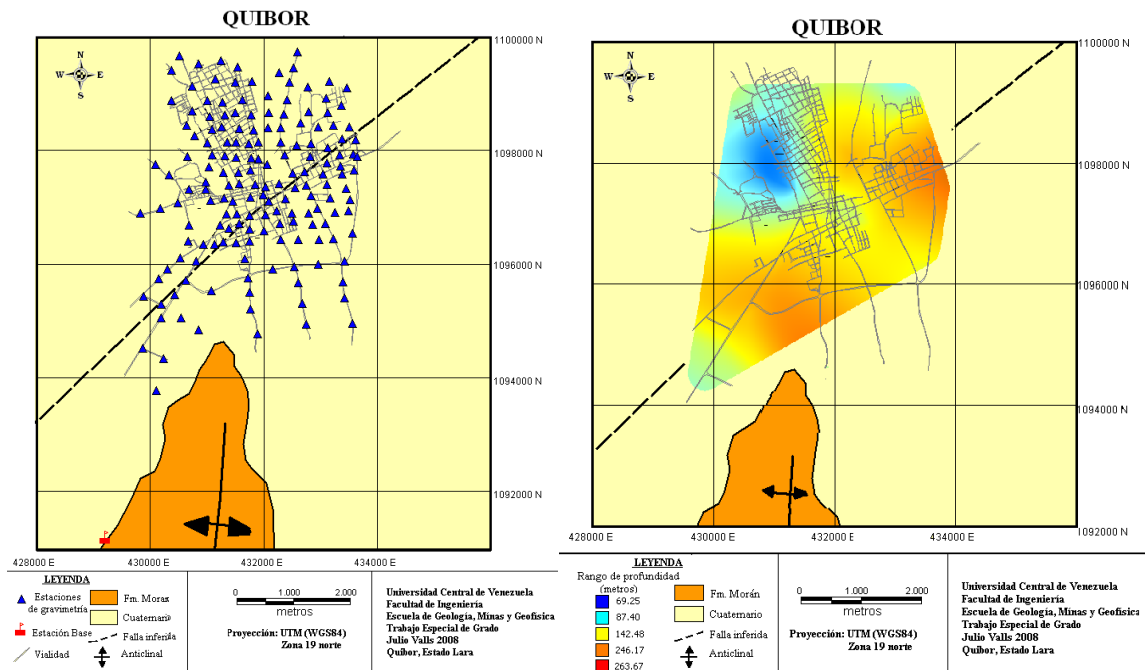


Figura 44. Ubicación de mediciones gravimétricas (izquierda) y espesores de sedimentos (derecha) en la cercanía de la ciudad de Quíbor (Valls, 2008).

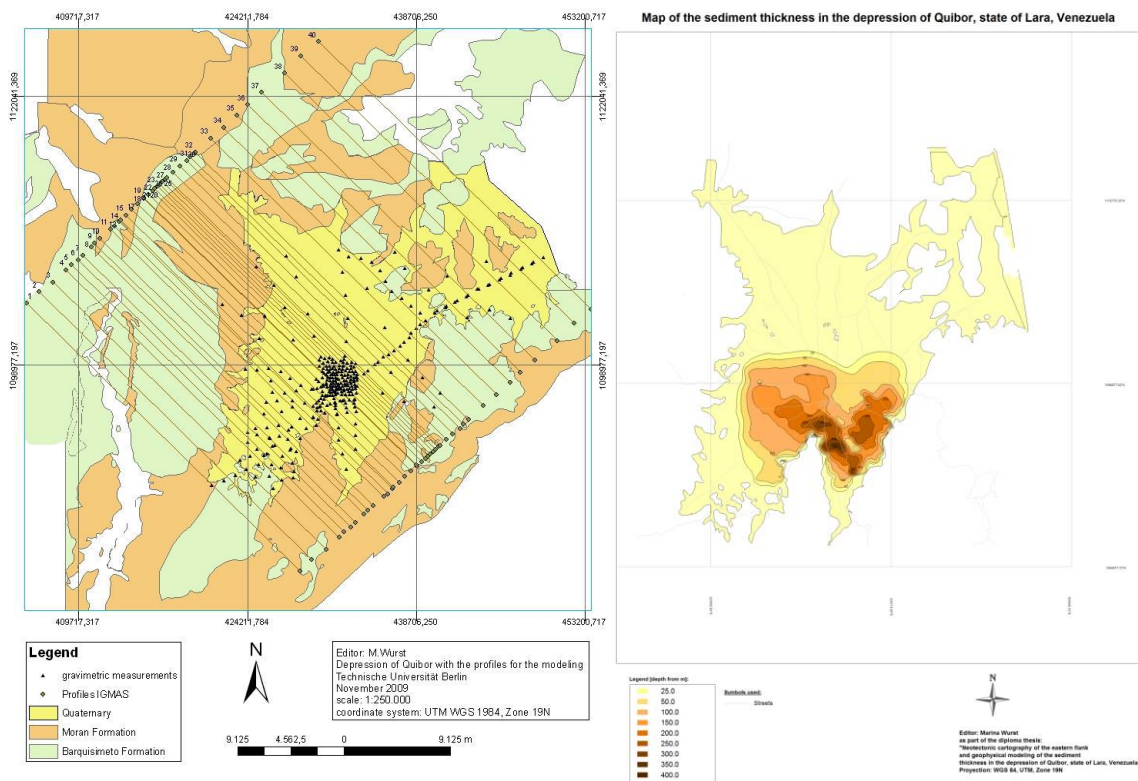


Figura 45. Mediciones gravimétricas (izquierda) y espesores de sedimentos (derecha) en la depresión de Quíbor (Wurst, 2010).

Duaca (Municipio Crespo) está ubicada unos 35 km al noreste de Barquisimeto en una meseta montañosa. Las investigaciones geofísicas incluyeron 48 mediciones de ruido ambiental y 106 mediciones gravimétricas (Hernández, 2008), así como 3 perfiles ReMi (Duque et al., 2011). Los períodos fundamentales resultantes varían entre 0,2 s sobre sitios en la Formación Bobare y 0,91 s en la parte central de Duaca (Figura 46; Hernández, 2008).

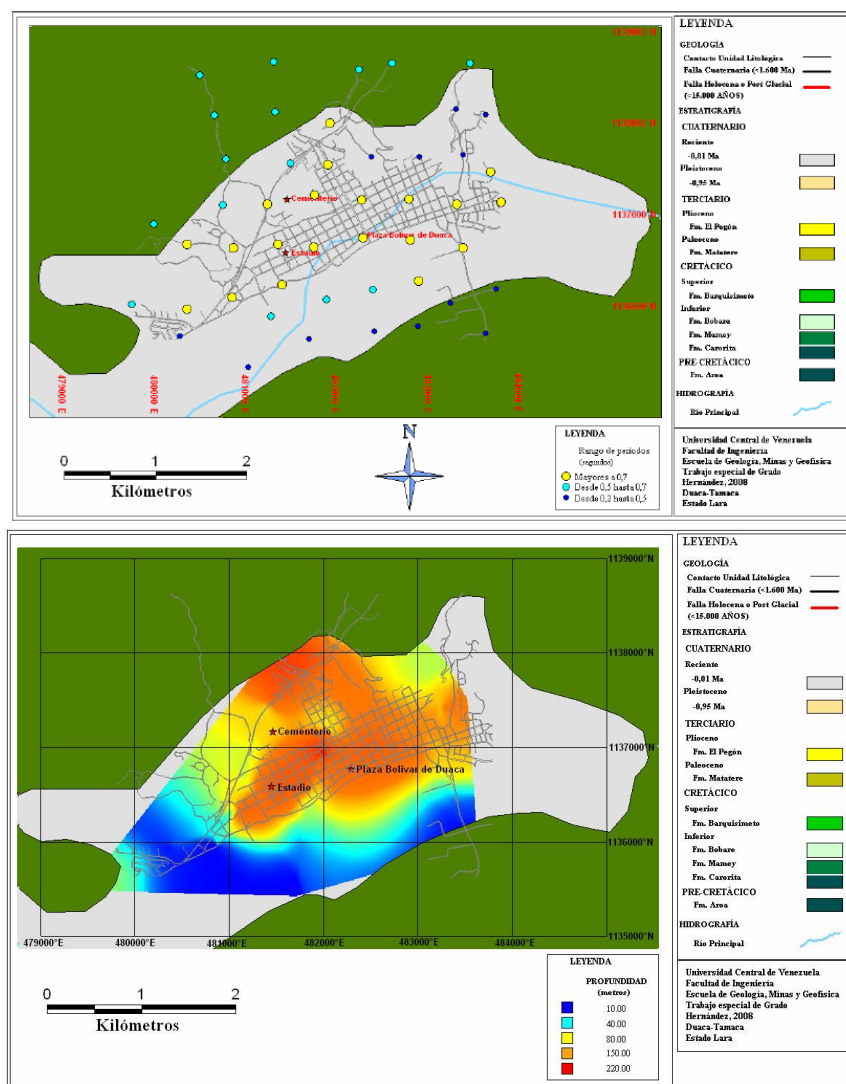


Figura 46. Mapa de períodos fundamentales (arriba) y mapa de espesores de sedimentos (abajo) de Duaca (Hernández, 2008; geología base de Bellizia y Rodríguez, 1968, modificado de Bechtold, 2004).

Los espesores de sedimentos (Figura 46, abajo) se determinaron mediante modelado gravimétrico 3D tomando como control los espesores obtenidos por perfiles ReMi (Duque et al., 2011). Los máximos espesores de 220 metros se ubican en el centro de Duaca con valores promedio de Vs30 de 400 m/s, seguido por sedimentos no consolidados con Vs de 700 m/s hasta unos 100 m de profundidad y en la parte baja sedimentos consolidados con Vs de 1170 m/s.

5.4 Cumaná y ciudades en el Estado Sucre (Carúpano, Cariaco)

Cumaná, ubicada en el extremo norte de la Serranía del Interior, se encuentra asentada sobre sedimentos fluvio-deltaicos del río Manzanares y de la llanura costera. La traza de la falla de El Pilar, que separa las placas del Caribe y de Sudamérica (al este de Venezuela), cruza la ciudad, por lo cual Cumaná es una de las ciudades venezolanas más afectadas por sismos destructores a lo largo de los años (1530, 1684, 1766, 1797, 1853, 1929 y 1997; Grases et al., 1999). Por ello, hay un gran número de estudios para la mitigación del riesgo sísmico.

A comienzos de los años 90, se evaluó la seguridad sísmica del hospital de Cumaná por estar ubicado muy cerca de la traza de la Falla El Pilar (e.g. OPS, 1995). Posterior al terremoto de Cariaco de 1997 se realizaron mediciones de ruido ambiental (Abeki et al., 1998b), pudiendo correlacionarse los periodos predominantes mayores a 1 s con los sedimentos deltaicos del río Manzanares y los depósitos marinos costeros (Figura 47). Grases et al. (2005), llevaron a cabo un proyecto de investigación sobre mitigación y prevención de amenazas naturales en la ciudad de Cumaná, para lo cual realizaron una amplia recopilación de información e identificaron cinco áreas con ciertas restricciones para el desarrollo urbano, considerando su geología, geomorfología, geotecnia y amenazas naturales. Theilen-Willige (2002) analizó los lineamientos al sur de Cumaná con miras hacia la amenaza sísmica y el peligro de deslizamientos. En el año 2001 se realizaron mediciones sísmicas en torno al hospital para precisar la ubicación de la Falla El Pilar (Schmitz et al., 2006) y en el año 2009 se inició el Proyecto de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Cumaná (LOCTI) por FUNVISIS. El Centro de Investigación en Gestión Integral de Riesgos (CIGIR, Mérida) gestionó con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) un proyecto de Microzonificación Sísmica en Cumaná con la Universidad de Oriente (años 2017-2018) y posteriormente con Total Energies proyectos para la socialización de las amenazas (EDURIESGO 3.0 y APPMENAZAS 1.0, años 2019-2020).

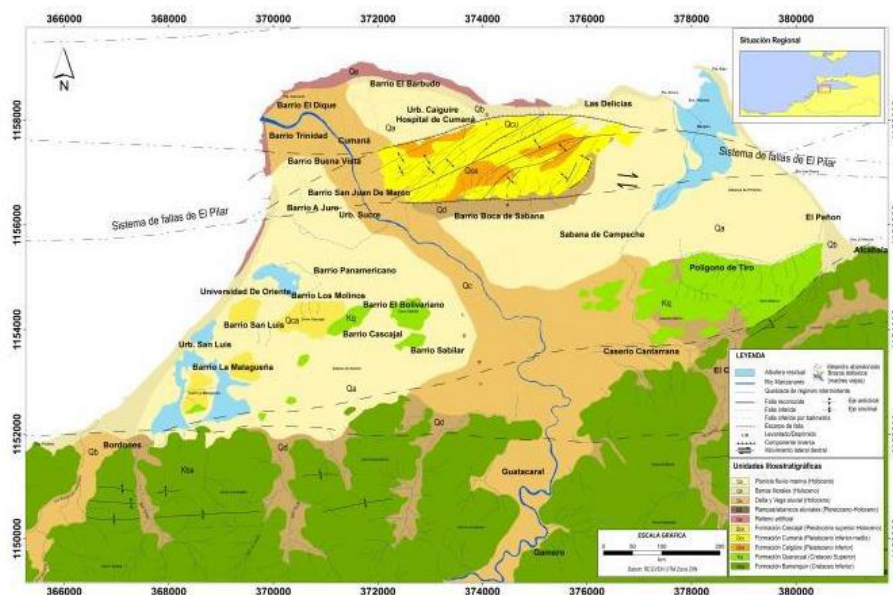


Figura 47. Geología de Cumaná, ubicada al norte de la Serranía Interior (Aray et al., 2015, basada en Viete, 2012).

La caracterización del subsuelo de la ciudad de Cumaná se realizó a través de la integración de estudios geofísicos de ruido sísmico ambiental (Aray et al., 2010; 2015), gravimetría (Cruces et al., 2008), sísmica de refracción (Schmitz et al., 2006; Román, 2011) e información de una perforación geotécnica (Oropeza, 2011), lo cual permitió obtener un mapa preliminar de microzonas de igual respuesta sísmica.

Se adquirieron más de 200 estaciones de ruido sísmico ambiental, con un espaciamiento entre ellas de 250 y 500 m, confirmando los resultados las observaciones de Abeki et al. (1998b) con valores encima de 1 s (1-1,4 s) al sur de la desembocadura del río Manzanares y en la zona costera, así como al este del Cerro de Caigüire entre el aeropuerto y la costa en el antiguo delta del río Manzanares (Figura 48, izquierda). Hacia los afloramientos de la Serranía del Interior en el sur, los valores bajan a 0,1 s. Se realizaron además análisis de las características de las curvas H/V con picos en diferentes rangos de períodos (F. Bonive, comunicación personal, 2018). La evaluación de las intensidades del sismo de Cariaco de 1997 realizada sobre todo en el centro de Cumaná, muestra la coincidencia de intensidades entre VI y VII con zonas de mayor período fundamental del suelo (Figura 48, derecha).

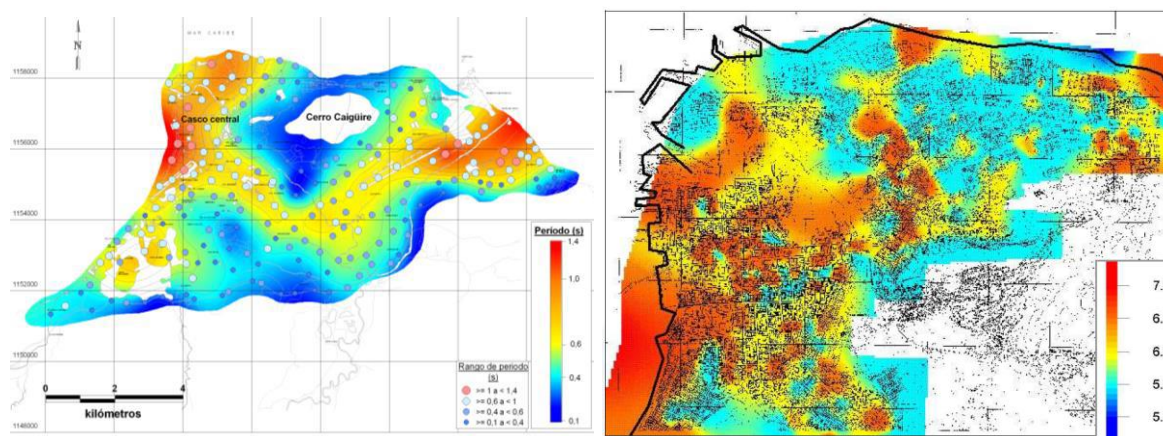


Figura 48. Izquierda: Mapa de períodos fundamentales de vibración del suelo de Cumaná (Aray et al., 2015). Derecha: Intensidades MMI del sismo de Cariaco de 1997 en Cumaná (Lang et al., 2004).

El mapa de Vs30 se obtuvo aplicando la metodología de Allen y Wald (2009) a la topografía (Figura 49, izquierda). Los valores obtenidos por García (2019) mediante el análisis de mediciones MASW coinciden en gran medida, mostrando valores menores con Vs30 entre 150 y 200 m/s en la barra litoral. Para determinar la profundidad de los sedimentos cuaternarios, así como de la profundidad al tope de los estratos cretácicos (formaciones Querecual y Barranquín) se analizaron aproximadamente 700 estaciones gravimétricas con un espaciamiento promedio de 250 m (Cruces, 2008) mediante un modelado 3D, usando como amarre los resultados de 4 perfiles sísmicos (Román, 2011; Schmitz et al., 2006), una perforación hasta 230 m de profundidad (Oropeza, 2011) y los períodos fundamentales del suelo (Aray et al., 2010). El comportamiento observado en los mapas de anomalías gravimétricas refleja un fuerte gradiente causado por una secuencia de altos y bajos valores de anomalías, orientados E-O, asociado con la estructura *pop-up* del Cerro Caigüire y el

sistema de fallas de El Pilar (J. Sánchez, comunicación personal, 2018). Estos factores estructurales condicionaron la acumulación de sedimentos en las zonas de interacción tectónica; se determinaron los mayores espesores de sedimentos cuaternarios en la zona de la actual desembocadura del río Manzanares en el centro con más de 60 m y en el antiguo delta del río Manzanares en el este con más de 300 m (Figura 49, derecha). Farías (2017) determinó profundidades al tope de los estratos cretácicos aún mayores (más de 800 m) mediante la inversión 1D de datos de ruido ambiental a lo largo de 2 perfiles. Indica velocidades V_s para los sedimentos cuaternarios de 200-700 m/s, de los sedimentos terciarios (Formación Caigüire) entre 1000 y 1300 m/s y del tope del Cretácico entre 1700 y 3200 m/s.

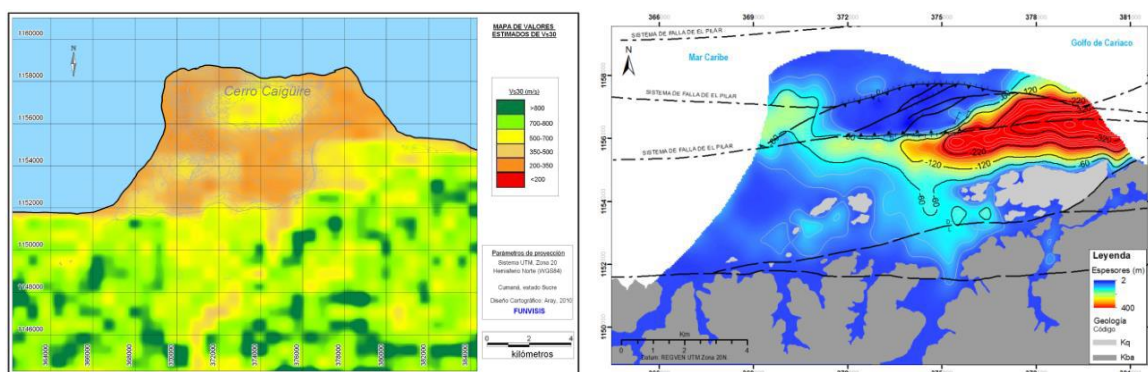


Figura 49. Izquierda: Mapa de V_{s30} basado en el análisis de la topografía (Aray et al., 2010). Derecha: Mapa de espesores de sedimentos cuaternarios obtenidos a partir del modelado gravimétrico para la ciudad de Cumaná (Aray et al., 2015).

Considerando los efectos de licuación observados durante el terremoto de Cariaco de 1997, Olivier (2009) aplicó los procedimientos de Idriss y Boulanger (2004) y Cetin et al. (2001) a los datos provenientes de más de 100 perforaciones geotécnicas, calibrando los valores V_s con datos sísmicos. Las zonas cercanas a la costa y en la desembocadura del río Manzanares, así como una delgada franja en el sur, resultaron con alto a muy alto potencial de licuación (Figura 50). Para determinar las amplificaciones y su variabilidad frecuencial, se realizó un modelado de la respuesta sísmica de Cumaná para frecuencias de 0.5 y 1 Hz (Abreu y Schmitz, 2009). Las mayores amplificaciones se observaron para sismos lejanos para la frecuencia de 0,5 Hz y para sismos lejanos para 1 Hz. Basado en el valor de amenaza en roca de $A_0 = 0,54$ g (COVENIN 1756 (2019) se elaboraron espectros preliminares para las microzonas (J.J. Hernández, comunicación personal, 2018). Sin embargo, estos no se finalizaron, ya que la prórroga prevista del proyecto BID del CIGIR no fue aprobada.

Mediante la integración de los estudios geológicos y geofísicos se generó un mapa de microzonas sísmicas preliminares donde se delimitaron aquellas regiones de igual respuesta sísmica (Figura 51). Del Cerro de Caigüire hacia la costa, así como en dos partes al sur, se presentan suelos duros o sedimentos terciarios (formaciones Caigüire y Cumaná) o cretácicos (Formación Querecual) aflorando, o ubicados a poca profundidad, en la Microzona 1-1 con V_{s30} entre 325 y 650 m/s. Al norte de la desembocadura del río Manzanares y las zonas centro-sur de la ciudad se ubican en la Microzona 1-2 con espesores de sedimentos menores

a 60 m y V_{s30} entre 185 y 325 m/s. Al sur, a lo largo del río Manzanares, los espesores de sedimentos aumentan a 60 a 120 m (predominantemente Microzona 2-2 con V_{s30} entre 185 y 325 m/s). Los grupos de microzonas 3 y 4, con espesores de sedimentos de 120 a 220 m y mayores a 220 m, respectivamente, se ubican en el este de Cumaná.

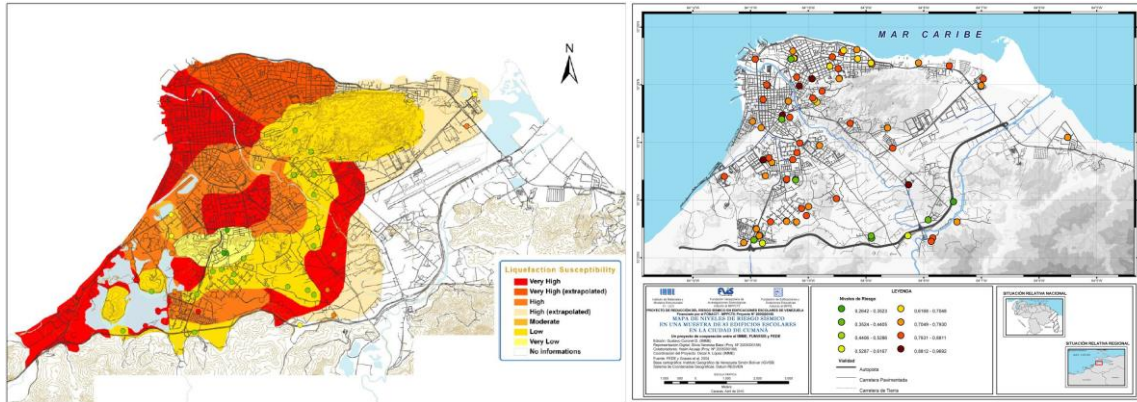


Figura 50. Izquierda: Mapa del peligro de licuación determinista de Cumaná para un sismo de magnitud 6.9 (Olivier, 2009). Derecha: Niveles de riesgo sísmico para 83 escuelas de Cumaná (Coronel y López, 2010).

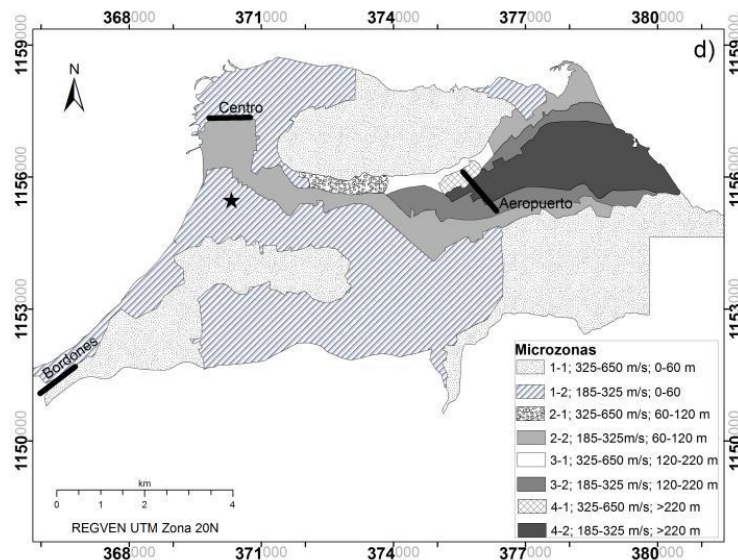


Figura 51. Mapa de microzonas sísmicas preliminares para la ciudad de Cumaná (Aray et al., 2015). La estrella indica la ubicación de la perforación geotécnica de Oropeza (2011). Las líneas negras indican la ubicación de los perfiles sísmicos de Román (2011).

Debido a los daños en las escuelas ocasionados durante el terremoto de Cariaco 1997 en el estado Sucre, se analizaron las edificaciones escolares en Venezuela (López et al., 2015). Coronel y López (2010) evaluaron el nivel del riesgo sísmico para las edificaciones escolares en el Estado Sucre y presentaron para Cumaná un mapa con el nivel de riesgo para 83 escuelas (Figura 50, derecha) para su priorización en planes de gestión del riesgo. Para varias edificaciones escolares ya se dispone de planes detallados para su reforzamiento. Es urgente

la finalización de la microzonificación sísmica de Cumaná con la elaboración de los espectros respectivos y su implementación en ordenanza municipal, así como la puesta en marcha del plan de gestión del riesgo con los respectivos reforzamientos para mitigar el riesgo sísmico.

En el marco de los proyectos en torno al Complejo Industrial Gran Mariscal de Ayacucho (CIGMA) se evaluó la amenaza sísmica en Carúpano, ubicado al norte de la península de Paria (Molina et al., 2008). La aceleración pico (A0) para PMR de 500 años fue evaluada en 0,41 g para el puerto de Carúpano, algo mayor que los 0,35 g según la norma COVENIN 1756 (2019). La ciudad está ubicada en un valle aluvional que suprayace a rocas de las formaciones Carúpano y Tunapui (Figura 52).

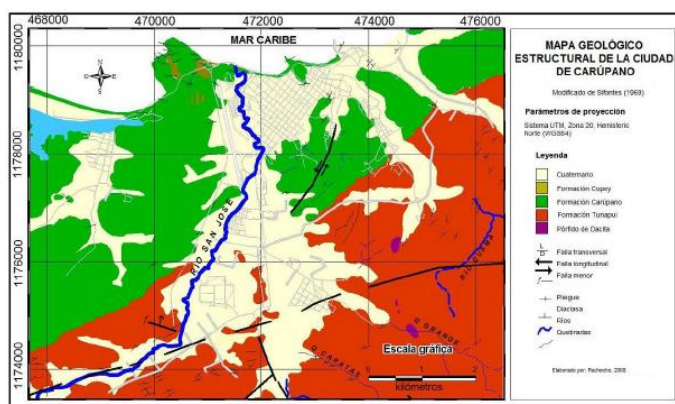


Figura 52. Ubicación de Carúpano sobre sedimentos cuaternarios (Molina et al., 2008).

Se realizaron mediciones de ruido ambiental y gravimetría para determinar los períodos predominantes del suelo y el espesor de los sedimentos (Pacheco, 2008; Paolini et al., 2009). Los máximos valores de períodos se observaron en el centro de Carúpano con 1.1s, disminuyendo hacia los bordes de la cuenca (Figura 53, izquierda). Los espesores de sedimentos determinados por el modelado gravimétrico 3D alcanzan valores hasta 60 m de profundidad (Figura 53, derecha), mientras que los espesores determinados por la inversión de las mediciones de ruido ambiental, aplicando los métodos de RayDec o campo difuso, superaron los 150 m (Hinojosa et al., 2021; Figura 54, izquierda).

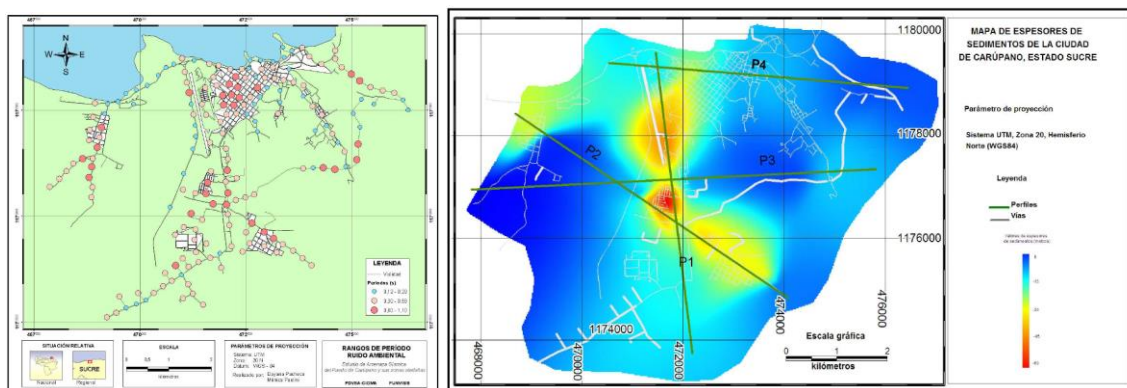


Figura 53. Izquierda: Períodos predominantes del suelo. Derecha: Espesores de sedimentos de Carúpano basados en el modelado gravimétrico (Molina et al., 2008).

Acosta et al. (2021) generaron un mapa de Vs30 de Carúpano aplicando la metodología de Allen y Wald (2009) al modelo digital del terreno (Figura 54, derecha). Los valores de Vs30 varían dentro del valle aluvional de Carúpano entre 200 y 400 m/s y aumentan hacia las laderas con los afloramientos de las formaciones Carúpano y Tunapui.

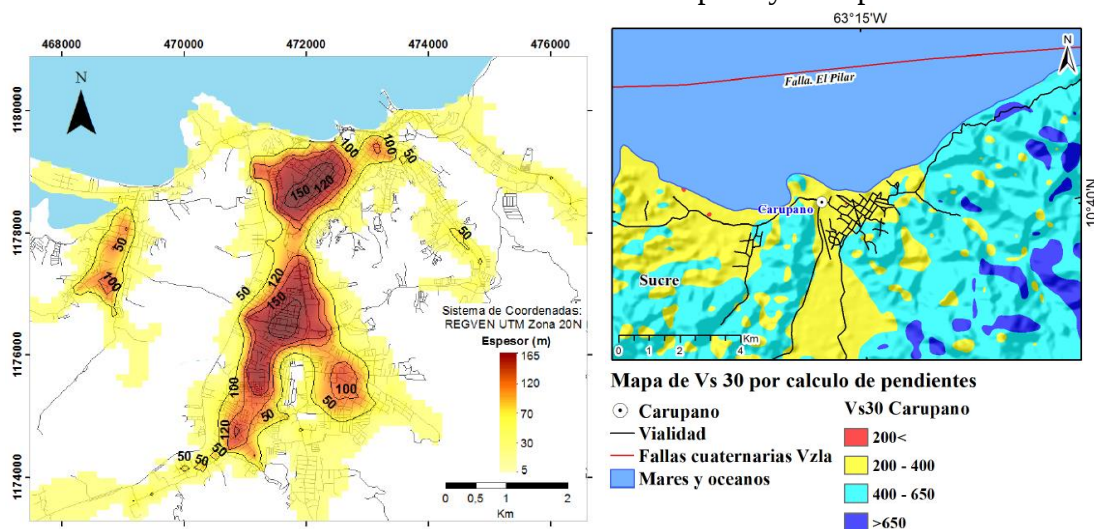


Figura 54. Izquierda: Mapa de espesores de sedimentos basado en la inversión de datos de mediciones de ruido ambiental (Hinojosa et al., 2021). Derecha: Mapa de Vs30 de Carúpano (Acosta et al., 2021).

La diferencia en el espesor de sedimentos entre los modelados de gravimetría y los espesores basados en mediciones de ruido ambiental podría resultar de la definición del basamento sísmico. En el perfil de velocidades Vs determinados por la inversión de las mediciones de ruido ambiental con el método RayDec (Hinojosa et al., 2021; figura 55), destaca el valor de Vs = 1.500 m/s como límite entre los sedimentos y el basamento, lo que resulta en espesores máximos de 150 m; los depocentros coinciden con las zonas de mayor período de vibración del suelo. A la profundidad indicada por los modelos gravimétricos (60 m), la velocidad del basamento sería de Vs = 1.100 m/s. Para la definición del basamento sísmico, al igual que para la definición de las microzonas sísmicas, deberían considerarse los resultados de la evaluación de la respuesta sísmica por realizarse.

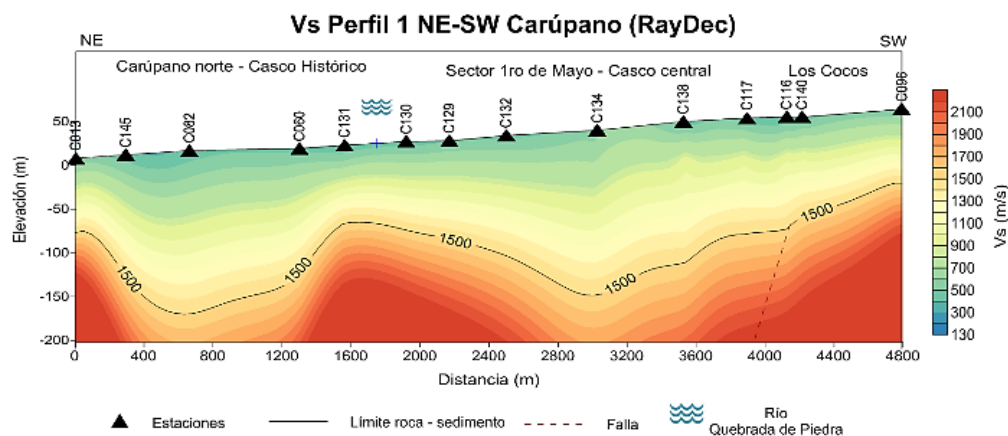


Figura 55. Perfil Vs en Carúpano en dirección NE-SW basado en la inversión de las curvas de elipticidad de las ondas de Rayleigh (Hinojosa et al., 2021) utilizando la metodología RayDec (Hobiger et al., 2009).

El terremoto de Cariaco de 1997, de magnitud 6,9, considerado el más destructivo en Venezuela desde el terremoto de Caracas de 1967, ocurrió a lo largo de la falla El Pilar, en el este de Venezuela. Causó 73 muertos y 531 heridos; los daños a las edificaciones se concentraron principalmente entre la ciudad de Cariaco, ubicada a 10 km del epicentro, y Cumaná, capital del estado Sucre, a unos 70 km al oeste (e.g. FUNVISIS et al., 1997). En Cariaco se produjo el colapso de dos escuelas, daños en un banco y un hotel en construcción, así como la destrucción de una parte importante de las casas de bahareque locales. Los edificios escolares estaban ubicados sobre suelo de baja capacidad portante y presentaban irregularidades estructurales; la aplicación de códigos antiguos y una estructura deficiente contribuyeron al colapso (López et al., 2015). Muchas de las casas de bahareque, así como una camaronera local, se vieron afectadas por la licuación y deslizamiento lateral (De Santis y Hernández, 1999; Figura 56). En la región, incluyendo los pueblos de Chiguana y Casanay, 2000 casas tuvieron que ser demolidas, 4000 sufrieron daños y una grave escasez de agua y electricidad. Dos tercios de los edificios escolares se vieron afectados (29 fueron demolidos), así como los hospitales de Cariaco y Cumaná. Se observó una ruptura en superficie de la Falla El Pilar de 0,4 – 1 m de desplazamiento a lo largo de 35 km. El valor A0 de la amenaza en roca es 0,54 g según la norma COVENIN 1756 (2019).

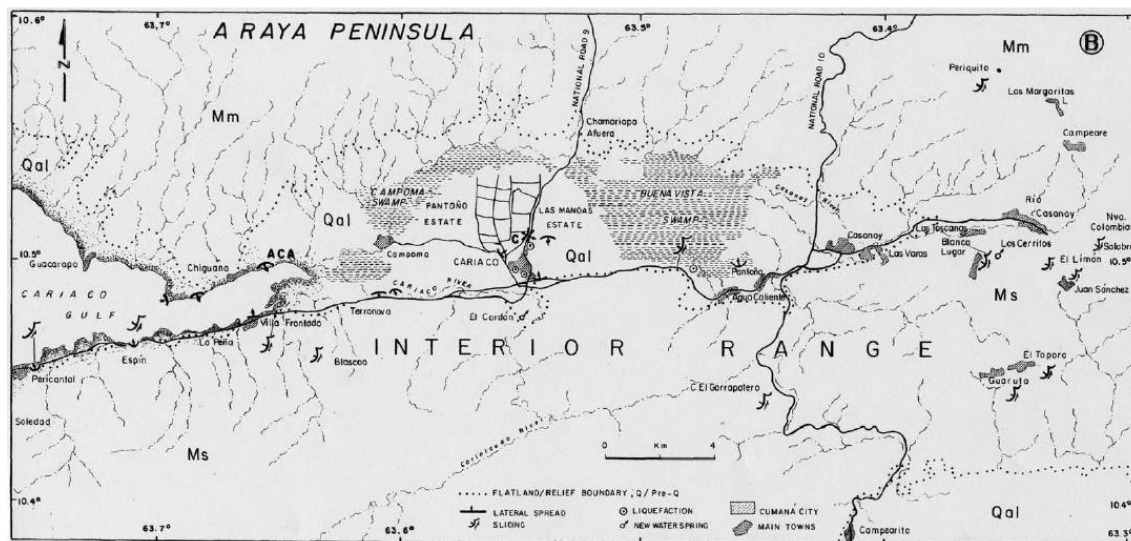


Figura 56. Efectos inducidos por el terremoto de Cariaco en la cuenca sedimentaria de Cariaco. Sitios con deslizamiento lateral: C = Carretera 9 (al norte de Cariaco), ACA = Aquacam C.A. Qal = Sedimentos aluviales cuaternarios, Ms = Rocas sedimentarias mesozoicas, Mm = Unidades metamórficas mesozoicas (González et al., 2004).

Se realizaron estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos para caracterizar las condiciones del suelo en Cariaco y sus alrededores, incluyendo mediciones de microtemores en 64 sitios (Figura 57) y refracción sísmica enfocadas en suelos blandos (Masaki et al., 1999; González et al., 2004). Los períodos predominantes del suelo varían entre 0,6 y 1,2 s. De los estudios de sísmica de refracción se localizó una interfaz que separa los sedimentos con velocidades de ondas S inferiores a 700 m/s de los más rígidos, a una profundidad de 60 a 90 m en la zona sur de Cariaco, profundizándose hacia el norte. Se realizaron 12 perforaciones geotécnicas hasta 22 m de profundidad; predominan suelos degradables sísmicamente y saturados de agua, con alto potencial de licuación (De Santis y Hernández, 1999).

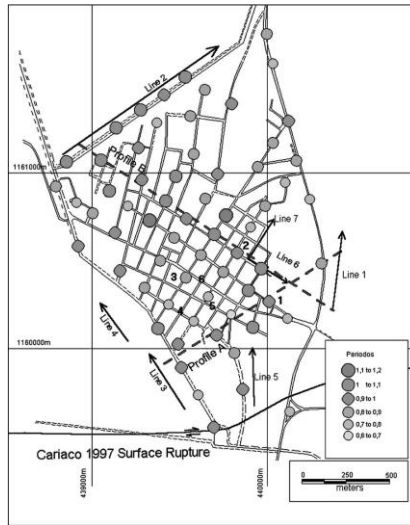


Figura 57. Mapa de períodos predominantes de Cariaco. Las areniscas y calizas del Cretácico afloran unos 500 m al sur de la ruptura de superficie, que separa el suelo blando al norte de los sedimentos más consolidados al sur. Los números indican la ubicación de las líneas de sísmica de refracción (González et al., 2004).

De un modelado gravimétrico, en el cual se identificaron rocas metamórficas de la cordillera Araya – Paria en el norte y rocas sedimentarias de la Serranía del Interior en el sur, se estimó la cobertura sedimentaria con una profundidad máxima de 270 m en el centro de la cuenca, con areniscas y calizas del Mio-Plioceno por debajo. Los espesores disminuyen hacia el sur, donde alcanzan 120 m en el contacto con la falla (Figura 58). A escala regional, la cuenca tiene un espesor de sedimentos de 1,5 km (Schmitz et al., 2005).

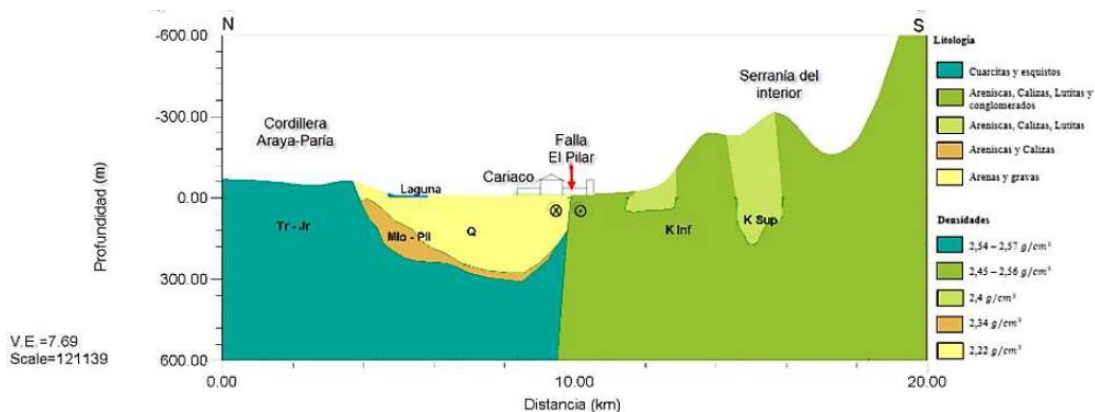


Figura 58. Modelo gravimétrico de Cariaco (Crasto et al., 2021).

El alto porcentaje de daños en el centro de Cariaco se puede atribuir a la mala calidad de las viviendas, combinada con la presencia de suelos poco consolidados de gran espesor y, en algunos casos particulares originados por fenómenos de licuación. Las obras de refuerzo sísmico constituyen una tarea urgente a realizar, ya que aún existen numerosos edificios escolares vulnerables en la región. La finalización de los estudios de microzonificación sísmica con el cálculo de la respuesta en superficie y el desarrollo de ordenanzas municipales proporcionarían a Cariaco herramientas para construir edificios más seguros en el futuro.

5.5 Ciudades en el marco del proyecto Gestión Integral del Riesgo en Espacios Urbanos

En el año 2008 se inició el proyecto Investigación Aplicada a la Gestión del Riesgo en Espacios Urbanos en las áreas metropolitanas de Mérida, Valencia, Maracay y Barcelona, así como en Valle de La Pascua (Figura 59; Garcés et al., 2009; Vernáez et al., 2011; Schmitz et al., 2015). Desde el punto de vista sísmico, la mayor amenaza está asociada a las zonas cercanas a los principales sistemas de fallas en el norte y la zona andina del país (*e.g.* Grases, 1999). Valle de La Pascua se seleccionó como ciudad con potencial crecimiento futuro en el Eje Norte Llanero. Se estudiaron aspectos relacionados con la presencia de las diferentes amenazas en las regiones tales como el peligro de inundaciones asociado a las quebradas que cruzan la ciudad y el peligro de deslizamientos tanto en las laderas como en el borde de la terraza de Mérida. En Valencia y Maracay se estudiaron las amenazas hidrometeorológicas asociadas a las cuencas del río Cabriales (Valencia), de los ríos El Limón y El Castaño (Maracay) y el Lago de Valencia, así como las amenazas tecnológicas de las zonas industriales. En el Área Metropolitana del Norte de Anzoátegui (Barcelona, Lechería, Puerto La Cruz y Guanta) destacan, aparte de la amenaza sísmica, el peligro de inundaciones por el río Neverí, la amenaza de deslizamientos, especialmente en el municipio Guanta, y la importante amenaza tecnológica por la refinería de Puerto La Cruz. No se ha logrado una integración de los diferentes riesgos; los resultados parciales de la amenaza sísmica han sido utilizados en la planificación urbana, faltando el desarrollo de los espectros en superficie para una mejor estimación de los efectos esperados, y por tanto una confiable herramienta para la mitigación del riesgo sísmico

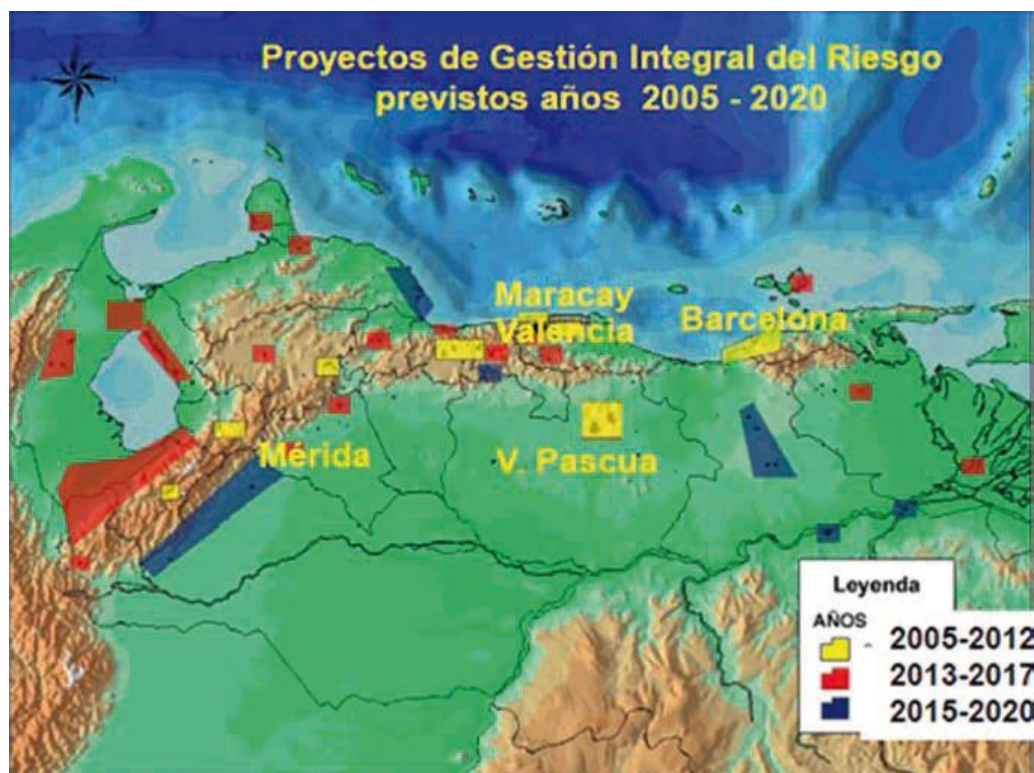


Figura 59. Ubicación de las ciudades del proyecto de gestión integral del riesgo y otros proyectos planteados a realizarse hasta el año 2020 (Schmitz et al., 2015).

5.5.1 Área Metropolitana de Valencia

La geología del Área Metropolitana de Valencia (AMV) está caracterizada por las unidades de la Asociación Metamórfica del Ávila; Complejo San Julián y esquistos Las Brisas y Las Mercedes al norte y el Complejo Tinaco y la Asociación meta-volcánica de Villa de Cura al sur. En el centro, la cuenca del Lago de Valencia tiene una geomorfología dominada por las planicies lacustrinas y aluviales cercano al lago y los valles aluviales y, en la transición a las rocas del Complejo San Julián aflorando, el piedemonte (Figura 60). El valor A0 de la amenaza en roca es 0,15 g según la norma COVENIN 1756 (2019), considerablemente menor que los 0,3 g de la norma anterior (COVENIN 1756, 2001).

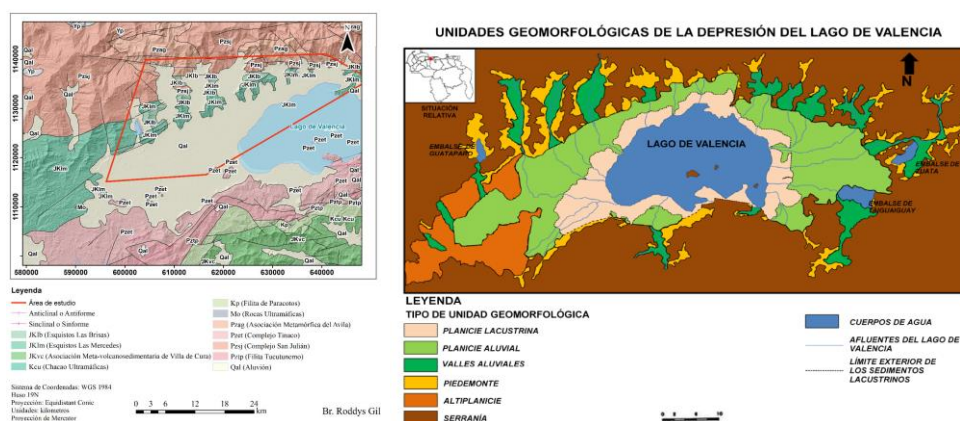


Figura 60. Izquierda: Mapa geológico de la zona de estudio en Valencia (modificado de Hackley et al., 2006). Derecha: Unidades geomorfológicas en la región de Valencia (tomado de Zinck, 1980) (Gil, 2021).

Mediante un modelado 3D gravimétrico, Romero (2017) evaluó los espesores de sedimentos en la cuenca del Lago de Valencia basado en la compilación de 580 datos terrestres y datos satelitales con datos sísmicos de amarre (Rocabado et al., 2011). Los valores máximos en la cuenca alcanzan unos 300 m en la parte oeste y 350 m en la parte este de la cuenca (Figura 61).

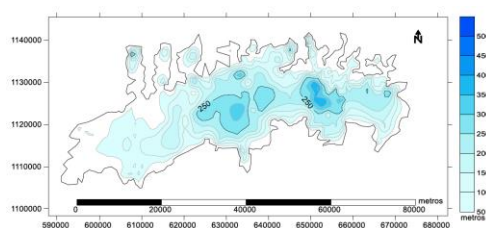


Figura 61. Mapa de espesores de sedimentos de la cuenca del Lago de Valencia (Romero, 2017).

Localmente, se alcanzaron grandes profundidades de sedimentos en los valles aluviales con más de 300 m en el caso del valle de Valencia (Goitia, 2012), comprobados por una perforación de 240 m de profundidad (Schmitz et al., 2015). Sin embargo, los períodos predominantes del suelo, alrededor de 1,4 s en Valencia, no reflejan estos grandes espesores (Figura 62).

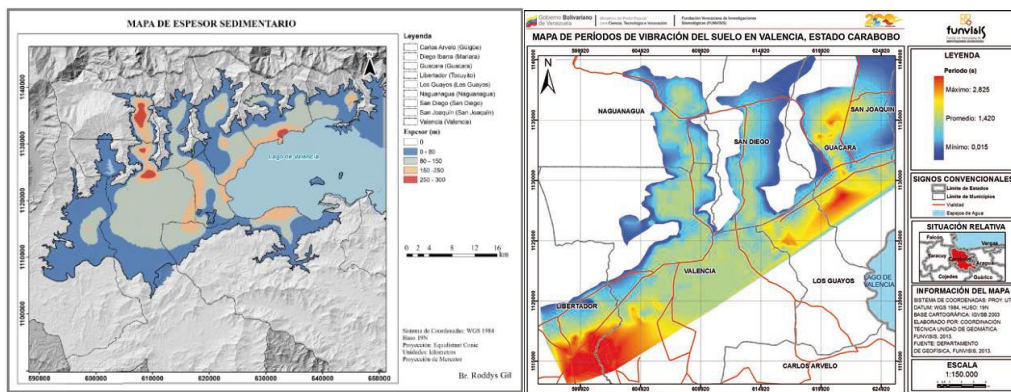


Figura 62. Izquierda: Mapa de espesor sedimentario integrado (Gil, 2021). Derecha: Mapa de períodos de vibración del suelo (Rocabado et al., 2011; Schmitz et al., 2015).

Para definir las microzonas sísmicas preliminares (Figura 63, derecha), se usaron los mapas de Vs30 (Figura 63, izquierda) y de espesores sedimentarios (Figura 62, izquierda). Para el mapa Vs30 se recopiló información proveniente de perforaciones geotécnicas, datos obtenidos por iMASW (interferometric Multichannel Analysis of Surface Waves) (Mijares et al., 2021) y por el análisis de la topografía (Parra et al., 2016). Las zonas cercanas al lago con litología predominante de arenas limosas y arcillosas muestran velocidades de Vs30 entre 200 y 300 m/s. En el mapa de microzonas sísmicas preliminares se integraron además el potencial de licuación, determinado mediante la aplicación de un procedimiento simplificado propuesto por Idriss y Boulanger (2004) (Pombo et al., 2014), y las fallas activas de la zona (Paolini et al., 2012; Singer et al., 2014).

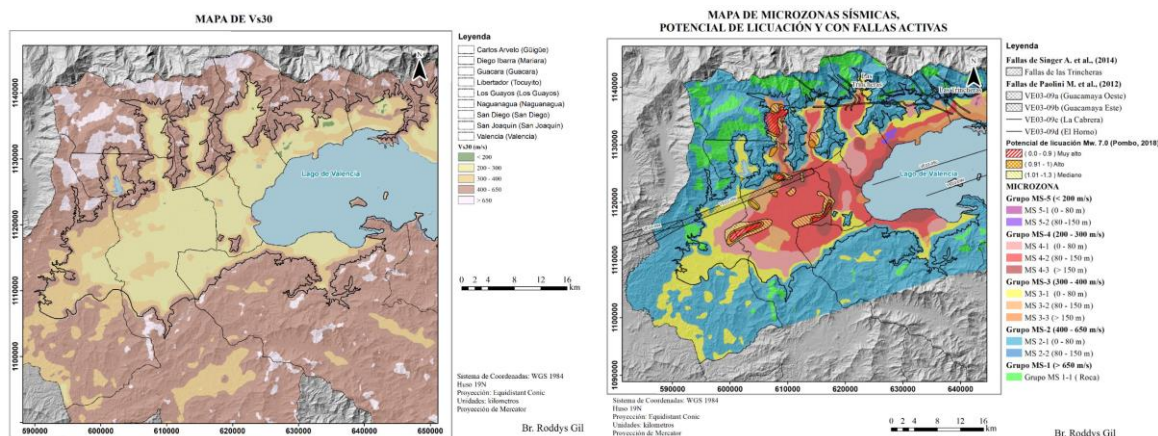


Figura 63. Izquierda: Mapa de Vs30 integrado. Derecha: Mapa de Microzonas sísmicas preliminares a partir de los datos de Vs30 integrado y el mapa de espesor sedimentario, así como el potencial de licuación y fallas activas (Gil, 2021).

Muchas edificaciones del AMV presentan un riesgo sísmico alto y requieren de revisiones especializadas para su adecuación estructural (Pombo, 2018). Si bien en la norma COVENIN 1756 (2019) los valores de la amenaza sísmica en roca disminuyeron, es importante considerar las amplificaciones por los espesores de sedimentos y los bajos valores de Vs30 y elaborar ordenanzas municipales y planes de prevención sísmica en los municipios del AMV.

5.5.2 Área Metropolitana de Maracay

El Área Metropolitana de Maracay (AMM) está delimitada en el norte por las unidades de la Asociación Metamórfica del Ávila, el Complejo San Julián y los esquistos Las Brisas y Las Mercedes (Figura 64) y en el sur por los sedimentos de la cuenca del Lago de Valencia con las planicies lacustrinas y aluviales cercano al lago y los valles aluviales (Figura 60). El valor A0 de la amenaza en roca es 0,18 g según la norma COVENIN 1756 (2019), considerablemente menor que los 0,3 g de la norma anterior (COVENIN 1756, 2001).

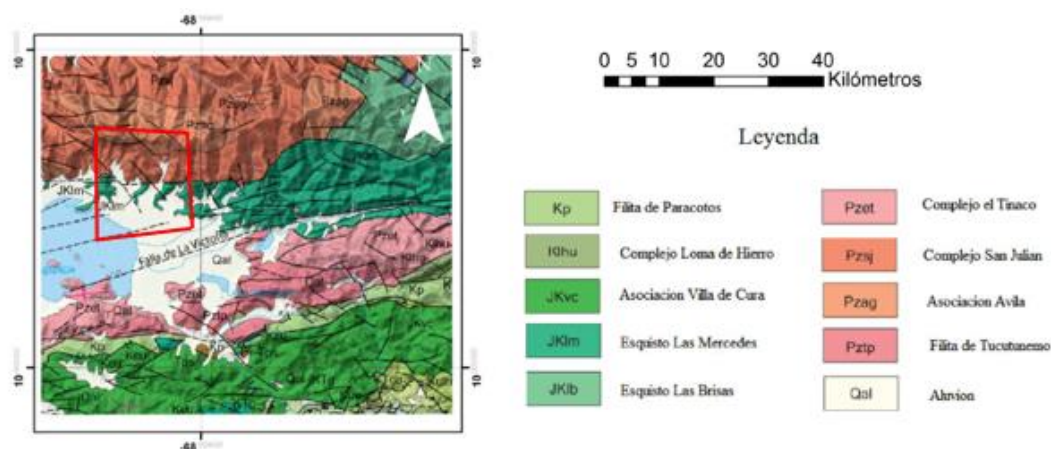


Figura 64. Mapa geológico de la zona de estudio en Maracay (modificado de Hackley et al., 2006) (Ali, 2021).

Las características de los sedimentos someros fueron evaluadas mediante diferentes metodologías (Schmitz et al., 2015). Parra et al. (2016) compararon los resultados de mediciones de ReMi (Casalena, 2011) con la evaluación por análisis de topografía. Escobar et al. (2023) usaron los datos adquiridos por Casalena (2011) para evaluar diferentes metodologías (ReMi, iMASW). López (2021) integró la información con datos provenientes de la conversión de valores SPT de perforaciones geotécnicas a Vs y del análisis de la topografía en un mapa Vs30 de Maracay según las clases de sitio de la norma COVENIN 1756 (2019) (Figura 65, izquierda).

Se observa una graduación de norte a sur con los afloramientos de roca con Vs30 > 650 m/s y roca meteorizada con Vs30 de 400 – 650 m/s en el norte, valores basados principalmente en los resultados obtenidos mediante el Vs30 de topografía. En la zona aluvional disminuyen los valores de Vs30 a 300m/s y 400m/s, abarcando parte del centro y norte de la ciudad. Acercándose al Lago de Valencia en el sur, los valores Vs30 en las planicies lacustrinas bajan a 200 – 300 m/s con valores menores a 200 m/s en una pequeña zona en el sur, relacionadas a sedimentos lacustrinos.

Para la evaluación del potencial de licuación se aplicó el método simplificado de Seed e Idriss (1971) usando las variables geotécnicas como: número de golpes de SPT, profundidad del nivel freático, porcentaje de partículas finas, peso unitario, etc., y la información geofísica, sobre todo Vs30 (Ali, 2021). Los sitios con moderado y alto potencial de licuación coinciden con las zonas de menores Vs30, un nivel freático menor a 5 metros de profundidad

y en muchos casos con suelos con la presencia de caracolillo (sedimento lacustre de origen diatomáceo). Las zonas con alto y moderado potencial de licuación se encuentran hacia el sur de Maracay cerca de la costa del Lago de Valencia; las zonas con bajo potencial de licuación se encuentran hacia el centro y norte de la ciudad (Figura 65, derecha).

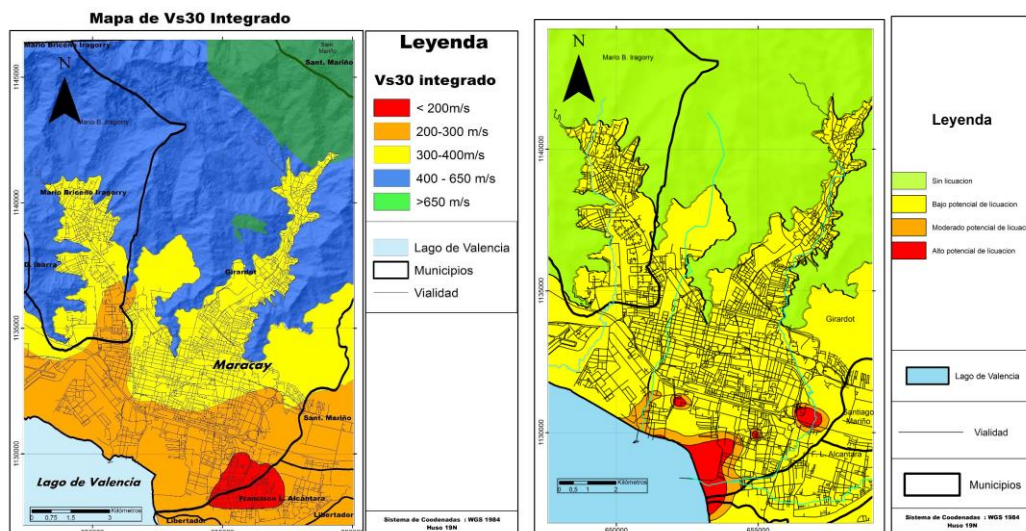


Figura 65. Izquierda: Mapa de Vs30 integrado (López, 2021). Derecha: Mapa del potencial de licuación de Maracay (Ali, 2021).

El espesor de los sedimentos fue evaluado utilizando 315 datos de ruido ambiental (Rojas, 2008), datos sísmicos (Rocabado et al., 2011), de inversión de datos de ruido ambiental (Ornelas, 2018) y gravimétricos (Romero, 2017), así como información de una perforación profunda hasta 300 m de profundidad (Schmitz et al., 2015). Los períodos fundamentales del suelo aumentan desde el norte, en sitios con roca, hacia el sur con valores máximos de 2,9 s (Figura 66, izquierda). Mediante la inversión de las curvas de elipticidad de las ondas Rayleigh con el método de campo difuso, se obtuvieron espesores máximos de sedimentos de 310 m al sur de Maracay con Vs entre 137 y 657 m/s. Un segundo estrato con Vs promedio de 1250 m/s puede asociarse a los esquistos Las Mercedes y Las Brisas (Ornelas, 2018).

La información de las evaluaciones sísmicas arriba mencionadas, así como los datos geotécnicos y geológicos de la zona fueron integrados con los resultados del modelado 3D gravimétrico de Romero (2017) con un espesor máximo en la zona de Maracay de 350 m, constatado mediante una perforación de 300 m de profundidad al norte de la Autopista Regional del Centro. El mapa de espesores sedimentarios integrado se realizó por intervalos, obteniéndose finalmente 4 rangos de espesores de sedimentos ajustados a los rangos de la norma COVENIN 1756 (2019) (Figura 66, derecha). Los espesores aumentan desde la zona de roca en el norte a una zona con más de 250 m en la parte sur de Maracay.

Con el fin de proporcionar datos de entrada para los cálculos de la respuesta sísmica en superficie y para soporte en la delimitación de las microzonas sísmicas se desarrollaron 17 perfiles de suelo integrando la información geotécnica, las velocidades Vs, el período fundamental y el espesor de los sedimentos (López, 2021). Las microzonas sísmicas resultantes fueron ajustadas a la malla urbana y se ubican en el mapa (Figura 67) las fallas

activas (Paolini et al., 2012; Singer et al., 2014). Con base en la información recopilada deberán calcularse los espectros de respuesta en superficie y elaborarse las ordenanzas respectivas en los municipios del AMM.

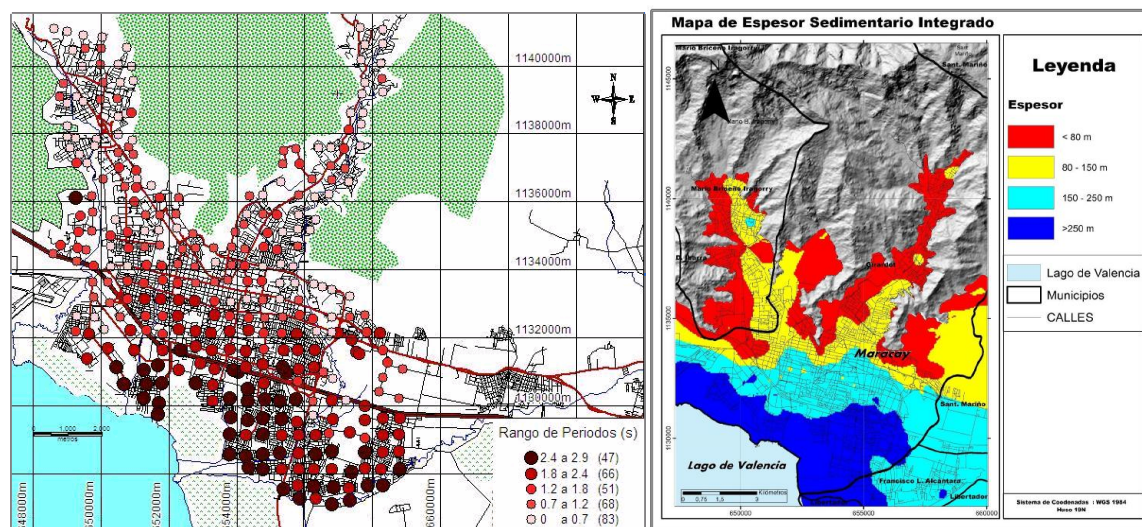


Figura 66. Izquierda: Mapa de períodos predominantes del suelo (Rojas, 2008). Derecha: espesor de sedimentos de Maracay (López, 2021).

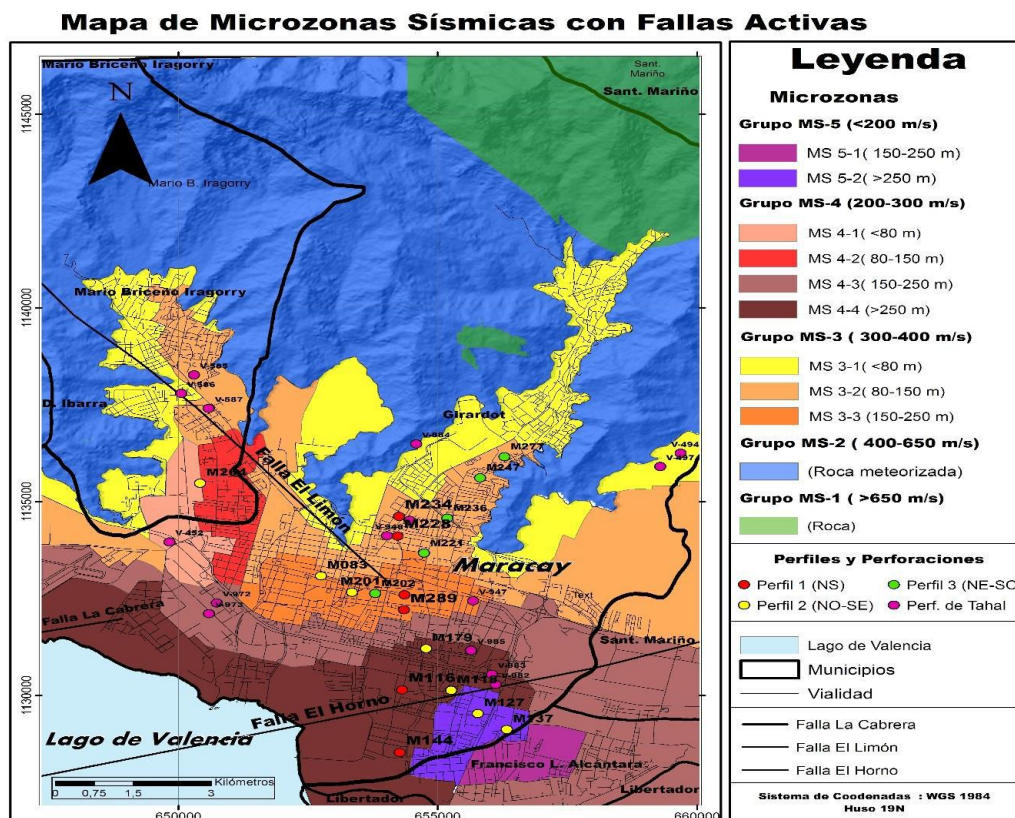


Figura 67. Mapa de Microzonas sísmicas preliminares y fallas activas de Maracay (López, 2021).

5.5.3 Área Metropolitana de Barcelona

El Área Metropolitana de Barcelona (AMB) en el norte del estado Anzoátegui está delimitada en el norte por el mar Caribe y se asienta sobre unidades cretácicas en el este, estratos terciarios en el oeste y sedimentos cuaternarios en la parte central (Figura 68). El valor A0 de la amenaza en roca se ubica entre 0,2 y 0,3 g según la norma COVENIN 1756 (2019), algo menor que los 0,3 y 0,35 g de la norma anterior (COVENIN 1756, 2001).

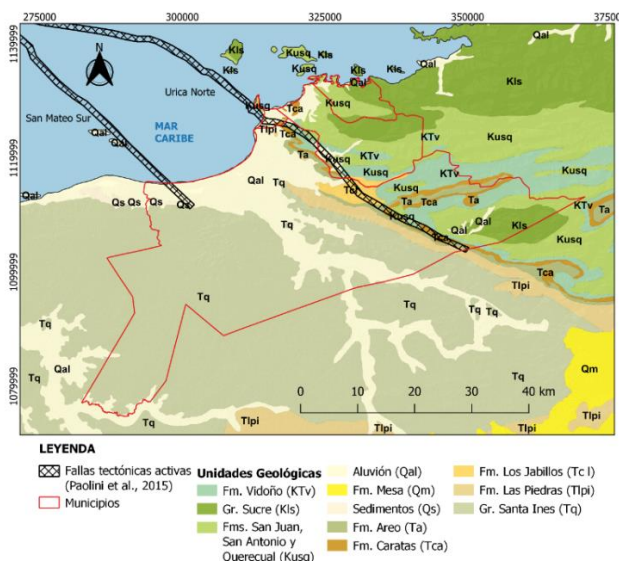


Figura 68. Geología del AMB (límites de municipios en rojo), modificado de Hackley et al. (2006) y fallas tectónicas activas (Paolini et al., 2012) (Alba, 2022).

Con base en información geológica, geomorfológica y geofísica existente se generó un mapa de microzonas sísmicas preliminares, definidas por el Vs30 y el espesor de sedimentos (Alba et al., 2023). Una base para la delimitación de las zonas de igual respuesta sísmica fue la evaluación geomorfológica considerando las amenazas asociadas para la sectorización (González, 2011; Figura 69).

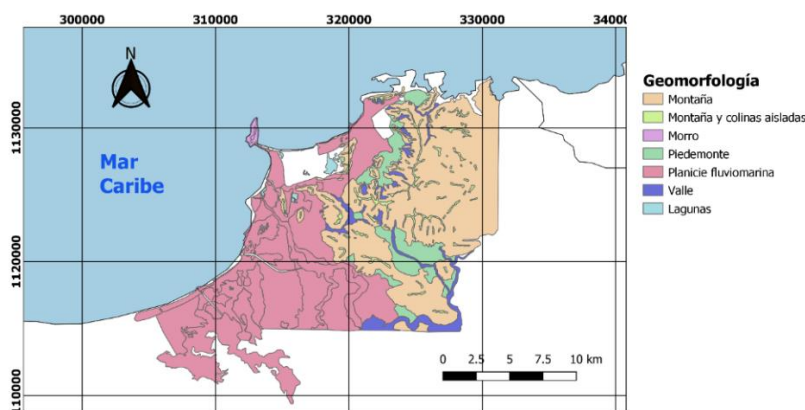


Figura 69. Unidades geomorfológicas en el AMB (Alba, 2022, modificado de González, 2011).

Para la generación del mapa de Vs30 (Figura 70) se usó como primera aproximación un método de Vs30 por topografía (Allen y Wald, 2009), luego se calibró con datos Vs30 provenientes de ReMi (Padrón, 2013; Rodríguez, 2013) y después se ajustó usando el mapa de geomorfología (Figura 69; González, 2011).

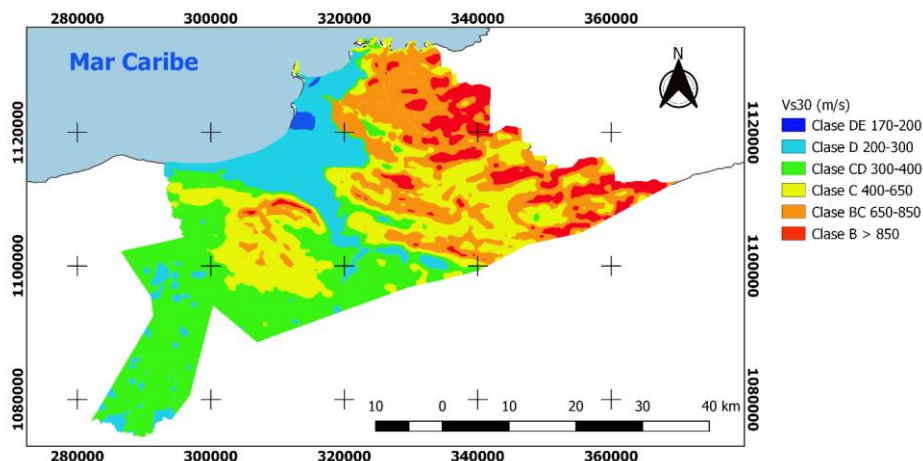


Figura 70. Mapa de Vs30 del AMB, basado en Vs30 por topografía, integrado con datos REMI y ajustado a la geomorfología (Alba, 2022).

Los espesores de sedimentos fueron evaluados utilizando datos sísmicos (Schmitz et al., 1999; Medina et al., 2016), de ReMi (Rodríguez, 2013), un total de 670 mediciones de ruido ambiental (Mendes, 2004; Gascón et al., 2009; Paolini y Schmitz, 2014; Alba, 2022) y modelado gravimétrico basado en más de 800 puntos de medición (Mendes, 2004; Ramírez-Lisboa et al., 2015). El análisis de las mediciones de ruido ambiental permite diferenciar el AMB con los menores períodos, menos de 0,5 s en el piedemonte de la Cordillera de la Costa hacia el este, con rocas del Cretácico aflorando de zonas con períodos de 1-1,5 s hacia el oeste. Además, destacan una zona con períodos de 1,5-1,7 s en Lechería, así como una zona con períodos mayores a 1,7 s en el extremo oeste de Barcelona (Figura 71, izquierda). Del análisis detallado de las curvas H/V se derivan tres patrones principales: picos claros (en la mitad de los sitios); picos anchos sin fácil identificación de picos o picos dobles (un 40 %) y curvas planas (un 10 %) que no muestran ningún pico en la curva H/V (lo que indica la presencia de una capa de sedimento muy compacto descansando sobre roca).

Se integraron los espesores derivados de la inversión de las curvas de H/V y de elipticidad utilizando los espesores del modelo gravimétrico 3D (Ramírez-Lisboa et al., 2015) identificando valores Vs aumentando de unos 125 m/s en los primeros 10 m a unos 800 m/s en la base de los sedimentos y con valores de Vs del basamento entre 1250-1690 m/s (Alba, 2022). Las profundidades máximas del modelado gravimétrico fueron observadas en el oeste de Barcelona con más de 600 m (Ramírez-Lisboa et al., 2015). En la zona de Puerto La Cruz se tuvieron que ajustar los espesores por diferencias con las inversiones de ruido y se clasificaron los espesores de sedimentos en 4 rangos con fines de microzonificación sísmica (Figura 71, derecha).

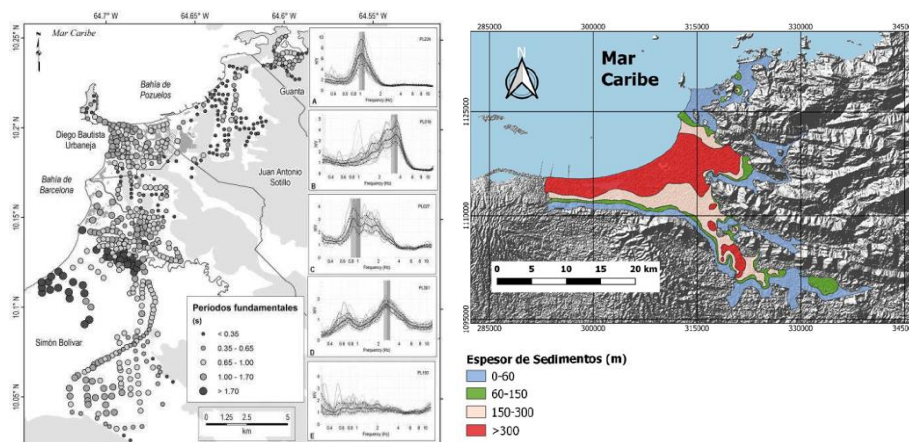


Figura 71. Izquierda: Períodos fundamentales del suelo en el AMB. Ejemplo de las curvas H/V observadas: picos claros (A) y (B), pico ancho (C), pico doble (D), y curva plana (E). (Paolini y Schmitz, 2014). Derecha: Espesores de sedimentos del AMB agrupados en cuatro rangos de profundidades (Alba, 2022).

Se generó el mapa de microzonas preliminares del AMB (Figura 72), en el cual se integraron el mapa de Vs30 (Figura 70) y el mapa de espesores de sedimentos (Figura 71), ajustando los límites de las microzonas sísmicas a los límites de las unidades geomorfológicas (Figura 69), evitando que resulten zonas muy pequeñas. Puerto la Cruz, Lechería y Barcelona están ubicadas en zonas de Vs30 de 170-300 m/s, perteneciendo a los grupos MS3 (200-300 m/s) y MS4 (170-200 m/s), una buena parte de Barcelona está en el Grupo MS4, es decir, suelos blandos. En una fase final, al considerar la respuesta sísmica en superficie en las diferentes microzonas sísmica, se recomienda ajustar los límites de las microzonas a la trama urbana. Durante el desarrollo de la investigación se mantuvo una intensa interacción con los funcionarios de las alcaldías del AMC, lo que resultó en un uso parcial de la información en la planificación urbana (Delgado et al., 2014).

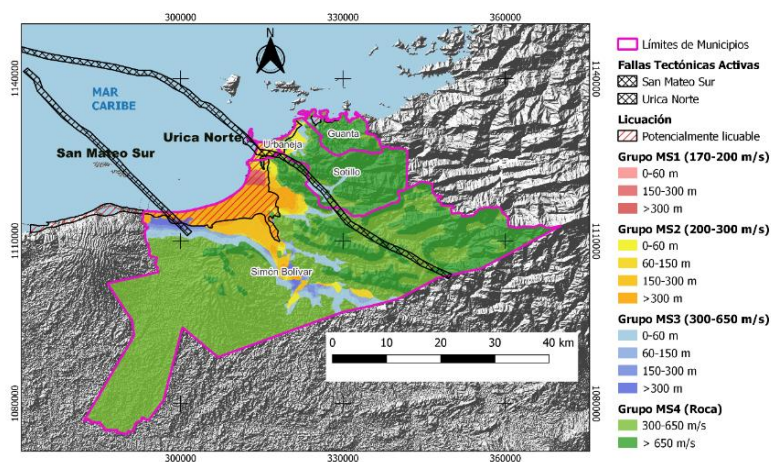


Figura 72. Mapa de microzonas sísmicas preliminares del AMB, incluyendo franjas con la ubicación de las fallas activas (Paolini et al., 2012) e información sobre zonas con alto potencial de licuación (Graffe, 2002) (Alba, 2022; Alba et al., 2023).

5.5.4 Área Metropolitana de Mérida (más San Juan y Lagunillas)

El Área Metropolitana de Mérida (AMM) en los Andes de Mérida es una conurbación elongada de tres municipios ubicados sobre terrazas del Pleistoceno del río Chama y afluentes y las laderas de estos ríos. Las rocas que afloran corresponden a la Asociación Sierra Nevada (Proterozoico Superior) en el sur y la Asociación Tostós (Paleozoico Tardío), la Formación Sabaneta (Carbonífero Superior-Pérmico Inferior), la Formación Palmarito (Carbonífero Superior-Pérmico Medio), la Formación La Quinta (Jurásico) y la Formación Mucujún (Mio-Plioceno) en el norte (Figura 73). El valor A0 de la amenaza sísmica en roca se ubica en 0,36 g según la norma COVENIN 1756 (2019).

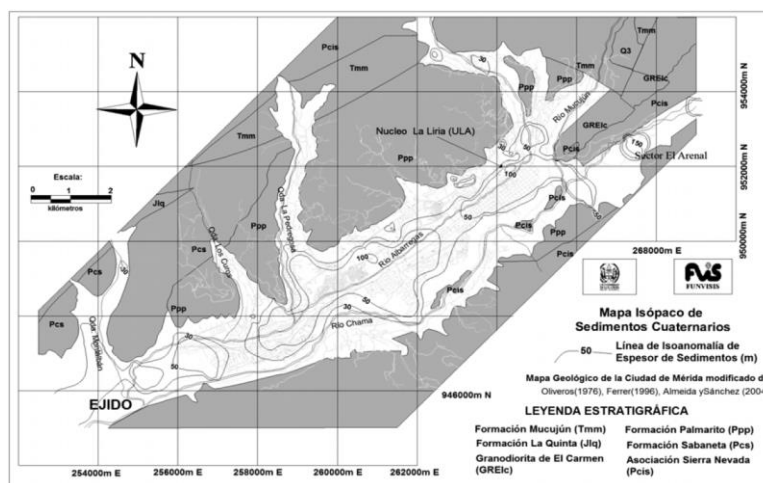


Figura 73. Geología del Área Metropolitana de Mérida y espesores de sedimentos en la terraza (Reinoza et al., 2006).

Para determinar las características del subsuelo se midieron 654 estaciones de ruido ambiental y 189 gravimétricas para determinar la profundidad de los sedimentos, así como 62 perfiles sísmicos someros para determinar el Vs30. Los periodos fundamentales del suelo varían entre 0,2 y 2 s, con los periodos bajos en la parte apical de los diferentes abanicos que se encuentran laterales a la terraza y cercanos a las diferentes formaciones rocosas aflorando (Figura 74, izquierda).

Los espesores máximos se ubican entre 100 y 130 m (Figura 73) en un área alargada en sentido noreste – suroeste (Cerrada et al., 2015). En el borde sur de la terraza se ubica el basamento rocoso en la perforación para el observatorio acelerográfico a 145 m de profundidad. En Tabay, los espesores sedimentarios no superan los 50 m, mientras en Ejido pueden alcanzar localmente 120 m. (Schmitz et al., 2015). Los valores de Vs30 en la terraza, la mayor parte de Mérida y Ejido, oscilan entre 350 y 650 m/s (Cerrada et al, 2015), lo que corresponde a la microzona sísmica 1-2 con espesores entre 0 y 60 m (Figura 74, derecha). Hacia las laderas se observan valores de Vs30 mayores a 650 m/s.

Rocabado et al. (2015) evaluaron los efectos de amplificación mediante registros en roca y en superficie del observatorio acelerográfico en el borde de la terraza. Las máximas amplificaciones se obtienen para períodos bajos, en el orden de 3 para las componentes vertical y este-oeste y un máximo de 8 para la componente norte-sur, amplificaciones entre

3 y 4 para períodos 0,4 a 0,5 s y en el orden de 1,5 a 2 para períodos de 1 s, lo que podría explicarse por los efectos de borde libre de la terraza. Esto es acorde con resultados de modelados 1D (Yegres et al., 2020), indicando una amplificación de 4 veces entre roca y superficie.

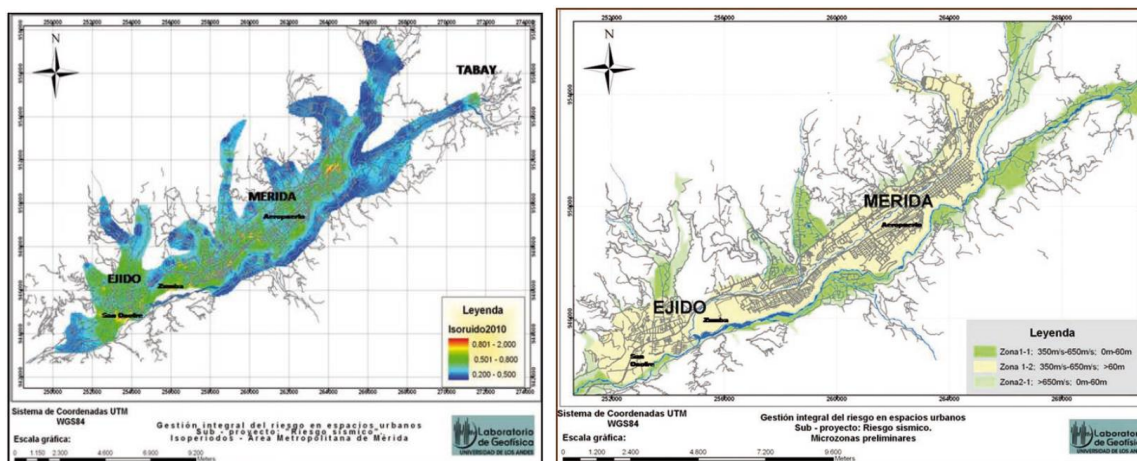


Figura 74. Períodos fundamentales del suelo (izquierda) y microzonas sísmicas preliminares (derecha) del AMM (Cerrada et al., 2015).

Con el propósito de diseñar mecanismos para promover una mayor integración de los estudios locales de zonificación de amenazas naturales en la gestión urbana del Municipio Libertador del estado Mérida, Aranguren (2018) realizó un diagnóstico de los avances y retos para integrar los estudios de amenazas de desastres de origen natural en la gestión urbana de la ciudad de Mérida. Entre los factores a tomar en cuenta está la susceptibilidad de las laderas a movimientos en masa (Figura 75). Sobre la base de estos análisis se proponen 3 aportes concretos para mejorar las capacidades de gestión municipal: El establecimiento de lineamientos internos para incorporar los estudios de amenazas locales en el quehacer de la alcaldía, el desarrollo de herramientas cartográficas digitales para la zonificación urbana de amenazas con fines de apoyo a la gestión urbana y el diseño de un programa de capacitación en gestión local de riesgos socionaturales dirigido específicamente a los funcionarios de esa alcaldía.

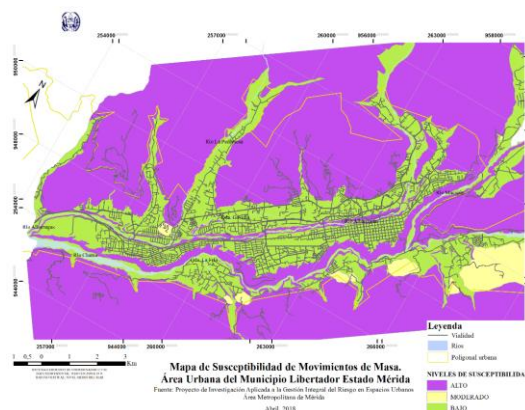


Figura 75. Mapa de susceptibilidad de movimientos de masa (Aranguren, 2018, tomado de Ramírez, 2014).

Fuera del AMM se realizaron evaluaciones geológicas y mediciones geofísicas para la determinación de las condiciones del subsuelo en las poblaciones de San Juan y Lagunillas, ubicadas unos 25 y 30 km al suroeste de Mérida, respectivamente, sobre terrazas sedimentarias cuaternarias al norte del río Chama (Figura 76, derecha). Se realizaron mediciones de ruido ambiental para determinar el período fundamental del suelo (Figura 76, izquierda; Figura 77, izquierda), así como ReMi para determinar los valores de Vs30 (Figura 77, derecha) y la distribución de las velocidades Vs dentro de los sedimentos. Todos los valores Vs30 superan los 400 m/s y los períodos fundamentales alcanzan 2,8 s en la zona, indicativo para espesores de sedimentos mayores a 400 m. En noviembre 2015 se inició un enjambre sísmico asociado a los movimientos de la Falla de Boconó con una gran cantidad de sismos (Barrios et al., 2019). Estos movimientos enfatizan la necesidad de finalizar los estudios de microzonificación sísmica en la zona con la elaboración de espectros de respuesta en superficie para poder contribuir a la mitigación del riesgo sísmico en la zona.

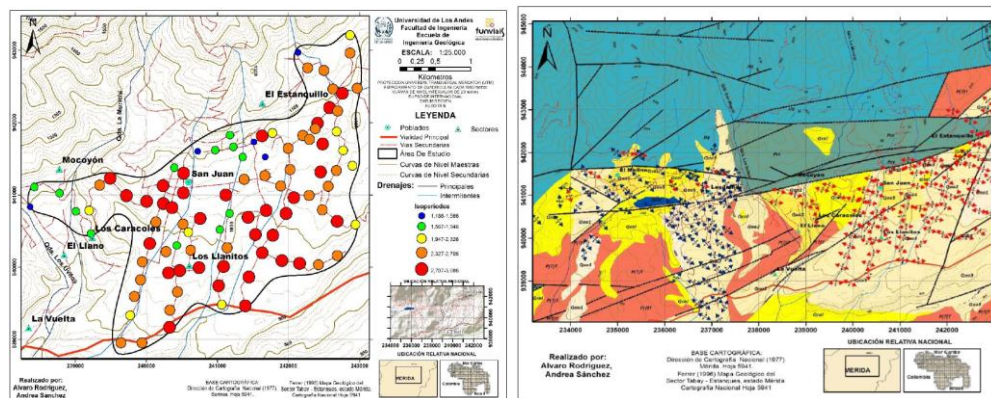


Figura 76. Izquierda: Períodos fundamentales del suelo en San Juan (Rodríguez y Sánchez, 2016). Derecha: Direcciones preferenciales de los períodos fundamentales, análisis H/V rotado-obtenidos por Rojas (2015) y Rodríguez y Sánchez (2016).

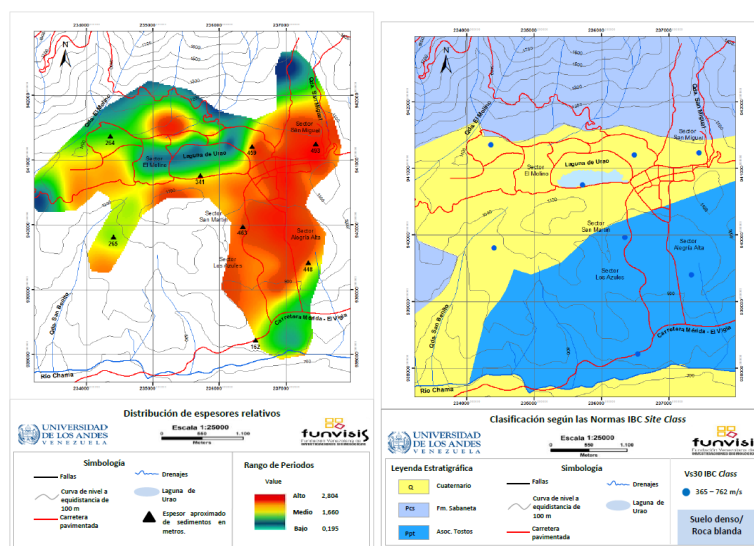


Figura 77. Izquierda: Períodos de vibración del suelo (Rojas, 2015) y distribución de Vs30 (derecha) de Lagunillas (Guillén, 2016).

5.5.5 Valle de la Pascua

Para evaluar la amenaza sísmica en superficie en una zona de menor amenaza en roca con $A_0 = 0,05g$ (COVENIN 1756, 2019) se seleccionó la ciudad Valle de la Pascua como ciudad con potencial crecimiento futuro en el Eje Norte Llanero (Garcés et al., 2009; Schmitz et al., 2015). La ciudad está ubicada en la zona de transición entre los Llanos Centrales y los Llanos Orientales y pertenece a la subcuenca de Guárico, la cual está asociada al frente de deformación del Sistema de fallas de Guárico. El basamento está compuesto de rocas cretácicas con diferentes ciclos de sedimentación en el Terciario Superior, pertenecientes a la Formación Quiamare. El área presenta diferentes unidades morfodinámicas como superficies aplanadas, ondulaciones, llanuras de inundación y lagunas. El análisis de 140 mediciones de ruido ambiental y 54 perfiles de ReMi permitió caracterizar de manera general los suelos de la ciudad como compactos con V_{s30} oscilando entre 300 y 580 m/s (Figura 78) y períodos fundamentales del suelo entre 0,1 y 0,4 s (Figura 79) sin mucho potencial de amplificar la baja amenaza sísmica en la región (Acosta et al., 2018). Se identificó una velocidad de ondas de corte de aproximadamente 1200 a 1500 m/s como basamento sísmico, ubicado a 100 - 150 m de profundidad. La distribución de velocidades está, posiblemente, asociada a cambios litológicos de la Formación Quiamare, los cuales son secuencias de arcilitas con intercalaciones de areniscas y lutitas. Se sugiere prestar atención a potenciales problemas geotécnicos por la presencia de arcillas expansivas.

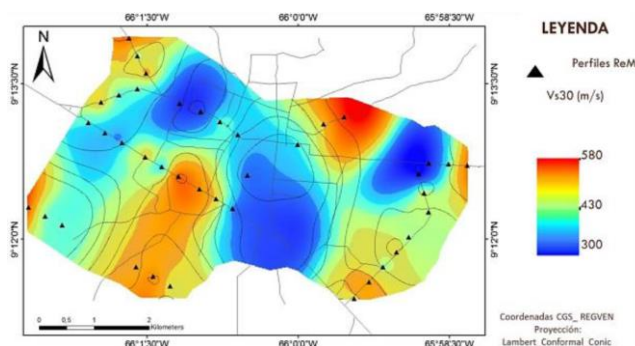


Figura 78. Mapa de distribución de velocidad V_{s30} de Valle de la Pascua (Pastor, 2014).

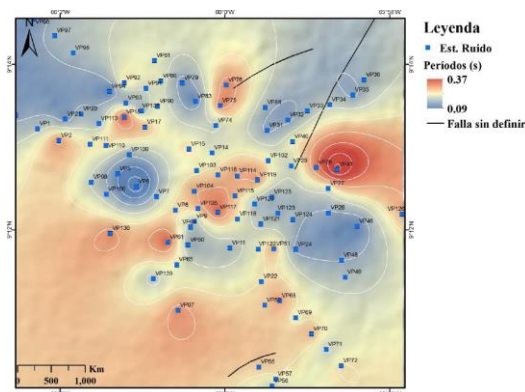


Figura 79. Mapa de períodos fundamentales del suelo de Valle de la Pascua (Acosta et al., 2018).

5.5.6 Ciudades en el estado Trujillo (Valera, Trujillo, Boconó)

Las ciudades Valera, Trujillo y Boconó, ubicadas en Los Andes de Mérida, se encuentran asentadas sobre terrazas sedimentarias, las cuales han generado múltiples problemas de inestabilidad. Están bajo influencia de la Falla de Boconó, lo cual deriva en una amenaza sísmica alta (Valera y Trujillo, $A_0 = 0,28\text{ g}$; Boconó, $A_0 = 0,36\text{ g}$) según la norma COVENIN 1756 (2019). En el año 2011 se inició el proyecto “Investigación aplicada a la gestión del riesgo sísmico en el estado Trujillo” (FONACIT N° 2011001400), en el marco del cual se llevan a cabo estudios geológicos y geotécnicos, mediciones de ruido sísmico ambiental, refracción de microtemores (ReMi) y gravimétricas para la caracterización del subsuelo en las ciudades (Mazuera et al., 2015; Schmitz et al., 2015).

En Valera, ubicada en las terrazas de los ríos Motatán, Momboy, Escuque y El Caño, se midieron 26 tendidos ReMi, 121 mediciones de ruido ambiental y 222 mediciones gravimétricas. De las mediciones ReMi se obtuvieron valores Vs30 de 330 – 385 m/s en el suroeste de Valera, aumentando a 400 - 513 m/s en la medida que se acerque a los sedimentos compactados en el centro de la terraza (Figura 80, izquierda). Los valores del período fundamental de vibración del suelo mediante el análisis H/V varían desde 0,2 s en la cercanía de los afloramientos rocosos (Complejo Iglesias – precámbrico, formaciones Río Momboy – carbonífera; La Luna – cretácica; Misoa – terciaria) hasta 1,3 s en las laderas de las terrazas de edad terciaria (Figura 80).

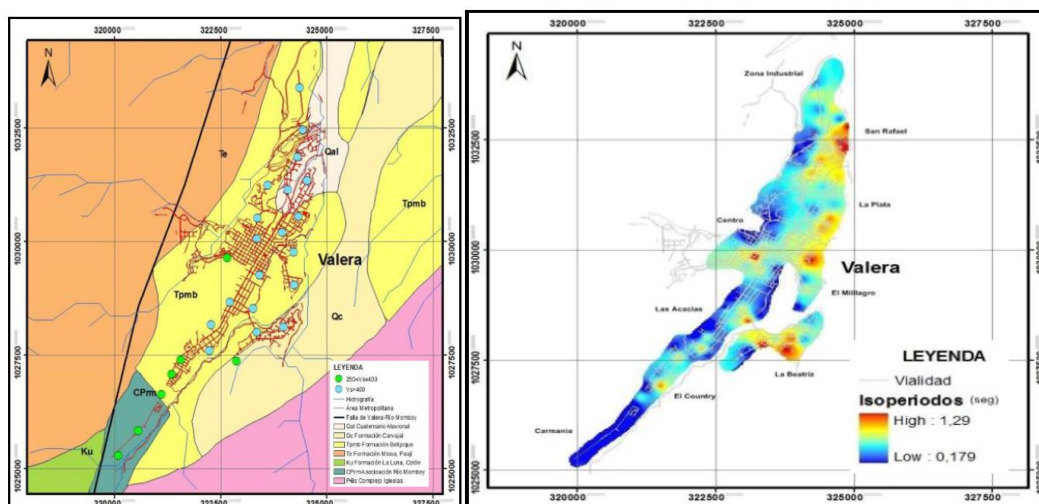


Figura 80. Izquierda: Vs30 de Valera sobre el mapa geológico de Hackley et al. (2006). Derecha: Períodos fundamentales del suelo de Valera (Mazuera et al., 2015).

A partir del análisis y modelado de los datos gravimétricos se puede concluir que las zonas que presentan mayores espesores de sedimentos corresponden a la zona del aeropuerto de Carvajal (al este de Valera), alcanzando un espesor de 200 metros, la zona ubicada entre “La Beatriz” y “El Milagro” en el sureste de Valera, alcanzando más de 300 metros de espesor de sedimentos (Figura 81). El control estructural juega un papel fundamental en la distribución de espesores de sedimentos que presenta la terraza de Valera. Por efectos

compresivos, se tiene un plegamiento de las formaciones geológicas subyacentes a la terraza (Figura 81, derecha). Los espesores menores, tienden a ubicarse adyacentes a los flancos de los pliegues anticlinales, y los espesores mayores, se encuentran suprayacentes a los ejes de los pliegues sinclinales.

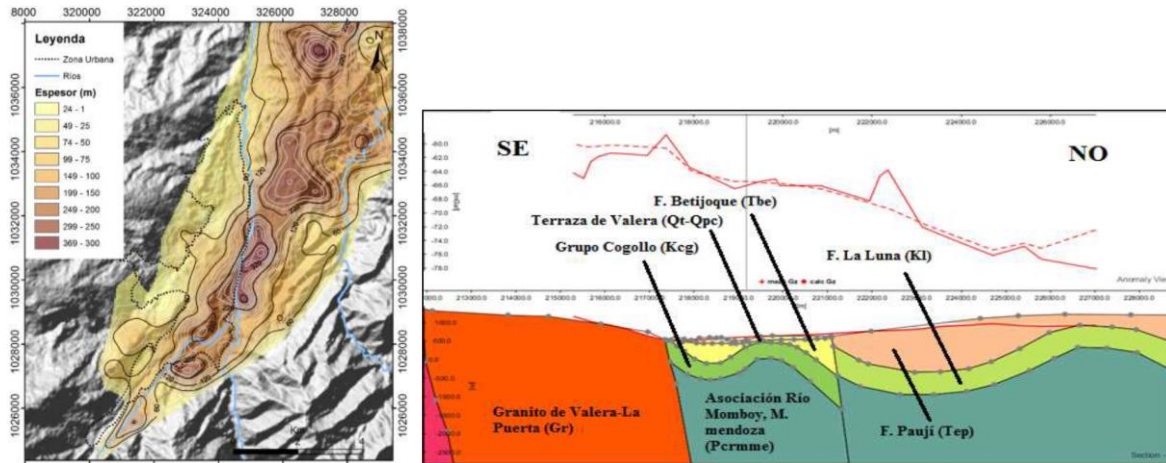


Figura 81. Espesores de sedimentos de Valera (izquierda) y sección 2D en dirección SE – SO del modelo gravimétrico 3D (Sánchez-Rojas et al., 2016).

Trujillo, capital del estado del mismo nombre, está ubicada sobre rocas de la Asociación Mucuchachí (Paleozoico Superior), así como hacia el sureste sobre rocas de edades cretácicas y jurásicas (Figura 82, izquierda). Los sedimentos cuaternarios de edad Pleistoceno Medio - Superior – Holoceno son drenados por los ríos Castán y Mocoy, Los valores de Vs30, obtenidos a partir de 23 tendidos de ReMi, van de 180 m/s en la parte sedimentaria hasta 760 m/s en roca meteorizada en el sur, con mayores valores en la zona rocosa.

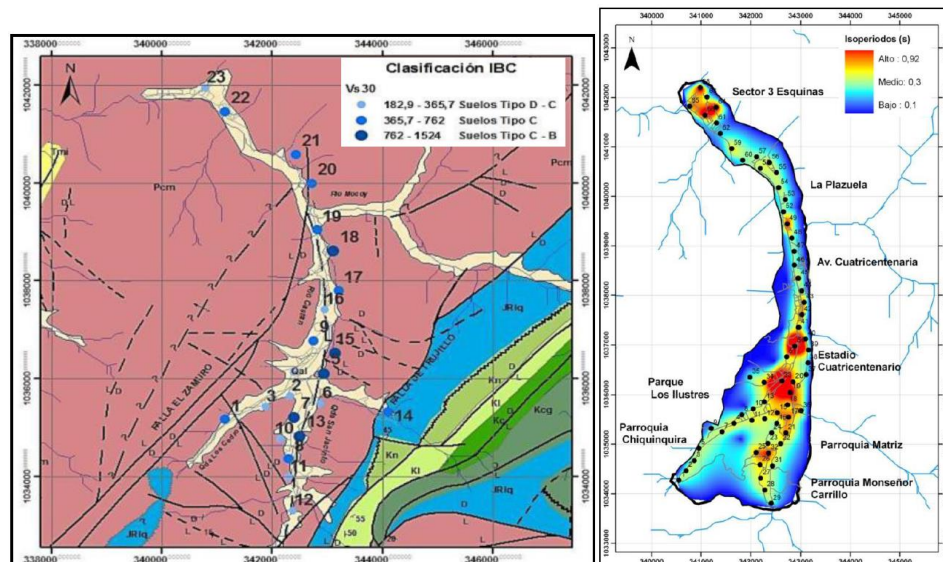


Figura 82. Izquierda: Vs30 de Trujillo sobre el mapa geológico de Hackley et al. (2006). Derecha: Períodos fundamentales del suelo (Mazuera et al., 2015).

De las 67 mediciones de ruido ambiental se obtuvieron valores de períodos fundamentales del suelo que oscilan entre 0,1 y 0,92 s, siendo los sectores de valores más altos Tres Esquinas y los alrededores del Estadio Cuatricentenario (Figura 82, derecha). A partir del modelado gravimétrico, basado en 148 puntos de medición, se determinó un máximo espesor sedimentario de 150 m en la zona central de la ciudad (Parroquia La Matriz y Estadio Cuatricentenario), y entre 50-100 m, en el sector Tres Esquinas (Figura 83). La sección ONO-ESE del modelo gravimétrico se encuentra ubicada en la zona central del área de estudio. Se observa que el espesor sedimentario es de unos 140 m distribuidos de manera uniforme a lo largo de su extensión.

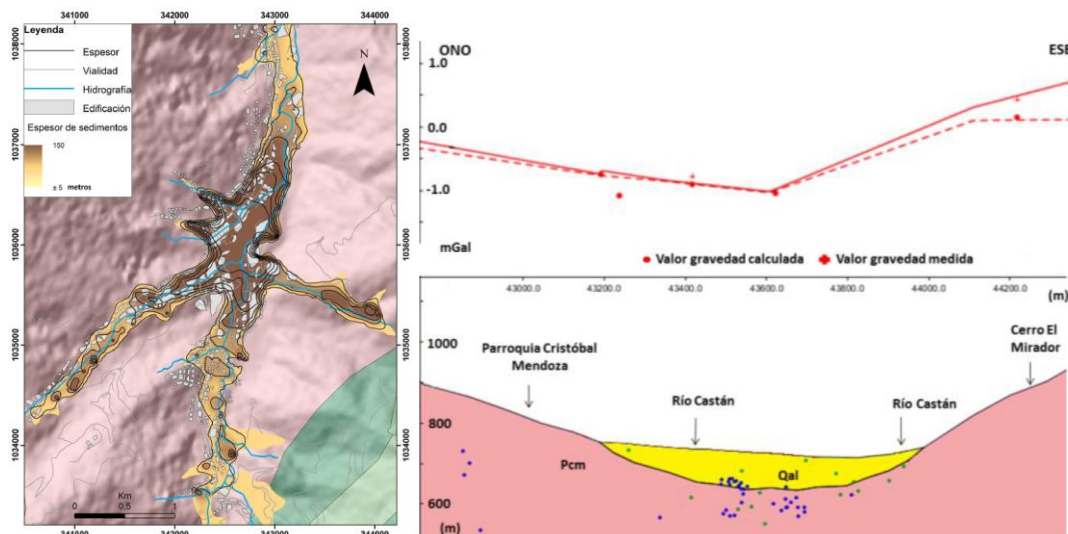


Figura 83. Mapa de espesor de sedimentos en Trujillo (izquierda). Sección ONO-ESE del modelo gravimétrico; puntos azules representan: soluciones de Euler obtenidas, puntos verdes: espesores del análisis de ruido ambiental (derecha) (García et al., 2015).

La ciudad de Boconó está ubicada en pleno eje de la falla que lleva su mismo nombre sobre abanicos aluviales (Qal) de los ríos Boconó y Burate, que suprayacen al Complejo Iglesias (Peis – Sierra Nevada), que es su basamento cristalino de edad precámbrica, en contacto discordante con la Formación Palmarito (Figura 84, izquierda). Basado en el modelado 3D de 183 mediciones gravimétricas, se obtuvo que el espesor sedimentario varía entre ~50 y 150 m (Figura 84, derecha); los menores espesores, se encuentran sobre el cauce de la Quebrada Segovia (Noreste); estos espesores aumentan gradualmente hacia el oeste, alcanzando el máximo observado en la región donde confluye dicha quebrada con el río Boconó.

Para determinar los valores Vs30 se midieron 20 líneas sísmicas tipo ReMi; hacia el este del abanico, se determinaron velocidades mayores a 760 m/s (suelos rígidos o roca). Velocidades de Vs30 entre 550 a 750 m/s se encontraron al noreste y suroeste de la ciudad y al oeste se observaron velocidades entre 330 y 640 m/s (Figura 85, izquierda).

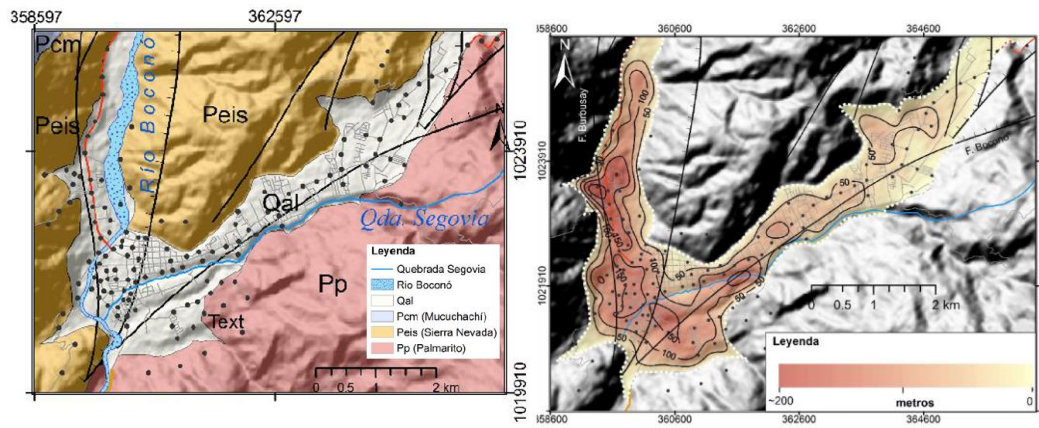


Figura 84. Geología y ubicación de los puntos de medición gravimétrica (izquierda) y espesores de sedimentos (derecha) de Boconó (León et al., 2015).

Basado en la medición de 106 estaciones de ruido ambiental, Boconó muestra valores de períodos fundamentales del suelo en un rango de 0,26 y 1,20 s (Figura 85, derecha); los mayores valores se observan en el área distal del abanico en donde se asienta el centro de la ciudad.

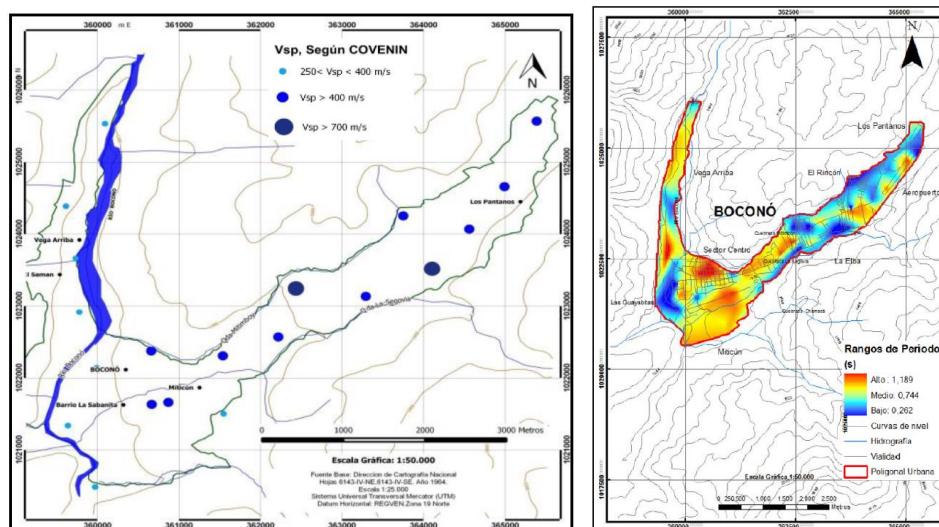


Figura 85. Vs30 (izquierda) y períodos fundamentales del suelo (derecha) de Boconó (Mazuera et al., 2015).

Linares et al. (2026) identificaron las evidencias geomorfológicas de deformación de los sistemas de fallas activas en torno a la Falla Boconó. Indican que muchos de los movimientos en masa (deslizamientos traslacionales, rotacionales, fallas de borde) están asociados a la debilidad y fracturamiento de la roca que están intrínsecamente relacionados con la Falla de Boconó. Deberán finalizarse los estudios en el estado Trujillo con la elaboración de espectros de respuesta en superficie, la elaboración de los mapas de microzonas sísmicas y su implementación en ordenanzas municipales, considerando los efectos inducidos sobre todo en los bordes de terraza en Valera.

5.5.7 Ciudades en el estado Táchira (San Cristóbal, San Antonio del Táchira, Ureña, Michelena, Lobatera y Rubio)

Con el fin de iniciar los estudios de microzonificación sísmica en el estado Táchira, que tiene una alta amenaza sísmica debido al sistema de fallas de Boconó, FUNVISIS, en colaboración con la especialidad de Geociencias del Instituto Universitario de Tecnología Agroindustrial (IUTAI) y la maestría de Geofísica Aplicada del convenio (MPPEUCT-CUJAE) desarrollaron trabajos geofísicos con el fin de caracterizar el subsuelo en las ciudades San Cristóbal, San Antonio del Táchira, Ureña, Lobatera, Michelena y Rubio. Las mediciones de campo se realizaron con el apoyo del Proyecto de Investigación Aplicada a la Gestión del Riesgo en Espacios Urbanos (Proyecto FONACIT 2007000939).

San Cristóbal, la capital del estado Táchira, está ubicada sobre terrazas de sedimentos cuaternarios del Pleistoceno (QT) y lutitas de la Formación Colón del Cretáceo Superior (KSc) (Figura 86, izquierda). La aceleración pico en roca es $A_0 = 0,32 \text{ g}$ (COVENIN 1756, 2019). Se midió el ruido ambiental en 96 puntos, obteniéndose valores de periodos fundamentales del suelo 0,6 y 1,2 s (Figura 86, derecha). Los períodos con mayores valores, cercanos a 1 s, corresponden a una zona de sedimentos fluviales próximos a las quebradas La Machiri y La Bermeja.

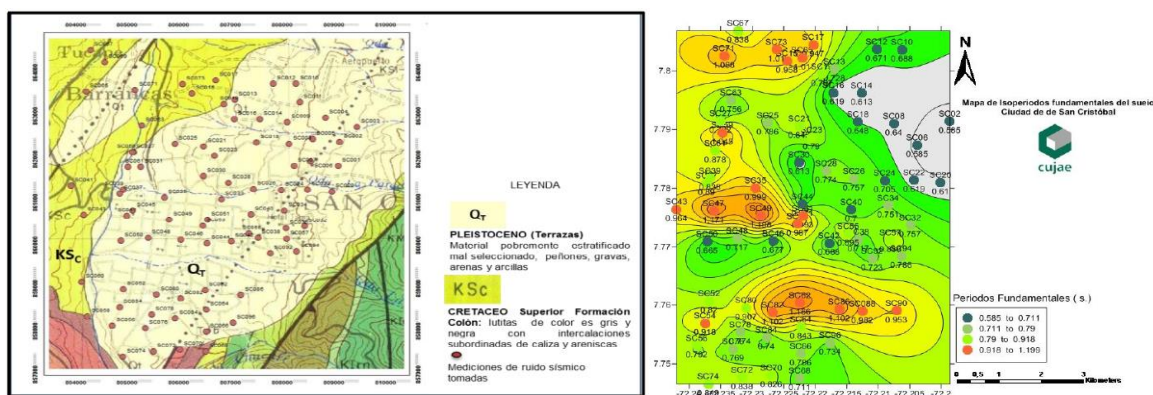


Figura 86. Geología y puntos de medición de ruido ambiental (izquierda) y mapa de períodos predominantes del suelo (derecha) de San Cristóbal (Durán, 2015).

San Antonio del Táchira y Ureña están ubicadas en la cercanía de la frontera con Colombia sobre rocas terciarias y cretácicas, con cobertura de sedimentos cuaternarios. La aceleración pico en roca es alta con $A_0 = 0,36 \text{ g}$ (COVENIN 1756, 2019), por la cercanía del sistema de fallas de Boconó.

Los valores de Vs30 por topografía en San Antonio del Táchira, varían entre 300 m/s en el centro y hasta 760 m/s en la zona sureste. Los períodos fundamentales del suelo van desde 0,6 s en el centro norte y sur a más de 1 s hacia las zonas este y sureste de la ciudad (Figura 87). El estimado de los espesores de los sedimentos indica más de 100 m en los extremos (Molina et al., 2015).

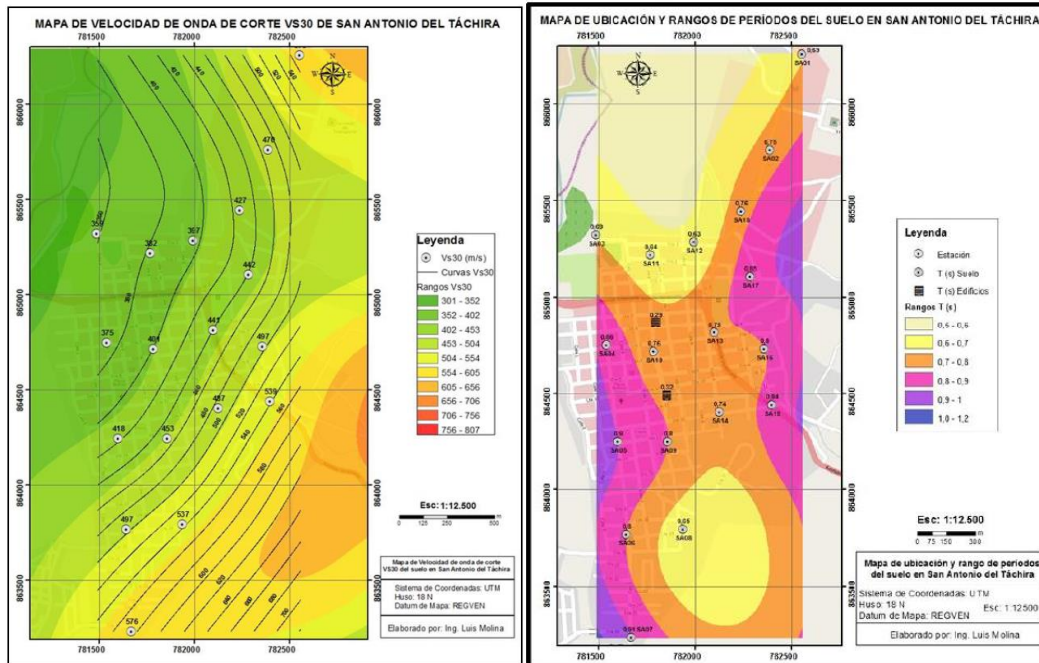


Figura 87. Mapa de Vs30 (izquierda) y mapa con la ubicación de los puntos de medición y los rangos de períodos fundamentales del suelo (derecha) en San Antonio del Táchira (Molina et al., 2015).

En Ureña los valores de Vs30 por topografía varían entre 360 m/s en el oeste y hasta más de 600 m/s en el este. La zona central presenta velocidades de Vs30 entre 425 y 500 m/s. Los períodos fundamentales del suelo van desde 0,2 s en el oeste y sureste y sur a 1,5 s en las zonas norte, sur y centro-este (Figura 88) con un estimado de los espesores de los sedimentos que superan los 200 m (Molina et al., 2015).

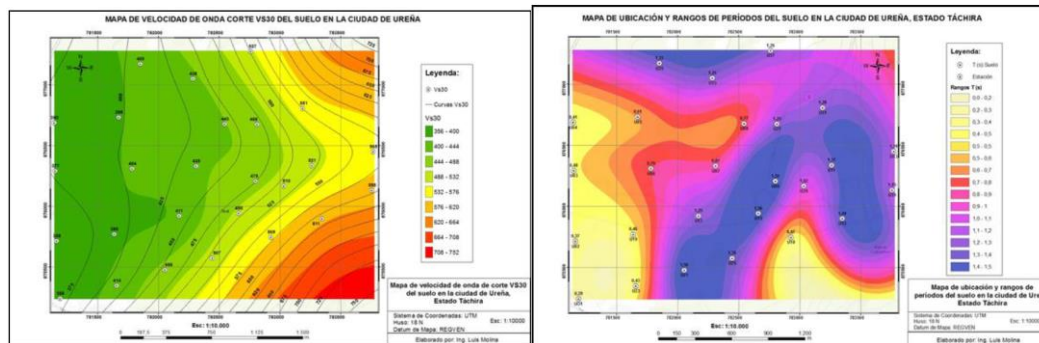


Figura 88. Mapa de Vs30 (izquierda) y mapa con la ubicación de los puntos de medición y los rangos de períodos fundamentales del suelo de Ureña (Molina et al., 2015).

Michelena se encuentra asentada sobre una terraza aluvional del Cuaternario (Qal), originadas por los depósitos de los sedimentos cretácicos provenientes del páramo El Zumbador, mientras que Lobatera se ubica sobre rocas de las formaciones Colón (KSc) y

Mito Juan (Kmj). La aceleración pico en roca es alta con $A_0 = 0,35 \text{ g}$ (COVENIN 1756, 2019), por la cercanía del sistema de fallas de Boconó.

En Michelena los valores de Vs30 por topografía varían entre 590 m/s en el este y 760 m/s en el oeste. Para la determinación de los períodos fundamentales del suelo se adquirieron datos en 25 estaciones y los valores de períodos van de 0,23 s en el extremo este a 0,96 s en el noroeste (Figura 89) con la mayoría de los puntos alrededor de 0,6 s, lo que resulta en un estimado de los espesores de los sedimentos alrededor de 100 m (Molina, 2016).

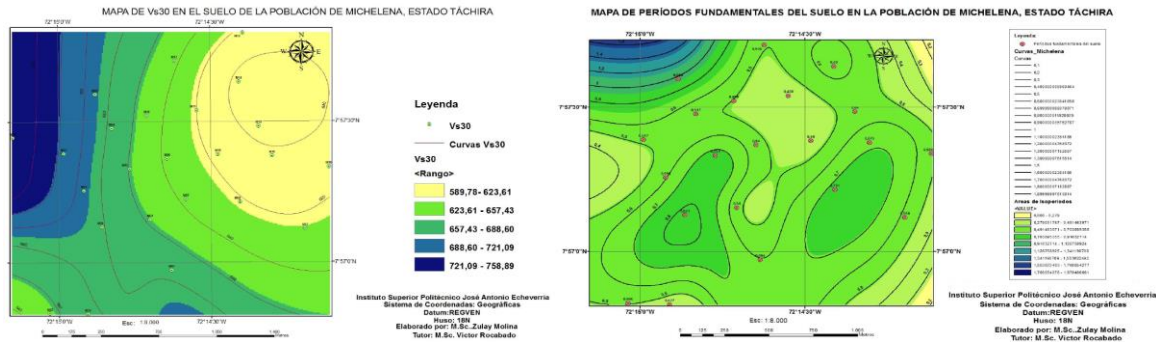


Figura 89. Mapa de Vs30 (izquierda) y mapa con la ubicación de los puntos de medición y los rangos de períodos fundamentales del suelo (derecha) en Michelena (Molina, 2016).

En Lobatera los valores de Vs30 por topografía se encuentran uniformemente entre 500 m/s y 550 m/s. Para la determinación de los períodos fundamentales del suelo se adquirieron datos en 11 estaciones y los valores de períodos van de 0,56 s en el suroeste a 1,1 s en el este (Figura 90), lo que resulta en un estimado de los espesores de los sedimentos encima de 100 m (Molina, 2016). Considerando que Lobatera está ubicada sobre rocas del Cretácico, y sin embargo muestra períodos más altos que en Michelena sobre una terraza del Cuaternario, debería haber un contraste de impedancia a ciertos niveles dentro de las rocas, posiblemente por niveles de areniscas.

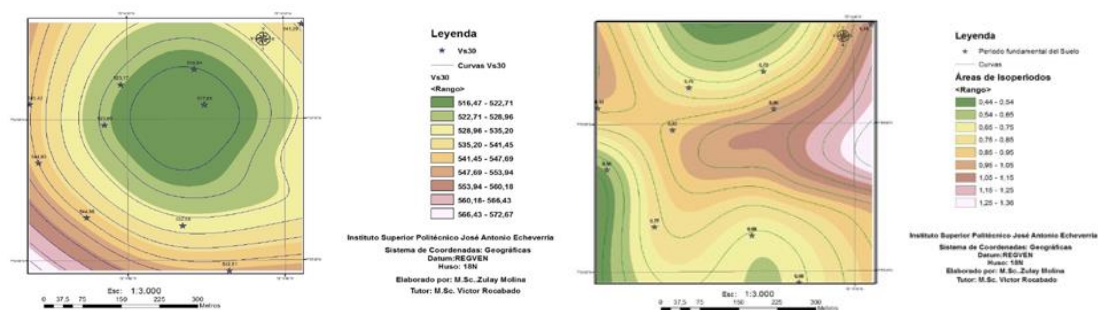


Figura 90. Mapa de Vs30 (izquierda) y mapa con la ubicación de los puntos de medición y los rangos de períodos fundamentales del suelo (derecha) en Lobatera (Molina, 2016).

La depresión de Rubio está dominada por sedimentos molásicos de edad Mio-Plioceno más una importante cobertura de terrazas Cuaternarias. La aceleración pico en roca es alta con $A_0 = 0,33 \text{ g}$ (COVENIN 1756, 2019), por la cercanía del sistema de fallas de Boconó.

En Rubio los valores de Vs30 por topografía varían entre 350 y 460 m/s con los menores valores en el centro y hacia el este. Para la determinación de los períodos fundamentales del suelo se adquirieron datos en 33 estaciones y los valores de períodos varían entre 0,4 y 1,0 s con algunos valores por debajo de 0,4 s y uno de 1,3 s (Figura 91), lo que resulta en un estimado de los espesores de los sedimentos entre 100 y 150 m (Cárdenas et al., 2015). En el caso de Rubio, esta profundidad podría indicar el tope de las formaciones cretácicas.

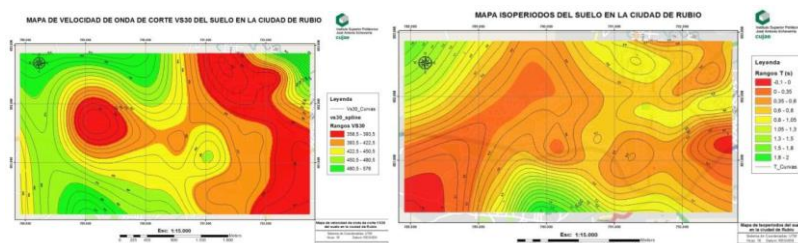


Figura 91. Mapa de Vs30 (izquierda) y mapa con la ubicación de los puntos de medición y los rangos de períodos fundamentales del suelo (derecha) en Rubio (Cárdenas et al., 2015).

Los trabajos realizados en el estado Táchira en el marco de la cooperación entre el Instituto Universitario de Tecnología Agroindustrial (IUTAI) y la maestría de Geofísica Aplicada del convenio (MPPEUCT-CUJAE) representan el primer paso en la microzonificación sísmica con la recopilación de la información geológica, topográfica y la medición de ruido ambiental con el apoyo de FUNVISIS. Los resultados indican la presencia de espesores de sedimentos que podrían amplificar las ondas sísmicas en caso de un terremoto en esta región con una alta amenaza sísmica. Por tales razones es necesario que se gestionen fondos para completar los respectivos estudios de microzonificación sísmica y su aplicación en ordenanzas municipales en complemento de la norma de construcciones sismorresistentes.

5.5.8 La Guaira y Ciudad Caribia

El estado La Guaira se ubica en una franja montañosa limitada por la costa del mar Caribe en el norte con asentamientos poblacionales que se concentran principalmente en los conos aluviales. En el suroeste, en terrenos pertenecientes tanto al estado La Guaira como al Distrito Capital, se ubica Ciudad Caribia en las colinas formadas por los Esquistos Las Brisas profundamente meteorizados. Es importante destacar que, debido a su cercanía a la interacción entre la Placa del Caribe y la Placa Sudamericana, La Guaira posee una elevada amenaza sísmica (con $A_0 = 0,3$ g para La Guaira y algo menor, $A_0 = 0,27$ g, para Ciudad Caribia; COVENIN 1756, 2019), donde la Falla San Sebastián marca la línea de costa. La Guaira ha sufrido varios terremotos con destrucciones importantes (Grases et al., 1999); el último, el terremoto de Caracas/Litoral de 1967, con daños en edificios de mediana altura en la zona de Caraballeda. Las primeras evaluaciones basadas en perfiles sísmicos estimaron un elevado espesor de sedimentos en esta zona (Murphy et al., 1969).

Posterior a los deslaves del año 1999, donde las zonas más afectadas fueron los conos aluviales entre las localidades de Catia La Mar y Camurí Grande, se desarrollaron estudios

geofísicos integrados para la caracterización de los suelos en el estado La Guaira (e.g. Romero et al., 2006). En los conos aluviales, el nivel freático se ubica entre 5-10 m de profundidad y las velocidades Vs30, basadas en los análisis de mediciones sísmicas en los diferentes conos, varían generalmente entre 300 y 650 m/s en los conos (con algunas zonas con sedimentos aluvionales poco consolidados con valores por debajo de 300 m/s) y valores mayores a 650 m/s en las laderas al sur (Figura 92). Esto está en congruencia con evaluaciones posteriores que incorporaron análisis de Vs30 por topografía para todo el estado La Guaira (García, 2023).

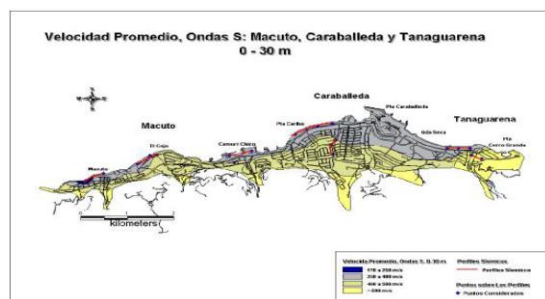


Figura 92. Mapa de Vs30 de La Guaira (Romero et al., 2006).

Basado en las mediciones de 130 estaciones de ruido ambiental en las zonas de Macuto, Caraballeda y Tanaguarena, Romero et al. (2006) determinaron valores del período fundamental del suelo entre 0,9-1,8 s con valores máximos hasta 2,7 s (Figura 93).

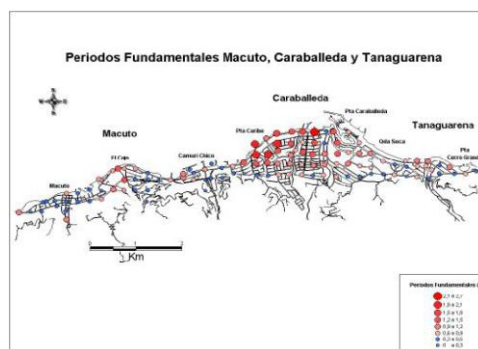


Figura 93. Mapa de períodos fundamentales del suelo de La Guaira (Romero et al., 2006).

Como base para el modelado gravimétrico, con el fin de determinar el espesor de los sedimentos cuaternarios, se realizaron mediciones gravimétricas en 348 sitios. Los mayores espesores se observan en el cono de Caraballeda con valores máximos cercanos a los 450 m hacia la línea de costa, mientras que en el cono de La Guaira se observan espesores máximos de 180 m. El cono de Macuto presenta espesores cercanos a 200 m en el lado oeste y a 290 m hacia el este en Punta El Cojo (Figura 94). El modelado gravimétrico realizado por García (2023) confirmó en gran medida estos valores con un máximo de 200 m hacia la línea de costa en el cono de La Guaira, un máximo de 480 m en el cono de Caraballeda y 280 m en el de Macuto.

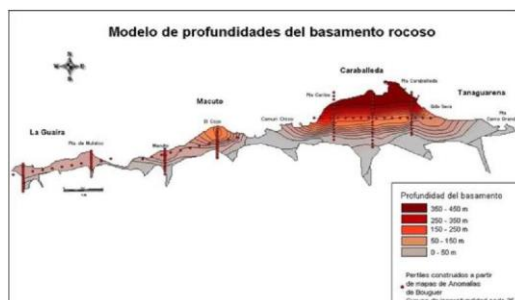


Figura 94. Mapa de espesores de sedimentos de La Guaira (Romero et al., 2006).

García (2023) integró los datos geofísicos existentes y generó un modelo gravimétrico 3D como base para la definición de microzonas sísmicas preliminares con los valores Vs30 y espesores de sedimentos. Destacan en la zona de Caraballeda microzonas con espesores mayores a 400 m (Figura 95) para las cuales deberán tomarse en cuenta efectos de cuenca para el cálculo de la respuesta en superficie.

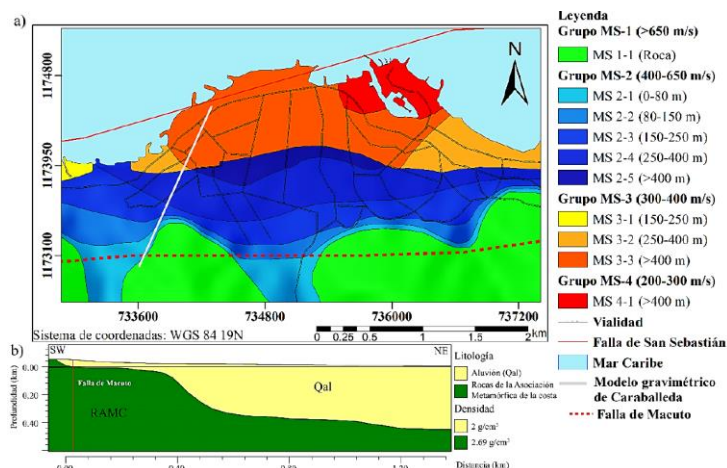


Figura 95. a) Microzonas sísmicas preliminares en el cono de Caraballeda. b) Detalle del perfil gravimétrico de Caraballeda (García et al., 2023).

En Ciudad Caribia se realizaron 246 mediciones de ruido ambiental y 325 mediciones gravimétricas; los períodos fundamentales están entre 0,2 y 0,85 s (Bueno et al., 2009), efecto de la profunda meteorización de los Esquistos Las Brisas. Del modelado gravimétrico se determinó un espesor máximo de meteorización de 45 m. A partir de la evaluación geomorfológica se identificaron superficies residuales en el área y se seleccionaron zonas con potencial de desarrollo urbanístico sin la presencia de movimientos de remoción en masa o procesos de tipo torrencial.

Para finalizar la microzonificación sísmica de La Guaira se deberían complementar las mediciones geofísicas para tener una base uniforme para toda la parte urbanizada del estado, calcular la respuesta sísmica en superficie y elaborar ordenanzas municipales.

5.5.9 Guarenas-Guatire

En Guarenas y Guatire, zona de expansión de Caracas ubicada unos 20 km al este, se realizaron estudios geofísicos (e.g. Sánchez et al., 2005b) que fueron complementados desde el año 2008 con estudios de microzonificación en el marco de los proyectos de microzonificación sísmica de la Cooperación Cuba-Venezuela (González et al., 2009; Schmitz et al., 2012). La cuenca de Guarenas-Guatire se encuentra ubicada en una depresión dentro de la Cordillera de la Costa, limitada al norte por el Macizo del Ávila con los Esquistos San Julián y al sur por el cerro Colorado (Urbani y Rodríguez, 2004) principalmente sobre los Esquistos Las Mercedes y en la cuenca la Formación Guatire (cementada y no cementada) del Plio – Pleistoceno (Figura 96). La cuenca está delimitada por la Falla Ávila en el norte y el sistema de fallas Guarenas al sur; la aceleración pico en roca es $A_0 = 0,27 \text{ g}$ (COVENIN 1756, 2019).

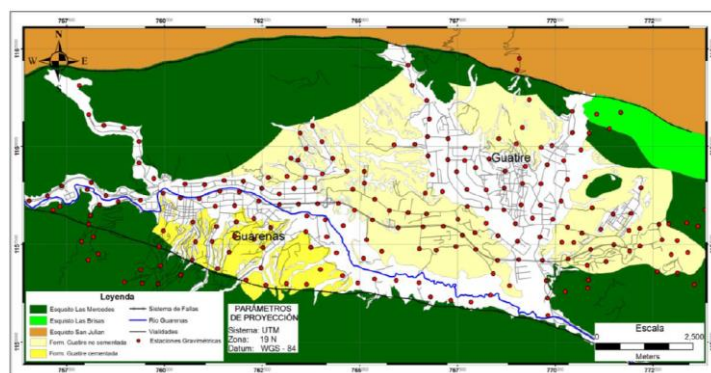


Figura 96. Geología (basada en Urbani y Rodríguez, 2004) y puntos de medición gravimétrica en Guarenas y Guatire (Amarís et al., 2011b).

En una primera fase se adquirieron 390 mediciones de ruido ambiental, 600 mediciones gravimétricas y 21 perfiles sísmicos. Los períodos predominantes del suelo varían entre 0,23 y 2,2 s (Figura 97).

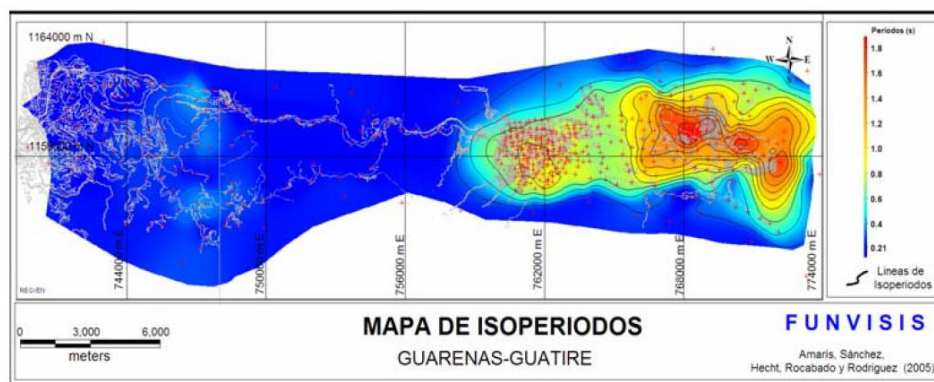


Figura 97. Mapa de períodos fundamentales del suelo de la cuenca Guarenas-Guatire (Sánchez et al., 2005b).

A partir del modelado 3D de los datos gravimétricos, Sánchez et al. (2005b) reportan espesores de sedimentos en la cuenca hasta 360 m en Guatire, mientras que Amarís et al. (2011b) indican un espesor máximo de 280 m (Figura 98).

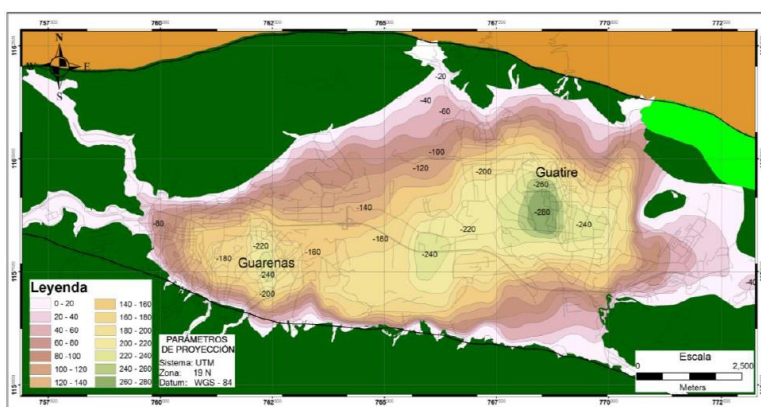


Figura 98. Mapa del espesor de sedimentos de la cuenca Guarenas-Guatire (Amarís et al., 2011b).

Para determinar las velocidades de ondas de corte de los sedimentos se desarrollaron mediciones sísmicas (Sánchez, 2015) y ReMi largos (García, 2012). En Guatire los promedios de V_s de los sedimentos someros son del orden de 420-500 m/s y de los sedimentos profundos (hasta 270 m de profundidad) 850-900 m/s y en Guarenas de 400 m/s y 1000 m/s (hasta 120 m de profundidad), respectivamente; la V_s del basamento está alrededor de 1600 m/s. Morfe et al. (2015) estimaron la respuesta sísmica 2D del suelo mediante una simulación de la propagación de las ondas sísmicas y la generación de sismogramas sintéticos con un método híbrido. En la zona profunda de Guatire los espectros de respuesta de aceleración horizontal para suelo blando son mayores para todos los períodos, lo que deberá tomarse en cuenta en el cálculo la respuesta del suelo en superficie. Singer et al. (2008) evaluaron los procesos geomorfológicos activos en la cuenca.

Guerrero et al. (2024) crearon un mapa de microzonas sísmicas preliminares de los municipios Plaza y Zamora, en función del parámetro V_{s30} y el espesor sedimentario de la cuenca (Figura 99). Recopilaron la información de los trabajos previos en la zona y realizaron 166 mediciones sísmicas (Schmitz et al., 2020c; analizadas mediante el método iMASW) y de ruido ambiental para determinar las velocidades V_{s30} y los períodos predominantes de vibración del suelo para su integración con los espesores de sedimentos. La microzona MS5, asociada a arcillas duras, aluviones recientes y sedimentos consolidados del Cuaternario con V_{s30} de 200-400 m/s y espesores de sedimentos mayores a 250 m en Guatire, es considerada la de mayor potencial de amplificación. Queda pendiente el desarrollo de los espectros de respuesta en superficie y las respectivas ordenanzas municipales.

Se realizó un diagnóstico situacional con fines de gestión del riesgo considerando los estudios geológicos y geofísicos, el fondo habitacional, las líneas vitales y la fragilidad ambiental (Guasch et al., 2011). Los resultados fueron utilizados para una cartografía del riesgo sísmico detallada que permitió determinar las zonas de mayor riesgo sísmico (Morejón et al., 2014).

Mapa de microzonas sísmicas de la cuenca Guareñas - Guatire, municipios Plaza y Zamora, edo. Miranda

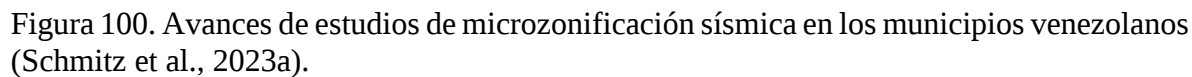
Legenda

- MS 5 [200 - 400 m/s] - [> 250 m]
- MS 4-2 [200 - 400 m/s] - [150 - 250 m]
- MS 4-1 [400 - 650 m/s] - [150 - 250 m]
- MS 3-2 [200 - 400 m/s] - [80 - 150 m]
- MS 3-1 [400 - 650 m/s] - [80 - 150 m]
- MS 2-2 [200 - 400 m/s] - [0 - 80 m]
- MS 2-1 [400 - 650 m/s] - [0 - 80 m]
- MS 1 [> 650 m/s] - [0 - 80 m]

Rio Guareñas
 ValidadesGG
 Falla Tacagua_Avila
 Contorno Municipios
 Zona_de_Falla

0 1 2 3 4 5 6 7 8
KM

En la Figura 100 se muestran los municipios venezolanos que cuentan con estudios de microzonificación sísmica y su estado de avance.



6 DESAFÍOS Y LIMITACIONES

6.1 Finalización o actualización de estudios

La revisión de los avances logrados en materia de microzonificación sísmica en las últimas dos décadas da constancia de un esfuerzo importante en el conocimiento del subsuelo en las zonas más sísmicas de Venezuela (ver Figura 100). En una gran parte de las ciudades se logró llegar a la definición de microzonas sísmicas preliminares, sin que se hayan definido espectros en superficie específicos para las diferentes microzonas sísmicas. Por ello, para poder llegar a la fase de implementación de los estudios, se debe realizar el cálculo de la respuesta sísmica en superficie para la definición de espectros en complemento de los espectros de la norma de Construcciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2019).

En la mayoría de las ciudades no se ha hecho un énfasis sistemático en la definición de los efectos inducidos, con excepción de Caracas y Barquisimeto, dónde se ha definido el peligro de deslizamiento de laderas o del borde de la terraza, y de Cumaná, Valencia, Maracay y el Área Metropolitana de Barcelona, donde se han generado primeras evaluaciones del potencial de licuación. Estos esfuerzos deben sistematizarse ajustado al contexto geográfico de las respectivas ciudades, en el caso de las ciudades andinas y en montañas, donde el peligro de deslizamiento juega un rol importante y las ciudades costeras, muchas veces con un importante potencial de licuación.

Desde el punto de vista tecnológico se ha dado un salto importante en estos últimos 20 años; el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite la integración de múltiples capas de información. En la parte de investigación geofísica se ha migrado del uso de sísmica activa al uso de diferentes metodologías de sismología pasiva, desde el análisis de mediciones o arreglos de ruido hasta perfiles sísmicos pasivos analizados por ReMi o iMASW. Este cambio permite una densa adquisición de datos para determinar las propiedades del subsuelo (V_{s30} y V_s hasta el basamento, período fundamental) como insumo principal para los cálculos de la respuesta sísmica en superficie y los respectivos espectros de respuesta en las microzonas sísmicas.

6.2 Retos en la implementación normativa

La principal norma legal para la implementación de los resultados de estudios de microzonificación sísmica es la norma de Construcciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2019). En la definición de las acciones sísmicas (Sección 1.3.2) se indica que las ciudades con más de 100.000 habitantes deberán tener un estudio de microzonificación sísmica y que se debe establecer un plan nacional de microzonificaciones sísmicas para ello. Igualmente indica que, en caso de existir una microzonificación sísmica avalada por la autoridad competente, los valores de los mapas de amenaza sísmica deben sustituirse por los dados en ésta. Además, para la definición de los efectos de sitio, se utilizará como profundidad H la establecida en la microzonificación sísmica y el valor local de V_{s30} en el sitio se comparará con el rango indicado para la microzona prescrita en la microzonificación sísmica, así como las indicaciones para efectos inducidos. Se usarán los espectros elásticos definidos en la microzonificación sísmica y se deberán implementar las que ya se finalizaron.

La implementación es un proceso muy complejo que requiere tanto del consenso técnico (muchas veces obtenido con los funcionarios de las direcciones municipales de Ingeniería, Urbanismo y Protección Civil) como de la formulación y aprobación de las respectivas ordenanzas municipales con las respectivas comisiones de los concejos municipales (en muchos casos la comisión de urbanismo). Este proceso de implementación legal tarda hasta más tiempo que el propio estudio técnico (Figura 101), de manera que en Caracas aún falta la aprobación de las ordenanzas en los municipios Chacao y Baruta.

Sin embargo, cuando se trata de una actualización del estudio, la implementación legal puede ser más rápida, como es el caso de Bogotá (Colombia), donde el respectivo decreto municipal de la tercera revisión técnica fue implementado en el mismo año 2010 (Schmitz et al., 2025), mientras que el decreto del primer estudio de 1997 fue publicado en el año 2001. Un factor que podría haber favorecido la implementación en Bogotá respecto a Caracas es el hecho de que en Bogotá el Decreto es publicado por el Alcalde Mayor de Bogotá, mientras en Caracas son 5 municipios que deben publicar las respectivas ordenanzas.

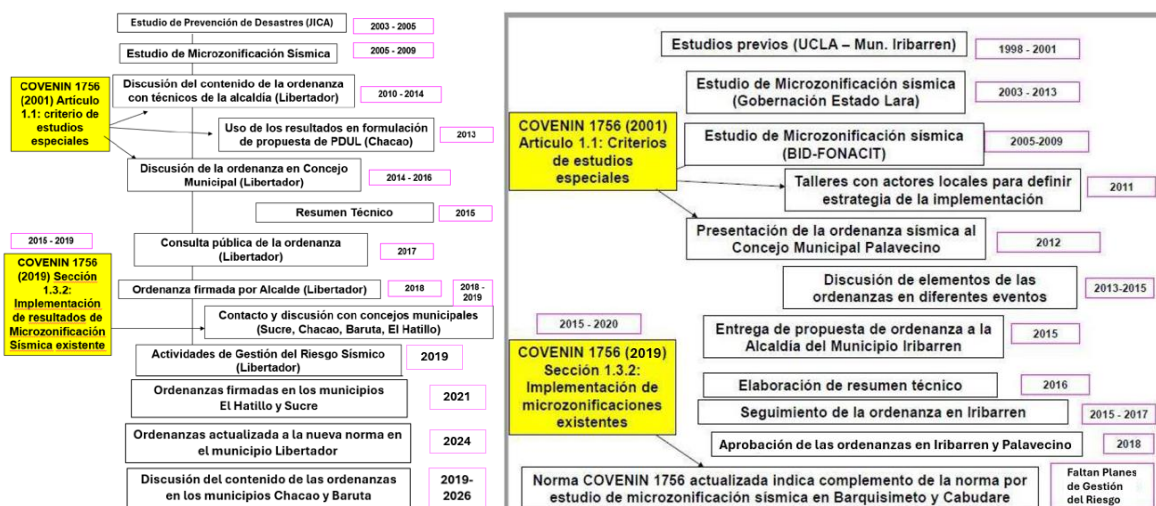


Figura 101. Diagrama de flujo de las actividades para la implementación de los resultados de los estudios de microzonificación sísmica en ordenanzas municipales en las áreas metropolitanas de Caracas (izquierda) y Barquisimeto (derecha; adaptado y actualizado de Schmitz et al., 2020a; 2020b).

6.3 Resultados y aplicaciones prácticas

Una de las incógnitas importantes en la implementación de los resultados de estudios de microzonificación sísmica es, hasta qué punto los espectros de diseño son utilizados en la práctica en el diseño de las edificaciones o la evaluación de su vulnerabilidad (ver Figura 1). En el Área Metropolitana de Barquisimeto aún no ha sido implementado, mientras que en el municipio Chacao los resultados del estudio de microzonificación sísmica se introdujeron en el diseño del Plan de Desarrollo Urbano Local (PDUL) en 2013, de manera de promover una mayor seguridad para edificaciones altas en la zona de la cuenca con grandes espesores de

sedimentos; lamentablemente, esta propuesta no ha sido introducida formalmente para su publicación.

En el Área Metropolitana de Barcelona, donde los estudios de microzonificación sísmica fueron acompañados por una intensa interacción con los funcionarios municipales (Delgado et al., 2014), los resultados, aún preliminares, fueron considerados dentro de las herramientas de ordenación urbanística y ordenación del territorio. En aquel momento, los resultados preliminares de la microzonificación sísmica para Barcelona fueron incorporados a la propuesta del Plan de Ordenación Territorial Local (POTL) del sector Maruica, en Barcelona. Además, se estableció un vínculo operativo con el equipo que desarrollaba el Plan de Desarrollo Urbano Local (PDUL) de Barcelona, para que las variables sísmicas generadas por FUNVISIS se integraran de manera coherente a la normativa urbana (M. Capriles, com. pers., 2026). De las discusiones técnicas en las cuales se evaluó cómo traducir los mapas de amenaza sísmica diferenciada, la caracterización geotécnica de suelos, los períodos fundamentales de vibración, las zonas de amplificación y los niveles de aceleración esperada, en criterios urbanísticos y constructivos vinculantes se plantearon, entre otras: 1) Restringir la construcción de piscinas elevadas sobre estacionamientos o en azoteas, debido al incremento significativo de cargas dinámicas y al riesgo asociado a modos de vibración acoplados. 2) Regular la altura máxima permitida para edificaciones en zonas donde la aceleración espectral, los tipos de suelo y la respuesta dinámica local incrementaban el riesgo estructural. 3) Incorporar refuerzos estructurales en edificaciones existentes, incluyendo soluciones prácticas como la Cruz de San Andrés en estructuras de mampostería confinada o en edificaciones sin un adecuado sistema de diafragma rígido. 4) Establecer zonas de limitación o condicionamiento del desarrollo urbano en sectores donde la microzonificación indicaba susceptibilidad elevada a efectos como licuación. 5) Ajustar el índice de ocupación del suelo, densidades y usos, según los niveles de amenaza sísmica local.

6.4 Transferencia de conocimiento y tecnología

La clave para una exitosa implementación de los resultados de estudios de microzonificación sísmica es una acertada interacción con los funcionarios de las alcaldías, pero también con los representantes de los concejos municipales. En los proyectos en las áreas metropolitanas tanto en Caracas como en Barquisimeto se interactuó con las alcaldías, principalmente con los funcionarios de las direcciones de Infraestructura, Catastro, Planificación Urbana y Protección Civil, pero también de la Alcaldía Metropolitana de Caracas y la gobernación del estado Lara, mediante talleres con el fin de implementar los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con la información del proyecto en las alcaldías y discutir las estrategias de implementación (Aguilar et al., 2015; 2016; Figura 101). Posteriormente se discutieron los contenidos de las ordenanzas municipales con representantes de los concejos municipales.

Para Caracas se desarrolló una herramienta en línea que permite calcular para cada punto en el mapa el respectivo espectro de diseño y de esta manera facilita la aplicación de los resultados en las ordenanzas municipales (Gómez et al., 2014). De esta forma se pueden visualizar rápidamente los efectos de cuenca por ejemplo en el este de Caracas y tomar consideraciones especiales para edificaciones altas (existentes y por construir), tal como se

discute en Padrón et al. (2011), proponiendo la activación de procesos de gestión urbana que garanticen la reducción del riesgo sísmico. En estas zonas se tendrán espectros más exigentes, mientras en otras partes de Caracas puede haber espectros menos exigentes que en la norma.

7 IMPACTO EN LA MITIGACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

7.1 Contenido de las ordenanzas municipales

Como principal herramienta para la implementación de los resultados de los estudios de microzonificación sísmica, las ordenanzas municipales para edificaciones sismorresistentes (Figura 102) presentan los mapas de microzonificación sísmica con las indicaciones como ubicar los respectivos edificios en las diferentes microzonas, incluyendo las franjas de fallas activas. Para cada microzona sísmica se indican los diferentes espectros con sus parámetros y factores según el tipo de construcción, irregularidades y efectos topográficos con su procedimiento de diseño. Se describen los estudios geotécnicos o geofísicos que deben realizarse en el sitio, así como las consideraciones en caso de ubicarse en una ladera con peligro de deslizamientos.

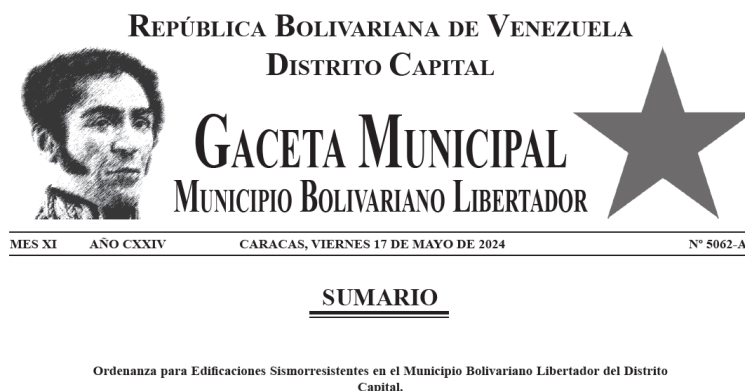


Figura 102. Portada de la Gaceta Municipal con la Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital (2024).

De acuerdo con las indicaciones en la norma COVENIN 1756 (20219) se requiere una certificación especial como especialista en ingeniería sismorresistente para el diseño de ciertas edificaciones, como por ejemplo edificaciones de más de 8 pisos de altura en microzonas de gran espesor de sedimentos, así como indicaciones para la revisión de los proyectos. Para los funcionarios de las alcaldías se agrega una guía para revisar el cumplimiento de lo indicado en la ordenanza en los proyectos de construcción. Con el fin de tener una base sólida para la gestión del riesgo sísmico se crea un registro de edificaciones, en el cual entrarán todas las edificaciones nuevas y con modificaciones. Éste será complementado en el marco de los planes especiales de gestión del riesgo sísmico mediante la evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones existentes y se indican criterios de priorización para la evaluación sismorresistente y el reforzamiento estructural si fuera requerido según los estudios. Para su cumplimiento se establecen lapsos, en algunas

ordenanzas asociadas con sanciones, y se proporcionan enlaces a instituciones, así como un fondo financiero que podrá ser utilizado también en caso de ocurrencia de un evento sísmico.

7.2 Evaluación sísmica y propuestas de mitigación

En el marco de los proyectos de microzonificación sísmica se evaluó en varias ciudades la vulnerabilidad de edificaciones existentes. Con el fin de establecer recomendaciones para reforzamiento de los edificios de mayor riesgo según su ubicación en las microzonas, se realizó una evaluación aproximada de edificios típicos en Caracas (Hernández, 2009c; Hernández y Domínguez, 2009). Para 13 prácticas de construcción (según los respectivos códigos) empleados entre 1939 y 2009, y para edificios de 1 a 20 pisos, se estimaron sus espectros inelásticos de diseño y se compararon con la demanda inelástica de los espectros en 8 microzonas. Este grupo de espectros fue dividido en grupos de dos espesores de depósitos (más y menos de 120 m), y tres alturas de edificios (bajo, mediano y alto). Con fines de evaluación se presenta el índice de confiabilidad estructural asociado a daño intermedio para el sismo de diseño ($A_0 = 0.28 \text{ g}$) (Tabla 1) para dos escenarios sísmicos menores, correspondientes a $A_0 = 0.1$ y 0.167 g (Hernández, 2009c). En las ordenanzas municipales, la priorización de reforzamientos sísmicos de los edificios con respecto a su ubicación dentro de las diferentes microzonas, se apoya en esta evaluación, siendo su práctica de construcción y la clasificación según su uso los factores más influyentes (añadiendo una penalización por las construcciones irregulares).

En el marco de varios proyectos de investigación se evaluaron más de 1000 edificaciones en Caracas respecto a su vulnerabilidad (López y Coronel, 2024). Los autores presentan la metodología y los resultados de las evaluaciones del riesgo sísmico de las construcciones existentes en Caracas, tanto las formales hechas por profesionales siguiendo criterios técnicos normativos, como las construcciones informales. Se evalúan en detalle edificaciones escolares, de salud, otros edificios esenciales, edificios de vivienda y viviendas populares y puentes, se identifican los sistemas más vulnerables y se dan recomendaciones para reducir el riesgo sísmico, incluyendo propuestas de reforzamiento. En específico existen planos de reforzamiento para varias edificaciones escolares, contruidos con sistemas constructivos tipificados (López et al., 2015), cuyo reforzamiento sismorresistente podría gestionarse en el marco de la aplicación de los resultados de la microzonificación sísmica y los respectivos planes de gestión del riesgo sísmico.

En Guarenas y Guatire, la principal zona de expansión del Área Metropolitana de Caracas, se determinó la vulnerabilidad de las tipologías constructivas existentes y se estimaron las pérdidas humanas y materiales, además de proponer medidas generales de reforzamiento estructural (Morejón et al., 2014). Aparte de las edificaciones informales, se identificaron los edificios de muros de concreto armado en una dirección como muy vulnerables y se sugieren medidas urgentes de reforzamiento estructural para mejorar su comportamiento.

Tabla 1. Índices de confiabilidad estructural β , ante “A0 ~ 0.28 g” para daño intermedio # (Hernández, 2009c).

NORMA DISEÑO C/A	NORMA SÍSMICA	DEPÓSITOS SOMEROS			DEPÓSITOS PROFUNDOS		
		Edif. BAJOS	Edif. MEDIANOS	Edif. ALTOS	Edif. BAJOS	Edif. MEDIANOS	Edif. ALTOS
MOP-39	MOP-39	0.01	0.05	0.29	0.06	-0.36	-0.25
MOP-47	MOP-47						
	Rs > 2	-0.44	-0.98	-1.05	-0.42	-1.25	-1.49
MOP-55	MOP-55						
	Rs ≤ 2	-0.12	-0.22	-0.04	-0.08	-0.60	-0.56
	No ofic.	-0.22	-1.13	-1.86	-0.20	-1.39	-2.18
MOP-67	MOP-67						
	Ofic.	-0.11	-0.65	-1.01	-0.08	-0.98	-1.44
		0.34	0.64	0.99	0.40	0.18	0.42
		0.61	1.07	1.49	0.67	0.58	0.90
ACI 318-71 = COVENIN 1753-81		0.86	1.53	1.99	0.91	1.02	1.39
		1.08	1.49	1.35	1.12	0.93	1.00
ACI 318-80 = ATC 3-06	COVENIN 1756-82	1.33	1.86	1.74	1.38	1.28	1.38
		1.55	2.17	2.06	1.60	1.57	1.70
COVENIN 1753-85	COVENIN 1756-98	2.07	2.75	2.60	2.24	2.52	2.79
	COVENIN 1756:2001	1.79	1.87	1.89	1.84	1.28	1.52
	PMZS-CCS	2.09	1.87	1.77	2.09	1.87	1.77

Violeta: alto riesgo; Rojo: riesgoso; Naranja: algún riesgo; Verde: seguro/econ.; Azul: sobre-seguro.

En el Área Metropolitana de Barquisimeto se realizó una auditoria de vulnerabilidad sísmica que atendió, aparte de las edificaciones ordinarias, las edificaciones esenciales y las líneas vitales (Rojas et al., 2016; Figura 35). Como resultado se obtuvo una zonificación de las ciudades Barquisimeto y Cabudare por tipologías urbanas que sirve como base para un estudio detallado de vulnerabilidad, así como para el ordenamiento urbano.

En el Área Metropolitana de Valencia (AMV), Pombo (2018) hizo una evaluación de la vulnerabilidad basado en la clasificación de más de 200.000 edificaciones mediante la creación de una extensa base de datos y con inspecciones visuales rápidas con el fin de obtener índices de vulnerabilidad, de priorización y de riesgo sísmico. Se analizaron 41 modelos estructurales y resalta la ausencia de vigas altas y el adosamiento de losa contra losa

como irregularidades que poseen más de la mitad de las edificaciones estudiadas. En general, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico encontrado en el AMV es alto, afectando a más de la mitad de la muestra, en su mayoría motivado al año de construcción, a alguna irregularidad o por la tipología constructiva.

La información de vulnerabilidad recabada y las propuestas de reforzamientos sísmico deberían utilizarse en el marco de los planes municipales de gestión del riesgo, cuya creación está indicada en la Ley de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos (2009) y que están contemplados en las ordenanzas municipales de edificaciones sismorresistentes. Actualmente se considera la necesidad de que los riesgos de desastres sean interpretados de manera más holísticas, integrales y más sociales donde se presente un estudio de los procesos que constituyen la construcción social del riesgo. Incluso podría exponer a los responsables a una penalización (Molina, 2017). Los planes municipales de gestión del riesgo podrían contribuir considerablemente a la mitigación del riesgo sísmico mediante la sistematización de la información y los reforzamientos sismorresistentes de edificaciones, para los cuales ya existen planteamientos concretos (sobre todo para edificaciones escolares), pero, con pocas excepciones, no se han gestionado los reforzamientos.

7.3 Participación comunitaria y educación sísmica

Otro aspecto importante para la mitigación del riesgo sísmico es la incorporación de las comunidades en los estudios y la transferencia del conocimiento hacia ellas. En los proyectos de microzonificación sísmica llevados a cabo desde FUNVISIS, se ha impulsado a través del Aula Sísmica la sensibilidad hacia el riesgo sísmico mediante la formación de multiplicadores en prevención sísmica. En Caracas se han desarrollado, en cooperación con diferentes organismos, unos 650 talleres, en los cuales se discutieron el proyecto de microzonificación sísmica y los resultados esperados (Aguilar et al., 2015). Parte de las actividades fue el relato de la percepción de sismos sentidos por los participantes y el uso de medidas de autoprotección en los diferentes ámbitos (en los hogares, escuelas y lugares de trabajo).

En Barquisimeto, las actividades de divulgación y capacitación sísmica desarrolladas en los sectores comunitarios brindaron una excelente oportunidad de involucrar e informar a las personas sobre la amenaza sísmica en el Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare y sobre el impacto del Proyecto de Microzonificación en su vida cotidiana, dándole al producto final un mayor valor social (Aguilar et al., 2016). Se demostró la necesidad de abordar el tema de la reducción local del riesgo de una manera global, debido a la recurrencia de otra clase de riesgos, como las lluvias y la inseguridad personal. Por otro lado, las comunidades apoyaron activamente en el levantamiento de los datos. De esta manera, las personas conscientes de la dimensión del riesgo sísmico pueden apoyar en la gestión de los recursos y la implementación de los resultados de la microzonificación sísmica.

8 CONCLUSIONES

8.1 Aportes clave de la microzonificación sísmica

El desarrollo de los estudios de microzonificación sísmica en las últimas décadas ha permitido un detallado conocimiento de la amenaza sísmica y la configuración del subsuelo en un número importante de ciudades venezolanas, mayormente ubicadas en el eje de las fallas activas más importantes (Boconó, San Sebastián y El Pilar). De esta manera, la microzonificación sísmica ha pasado de ser un estudio teórico con definiciones importantes logradas mediante la interacción con grupos de investigadores extranjeros (franceses y japoneses) a una herramienta fundamental para la ordenación territorial y la reducción del riesgo sísmico.

En los trabajos se ha logrado estimar los efectos locales del suelo mediante la identificación detallada de la forma de las cuencas sedimentarias y cómo su geometría contribuye a la amplificación de las ondas sísmicas (especialmente en Caracas, Barquisimeto, Guarenas-Guatire y Cumaná). El período fundamental de vibración del suelo, derivado de mediciones individuales de ruido ambiental, es un indicativo importante de la forma de la cuenca y la amplificación de las ondas sísmicas. La metodología utilizada, tanto para los espesores de sedimentos como para el Vs30, indicativo para los efectos someros, ha migrado de métodos sísmicos activos (con el uso de fuentes como explosivos o mandarría) a métodos sísmicos pasivos con el ruido ambiental como fuente. Se han aplicado métodos como ReMi o iMASW que permiten un mayor número de mediciones para una cobertura densa de mediciones, complementando información de Vs30 proveniente del análisis de la topografía.

Los métodos geofísicos de investigación del subsuelo se aplican junto con los análisis geomorfológicos, geológicos y geotécnicos para determinar la delimitación de las diferentes unidades, así como la identificación de efectos inducidos como el potencial de licuación, el peligro de deslizamientos en laderas o la afectación por ruptura de falla en superficie.

Mediante el cálculo de la amenaza sísmica local y de la respuesta sísmica en superficie, incorporando efectos de cuenca 2D y 3D, se han definido espectros de respuesta locales en las diferentes microzonas sísmicas que complementan los espectros de la norma de Construcciones Sismorresistentes (COVENIN 1756, 2019) en el ámbito local. La incorporación de los mapas de amenaza sísmica local y los efectos inducidos en los planes de desarrollo urbano contribuyen a limitar construcciones en zonas de alta amenaza y de esta manera a la mitigación del riesgo sísmico.

8.2 Reflexión final sobre los avances y desafíos

Se han logrado en las últimas décadas estudios de microzonificación en las principales áreas metropolitanas venezolanas (Caracas, Barquisimeto, Valencia, Maracay, Barcelona, Mérida, Cumaná) y otras ciudades en zonas de alta amenaza sísmica gracias a la cooperación entre FUNVISIS y universidades nacionales e internacionales, produciendo resultados aplicables que van desde la caracterización detallada del subsuelo hasta la formulación de ordenanzas municipales.

Los principales desafíos son, aparte del desarrollo de espectros de respuesta en superficie para las microzonas sísmicas en las ciudades con información avanzada sobre la configuración del subsuelo, la interacción eficiente con los actores municipales que permite la elaboración de ordenanzas municipales, su aprobación y efectiva aplicación. Estos conocimientos deben incluirse también en planes de gestión del riesgo para una eficiente mitigación del riesgo sísmico. En este sentido, un tema fundamental son las construcciones en asentamientos no controlados, donde la mitigación puede lograrse mediante la planificación urbana, evitando el uso de zonas de alto riesgo.

Los estudios de microzonificación sísmica existentes deberán ampliarse a zonas de crecimiento urbano con la aplicación de metodologías eficientes con los nuevos avances tecnológicos. Es indispensable la transferencia del conocimiento a la práctica de la ingeniería civil, las entidades municipales, a los constructores y a las comunidades. La reducción efectiva del riesgo sísmico dependerá de la implementación de los resultados de los estudios de microzonificación sísmica en ordenanzas municipales u otras herramientas de índole de planificación urbana y de gestión del riesgo sísmico y su aplicación.

9 REFERENCIAS

- Abeki, N., Seo, K., Matsuda, I., Enomoto, T., Watanabe, D., Schmitz, M., Rendón, H., Sánchez, A. (1998a). Microtremor observations in Caracas city, Venezuela. In: Irikura et al. (eds.), *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Balkema, pp. 619-624.
- Abeki, N., Watanabe, D., Hernández, A., Pernía, A., Schmitz, M., Avendaño, J. (1998b). Microtremor observations in Cumaná city, Venezuela. In: Irikura et al. (eds.), *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Balkema, pp. 613-618.
- Abreu, R., Schmitz, M. (2009). Simulación numérica de la respuesta sísmica 2D de Cumaná y Barquisimeto aplicando el método de elementos espectrales. V Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas, 4p.
- Abreu, R., Alvarado, L., Schmitz, M., Hernández, J.J. (2016). 6.3 Efectos de cuenca 2D. En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). *Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare*, FUNVISIS, pp. 141-148.
- Aguilar, A., Cano, V., Guzmán, J., Marín, W., Quintero, B. (2015). 6.2. Divulgación y capacitación en prevención sísmica, en: Schmitz, M., Singer, A. (Editores), *Microzonificación sísmica de Caracas*. FUNVISIS, pp. 165-169.
- Aguilar, A., Quintero, B., Guzmán, J., Marín, W., Figueira, W., Rodríguez, L., Quinteros, C. (2016). 6.6. Divulgación y capacitación en prevención sísmica, en: Schmitz, M., Morales, C. (Editores), *Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare*, FUNVISIS, pp. 154-157.
- Aki, K. (1993). Local site effects on weak and strong ground motion. *Tectonophysics*, 218, 93–111.
- Acosta, R., Schmitz, M., Rondón, F. (2021). Mapa de Vs30 de Carúpano a partir de la topografía. XVI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 2p.
- Acosta, Y., Sánchez-Rojas, J., Pastor, P., García, K., Schmitz, M. (2018). Integración de estudios geofísicos en Valle de la Pascua con fines de microzonificación sísmica. JIFI-UCV, 9p.
- Alba, D. (2022). Determinación de microzonas sísmicas del Área Metropolitana de Barcelona basadas en la evaluación de Vs30 y espesores sedimentarios. TEG, USB, 87p.
- Alba, D., Rondón, F., Schmitz, M., Paolini, M. (2023). Microzonas sísmicas preliminares del Área Metropolitana de Barcelona basadas en la evaluación de Vs30 y espesores sedimentarios. II Congreso Venezolano de Geociencias, Caracas, 2p.

- Allen, T., Wald, D. (2009). On the use of High-Resolution Topographic Data as proxy for seismic site conditions (Vs30). *Bull. Seismol. Soc. Am*, 99, (2A), 935-943.
- Ali, F. (2021). Evaluación del potencial de licuación de suelos utilizando información geofísica y geotécnica en Maracay, estado Aragua. TEG, UCV, 126p.
- Alonso, J.L. (1975). La microzonificación sísmica como elemento imprescindible en el planeamiento urbano. *Bol. Col.-Ing. Ven.*, 304.
- Alonso, J.L. (1976). Microzonificación sísmica de Mérida - espectros sísmicos, coeficientes de corte basal de diseño y recomendaciones finales. Ministerio de Obras Públicas, Oficina Técnica Especial del Sismo, Caracas, 48p.
- Alonso, J.L., Larotta, J. (1977). Seismic Risk and Seismic Zoning of the Caracas Valley. 6^{to} Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica, Nueva Delhi, abstract.
- Amarís, E., Schmitz, M., Murphy, V. (2011a). Map of sediment thickness as primary input for the Caracas Seismic Microzoning Project. 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago de Chile, Paper Nr. MOSAM, 12p.
- Amarís, E., Moncada, J., Schmitz, M. (2011b). Modelo gravimétrico del basamento de la cuenca de Guarenas y Guatire estado Miranda. Venezuela. I Congreso Venezolano de Geociencias, Caracas, 4p.
- Aranguren, R. (2018). Aportes para la integración de estudios de zonificación de amenazas naturales en la gestión urbana del Municipio Libertador, Mérida. TEG-Msc, ULA, 94p.
- Aray, J. (2008). Estudio geofísico integrado en la ciudad de El Tocuyo y zonas adyacentes. (Municipio Morán, Estado Lara). TEG, UCV.
- Aray, J., Schmitz, M., Amarís, E., Rocabado, V., Rendón, H., López, R., Romero, G., Singer, A., Rodríguez, L., Rodríguez, J.A., Audemard, F., Paolini, M., Morales, C., Ascanio, W., Sánchez, C., Olivier, M., Betancourt, A., Leal, K., Scremin, L., Carrillo, E., López, O.A., Coronel, G. (2010). Informe técnico de avance proyecto LOCTI: microzonificación sísmica en la ciudad de Cumaná, estado Sucre. FUN – 029, 2010. Inédito, 9 anexos, 60p.
- Aray, J., Rocabado, V., Sánchez-Rojas, J., Morales, C., Schmitz, M., Álvarez, F. (2015). Resultados de estudios geofísicos realizados en la ciudad de Cumaná como aporte al proyecto de microzonificación sísmica de la ciudad. X CONVESIS, Cumaná, 6p.
- Arnaiz-Rodríguez, M.S., Crasto, N., Koulakov, I., Sánchez-Gamboa, A.K., Audemard, F.A., Reinoza, C.E., Schmitz, M. (2026). Insights on Northeastern South America Tectonics from Local Event Tomography. *J. S. Am. Earth Sci.*, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105936>.
- Audemard, F., González, J., Rodríguez, J.A., Schmitz, M. y Singer, A. (2000a). Aportes de FUNVISIS a la evaluación de la amenaza sísmica en Venezuela y de sus potenciales efectos sobre la infraestructura (desde la vivienda modesta hasta la instalación estratégica). In: Lafuente, M. et al. (eds.), Seminario 2000, Desastres sísmicos: Escenarios, seguridad y prevención en ciudades de países en desarrollo. CESIS-IMME, Caracas, AS1-AS24.
- Audemard M., F.A., Machete, M.N., Cox, J.W., Dart, R.L., Haller, K. (2000b). Map and database of Quaternary faults in Venezuela and its offshore regions. US Geological Survey, Open-file report 00-018, 72p. + map.
- Audemard, F.A., Romero, G., Rendón, H., Cano, V. (2005). Quaternary fault kinematics and stress tensors along the southern Caribbean from fault-slip data and focal mechanism solutions. *Earth-Sci. Rev.*, 69, 181–233.
- Audemard, F.A., Alvarado, L., Arnaiz-Rodríguez, M., Romero, G., Reinoza-Gómez, C.E., Martínez-González, A.I., Sánchez-Gamboa, A.K., Lebrun, J.F., Rodríguez, L.M., Rodríguez, J.A., Philippon, M., Singer, A., González, J., Lotuffo, M. (2025). Sismicidad de profundidad intermedia de la losa de subducción de las Antillas menores, próxima a la península de Paria, Venezuela. *Bol. Geol.* 47 (1), 105–127. <https://doi.org/10.18273/revbol.v47n1-2025005>.
- Ávila, J., Schmitz, M., Oropeza, J., García, K., Moncada, J.A. (2012). Estimación de espesores sedimentarios de las ciudades de Carora, El Tocuyo, Duaca, Tamaca y Quíbor como aporte en la microzonificación sísmica en el estado Lara. Informe Técnico, FUN – 021, 2012, 85p.
- Ávila, J., Oropeza, J., Gómez, A., Schmitz, M., García, K. (2014). Integración de datos geofísicos y geológicos para la microzonificación sísmica de Carora, estado Lara. *GEOS*, 46(1), 1-17.

- Ávila, J., Aray, J., Colón, S., Schmitz, M. (2016). Microzonas sísmicas de El Tocuyo, estado Lara basadas en integración de datos geofísicos y geológicos. VII Coloquio de Microzonificación Sísmica, Mérida, 26p.
- Bard, P.Y. (1999). Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? In: Irikura, K., Kudo, K., Okada, H., Sasatani, T. (eds.), *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion - Recent progress and new Horizon on ESG Study*, vol. 3, Balkema, pp. 1251-1279.
- Barrios, I., Rendón, H., Schmitz, M., Martínez, A. (2019). Relocalización absoluta y relativa de la secuencia sísmica de Lagunillas, estado Mérida, Venezuela. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 34(1), 9p.
- Bechtold, M. (2004). Mapa geológico digital de Barquisimeto y alrededores con énfasis cuaternario. Informe inédito. FUNVISIS.
- Bellizzia, A., Rodríguez, D. (1968). Consideraciones sobre la estratigrafía de los estados Lara, Yaracuy, Cojedes y Carabobo. *Bol. Geol., Caracas*, 9(18), 515-563.
- Bezada, M.J., Magnani, M.B., Zelt, C.A., Schmitz, M., Levander, A. (2010). The Caribbean-South American plate boundary at 65°W: results from wide-angle seismic data. *J. Geophys. Res.* 115, B08402. <https://doi.org/10.1029/2009JB007070>.
- Boore, D.M. (2004). Estimating V_s (30) (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths < 30 m). *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94, 591-597.
- Bramerini, F., Castenetto S., Naso G., and the SM Working Group Guidelines for Seismic Microzonation (2015). Guidelines for seismic microzonation. Conference of Regions Autonomous Provinces of Italy, Civil Protection Department, 124p.
- Bueno, M., Schmitz, M., Hernández, J.J., Domínguez, J., Tagliaferro, M., Moncada, J., García, K., Molina, D., Amaris, E., Aguilar, I., Paolini, M., Rocabado, V., Sánchez, C., Ávila, J., Reinoza, C., Morales, C. (2009). Caracterización física del terreno con fines de Microzonificación Sísmica de la zona del proyecto “Ciudad Camino de los Indios”. V Coloquio sobre Micro-zonificación Sísmica, Caracas, 4p.
- Campos, A., Schmitz, M., Cataldi, A. (2004). Definición de las relaciones entre parámetros geofísicos y geotécnicos en pozos disponibles a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas. XVIII Seminario de Geotecnia, Caracas, 12p.
- Cárdenas, H., Rocabado, V., Schmitz, M. (2015). Caracterización sísmica del suelo de la ciudad de Rubio por el método H/V, municipio Junín, estado Táchira. X CONVESIS, Cumaná, 10p.
- Casalena, M. (2011). Caracterización geofísica del suelo somero mediante la aplicación del método de refracción por microtemores (ReMi) en la ciudad de Maracay - estado Aragua. TEG, UCV, 154p.
- Cerrada, M., Klarica, S., Choy, J., Guada, C., Aranguren, R., Laffaille, J., Mazuera, F., Reinoza, C., Schmitz, M., Rocabado, V., Morales, C., Yegres, L. (2015). Determinación de microzonas sísmicas preliminares del Área Metropolitana de Mérida. *Bol. Geol.*, 37 (1), 67-74.
- CETE-Méditerranée (1993). Microzonage Venezuela 1992: El Vigía y Maracaibo. Premier bilan des séismes enregistrés. Descriptif des traitements effectués. Spectres des séismes sur les sites. Rapports spectraux site/référence. Rapports signal/bruit. 5 vol., Niza.
- Cetin, K.O Seed, R.B., Moss, R.E.S., Der Kiureghian, A. (2001). Field case histories for SPTBased In Situ Liquefaction Potential Evaluation. Geotechnical Research Rep. No. UCB/GT-2000/09.
- Colón, S. (2009) Estudio geológico integrado de la cuenca de El Tocuyo - Estado Lara, con fines de microzonificación sísmica. TEG, ULA, Mérida.
- Cornell, C. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58, 1583-1606.
- Cornou, C., Cadet, H., Rocabado, V., Schmitz, M., Rendón, H., Causse, M., Wathelet, M. (2011). Shear-wave velocities in Caracas inferred from inversion of phase velocities and ellipticities of Rayleigh waves. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 26 (2), 153-159.
- Coronel D., G., López, O. (2010). RISEV: un Sistema para la Evaluación de Riesgo Sísmico en Escuelas de Venezuela Basado en SIG. Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME). Presentado en Taller sobre SIG, FUNVISIS.
- Cornthwaite, J., Bezada, M.J., Miao, W., Schmitz, M., Prieto, G.A., Dionicio, V., Niu, F., Levander, A. (2021). Caribbean slab segmentation beneath northwest South America revealed by 3-D finite frequency teleseismic P-wave tomography. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 22, e2020GC 009431. <https://doi.org/10.1029/2020GC009431>.

- COVENIN (2001). Norma venezolana COVENIN 1756-1:2001, Edificaciones sismorresistentes. Parte 1: Articulado (1ra. Revisión), Comisión Venezolana de Normas Industriales, FONDONORMA, FUNVISIS, Caracas, <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/1756-01.pdf>.
- COVENIN (2019). Norma venezolana COVENIN 1756-1:2019, Construcciones sismorresistentes. Parte 1: Requisitos (2da. Revisión), Comisión Venezolana de Normas Industriales, FODENORCA, Caracas, <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/1756-1-2019.pdf>.
- Crasto, N., Acosta, R., Rondón, F., Schmitz, M. (2021). Modelos gravimétricos 2D de Cariaco. XVI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 2p.
- Cruces, J., Izarra, C., Schmitz, M. (2008). Modelado gravimétrico 3D en Cumaná usando datos procesados a partir de nuevos estándares. XIV Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 7p.
- Dasco, A., Rodríguez, L., Singer, A., Quintero, B. (2013). El caso Cubiro, una experiencia de gestión de riesgo compartida en una población del interior de Venezuela afectada por deslizamientos de tierra. IV Coloquio Mesoamericano de Gestión de Riesgo, Mexico, 8p.
- Decreto con Rango, Valor y Fuerza de Ley Especial de Regularización Integral de la Tenencia de la Tierra de los Asentamientos Urbanos o Periurbanos (2011). Decreto 8.198 publicado en la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 39.668 del 6 de mayo de 2011.
- Delavaud, É. (2007). Simulation numérique de la propagation d'ondes en milieux géologiques complexes: application à l'évaluation de la réponse sismique du bassin de Caracas. PhD thesis, IPGP, France, 155p.
- Delgado V., J., Jiménez, V., Barreto, S., De Lisio, A., Urdaneta, C., Schmitz, M., Courtel, F., Salcedo, A., Diez, M., Siem, G., Molina, J., Valera, L., Rangel, Á., Hernández, J.A., Leal, V., González, M.A., Llovera, R., Rubio, B., Delgado, L., Cova, J.L., Novo, I., Vásquez, Y. (2014). Estrategia V.I.D.E.O. Módulo de Transferencia de conocimientos del Proyecto Investigación Aplicada a la Gestión Integral del Riesgo en Espacios Urbanos. VI Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Valencia, 5p.
- Dengo, G. (1951). Mapa geológico de la región de Caracas a escala 1:50000. Ministerio de Minas e Hidrocarburos, Dirección de Geología.
- De Santis, F., Hernández, R. (1999). Caracterización de los suelos que licuaron durante el sismo del 9 de Julio de 1997 en Cariaco, Estado Sucre, VI CONVESIS, Mérida, 10p.
- Duque, M.E., García, K., Schmitz, M. (2011). Caracterización de los sedimentos en Duaca, Tamaca, Carora, Quibor y El Tocuyo, Edo. Lara, aplicando el método ReMi. I Congreso Venezolano de Geociencias, Caracas, 4p.
- Durán, L. (2015). Caracterización sísmica del suelo en la ciudad de San Cristóbal Estado Táchira a través del método de Nakamura. TEG-Msc, Geofísica Aplicada, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría – CUAJE, 62p.
- Duval, A.-M., Mendoza, J., Méneroud, J.-P., Prida, F., De Santis, F., Singer, A., Vidal, S. (1995). Experimental Microzonation in Venezuela, 5th International Conference on Seismic Zonation, Oct. 17-19, 1995, Nice, France, EERI, (3), 2227-2234.
- Duval, A.-M., Méneroud, J.-P., Vidal, S., Singer, A. (1998). Relation between curves obtained from microtremor and site effects observed after Caracas 1967 earthquake, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, pp. 1-9.
- Escobar, V.A., Schmitz, M., López, N., Sánchez-Rojas, J., Rondón, F. (2023). Aporte del mapa Vs30 obtenido del análisis de ondas superficiales (iMASW y ReMi) para la microzonificación sísmica de Maracay, Venezuela. II Congreso Venezolano de Geociencias, Caracas, 2p.
- Esteva, L. (1967). Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico. Boletín Técnico del IMME, 19, 49-73. XII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural y III Simposio Panamericano de Estructuras, Caracas.
- Fäh, D., Iodice, C., Suhaldoc, P., Panza, G.F. (1993). A new method for the realistic estimation of seismic ground motion in megacities, the case of Rome. Earthquake Spectra, 9, 643-668.
- Fariás, V. (2017). Inversión 1D de perfiles de ruido sísmico ambiental en la ciudad de Cumaná, Venezuela. TEG, USB, 64p.
- Feliziani, P., Piscitelli, G., Castillo, A. (2004). Sistema de Información Geográfica aplicado al subsuelo del Área Metropolitana de Caracas – Proyecto SIGAMC. XVIII Seminario de Geotecnia, Caracas, Memorias.

- Fiedler, G. (1961). El gran terremoto de El Tocuyo del 8 de agosto de 1950 y el fenómeno mecánico en el foco. Mem. III Cong. Geol. Venez., Tomo IV, 1787-1790, Bol. de Geol., Publ. Esp. N°3, MMH.
- Flores, Y. (2006). Evaluación sísmica y sondaje geotécnico de pozos en la ciudad de Caracas. TEG, UCV, 128p.
- FUNVISIS, IMME-UCV, UDO, ACV, CAV and CI-Sucre (1997). The July 9, 1997, Cariaco, Eastern Venezuela Earthquake. EERI-Newsletter, 31 (10), EERI Special Earthquake Report, pp. 1-8.
- Garcés, F., Schmitz, M., Manchego, M., Salcedo, A., Flores, H., Leal, V., Rodríguez, I., Pombo, A., Capriles, M.D., Guzmán, J., Paolini, M., Reinoza, C., Rocabado, V., Aguilar, A., Jegat, H., Alvarado, M., Cerrada, M., Dugarte, M., Ferrer, C., Flórez, J., Klarica, S., Guerrero, O., Rivero, P., Vera, B., Gutierrez, J., Guillén, W., Montilla, N., Cordero, A., Liñayo, A., Chacón, I., Del Cura, F., Maldonado, N.J., Estévez, R., Laffaille, J., Saldivia, L., Paredes, G., Marín, W. Morales, C., García, K., Aray, J., Ramírez, O., Heredia, J., Fermín, C., Hernández, R., Riveros, P., Ramos, L., Suárez, M., Vilorio, J., Martínez, A., Medina, J., Quintero, B., Romero, G., Courtel, F., Avendaño, J., Díaz, J., Sanzonetti, J., Sayago, A. (2009). Informe Técnico de Avance correspondiente al Primer Año del Proyecto. Proyecto de investigación aplicada a la gestión integral del riesgo en espacios urbanos (FONACIT 2007000939), FUNVISIS FUN-016, 2009, Inédito, 119p.
- García, C.E. (2019). Caracterización de suelos de la ciudad de Cumaná, estado Sucre aplicando arreglos de multicanal con geófonos de 1 Hz. TEG, USB, 114p.
- García, K. (2012). Caracterización geofísica en Guarenas-Guatire mediante la aplicación de técnicas de arreglos de vibraciones naturales. TEG-Msc., UCV.
- García, K., Morales, C., Sánchez, J., Schmitz, M. (2006). Determinación de velocidades de ondas de corte (V_{s30}) en el Área Metropolitana de Caracas, a partir de conversión SPT-velocidad de ondas de cortes, análisis de ondas superficiales y sísmica de refracción. VIII CONVESIS, Valencia, 9p.
- García, K., Morales, C., Schmitz, M., Hernández, J.J., Masy, J., Tagliaferro, M., Andrade, L., Rojas, R. (2016). 4.2 Características geofísicas y geotécnicas someras de los sedimentos (V_{s30}). En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, pp. 64-71.
- García, K., Hernández J.J., Rocabado, V., Schmitz, M. (2016). 6.4. Selección de microzonas en sedimentos y laderas. En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, pp. 148-151.
- García, L. (2023). Determinación de microzonas sísmicas de La Guaira, basada en V_{s30} , estudios gravimétricos y espesores sedimentarios. TEG, USB, 132p.
- García, L., Rondón, F., Crasto, N., Schmitz, M. (2023). Microzonas sísmicas preliminares del estado La Guaira, en base a evaluación de V_{s30} , estudios gravimétricos y espesor de sedimentos. II Congreso Venezolano de Geociencias, Caracas, 2p.
- García, O., Sánchez-Rojas, J., Rocabado, V., Mazuera, F., Schmitz, M. (2015). Modelado gravimétrico 3D en torno a la ciudad de Trujillo, estado Trujillo. X CONVESIS, Cumaná, 9p.
- Gascón, R., Paolini, M., Schmitz, M. (2009). Determinación de los períodos fundamentales del suelo en las ciudades de Barcelona, Puerto La Cruz y Lecherías, como aporte a la microzonificación sísmica. V Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas, 4p.
- Gil, R. (2021). Mapa de clasificación de microzonas sísmicas, con base en las velocidades V_{s30} , los espesores de sedimentos y el potencial de licuación en la ciudad de Valencia, Estado Carabobo. TEG, UCV, 149p.
- Goitia, M. (2012). Modelado gravimétrico del basamento de la zona norte de la ciudad de Valencia, Edo. Carabobo. TEG, USB, 105p.
- Gómez, J., Schmitz, M., Coronel, G., Morales, C., Santana, L.A., Bruguera, C., Rodríguez, A. (2014). Aplicación WEB para el cálculo de los espectros de diseño de las microzonas sísmicas de Caracas. VI Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Valencia, 5p.
- González, E. (2011). Formas de relieve y amenazas asociadas como criterios en las sectorizaciones de los planes urbanos. TEG-Msc, USB.
- González, J., Schmitz, M., Masaki, K., De Santis, F., Sánchez, A. (1999). Characterization of the soils in Cariaco using seismic refraction, microtremor measurements and geotechnical information AGU Spring Meeting, Boston, S228.

- González, J., Schmitz, M., Audemard, F., Contreras, R., Mocquet, A., Delgado, J. and De Santis, F. (2004). Site effects of the 1997 Cariaco, Venezuela earthquake. *Engineering Geology*, 72, 143-177.
- González, M., Álvarez, L., Schmitz, M., González, O., Rodríguez, L., Morfe, J., Guasch, F., Zapata, J., Aguilar, A., Singer, A., Miró, C., Viète, H. (2009). Principales avances del proyecto microzonificación para la planificación urbana y la gestión local de riesgo en Guarenas y Guatire, Venezuela. III Simposio de Sismología y Riesgos Geológicos, III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana, 9p.
- Graffe, J.L. (2002). El fenómeno de licuación en el subsuelo del área Norte del Estado Anzoátegui, un enfoque actual de evaluación y análisis. TEG, UDO.
- Grases, J., Altez, R., Lugo, M. (1999). Catálogo de sismos sentidos o destructores, Venezuela, 1530-1998. Acad. Cienc. Fis. Mat. y Nat. y UCV-FI, Ed. Innovación Tecnológica, FI-UCV, 654p.
- Grases J., Malaver A., González M., Herrera C., Acosta L. (2005). Amenazas naturales y vulnerabilidad en Cumaná. *Boletín Técnico IMME*, 42(3), 57-80.
- Grünthal, G, editor (2003). Escala macrosísmica europea 1998. EMS-98, versión en español, Comisión Sismológica Europea, Subcom. de Ing. Sísm., Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxemburg.
- Guasch, F., Rodríguez, L., Vega, I., Morales, C., Schmitz, M., Miró, C., Viète, H., Rada, F., González, M., Noda, F., Amaris, E. (2011). Diagnóstico situacional con fines de gestión de riesgo en las ciudades de Guarenas y Guatire, estado Miranda, Venezuela. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 26 (2), 33-48.
- Guerrero, L., Moreno, P., Schmitz, M., Rondón, F., González, D. (2024). Estudios del subsuelo mediante la aplicación de los métodos IMASW y la Relación Espectral H/V para la Microzonificación Sísmica de los Municipios Plaza y Zamora de la Cuenca Guarenas – Guatire. JIFI-EAI-UCV, 8p.
- Guillen, G. (2016). Determinación de la condición local del subsuelo a partir de mediciones de microtemores (ReMi) en la población de Lagunillas, Estado Mérida. TEG, ULA, 102p.
- Hackley, P., Urbani, F., Karlsen, A.W., Garrity, C.P. (2006). Geologic shaded relief map of Venezuela U.S. Geological Survey, open file report 2005-1038. <https://pubs.usgs.gov/of/2005/1038/index.html>; 2006.
- Hernández, A. (2008). Caracterización geofísica en la zona Tamaca-Duaca Del estado Lara, mediante estudios gravimétricos y de ruido sísmico ambiental. TEG, UCV, 184p.
- Hernández, J.J. (2007). EASP v.1a-1r. Evaluación de la amenaza sísmica probable. Programa para cálculo de respuestas espectrales de aceleración, efectos de directividad, velocidades pico e intensidades de Arias, en Plataforma SCILAB (c) INRIA-ENPC, <https://www.scilab.org/>.
- Hernández, J.J. (2009a). Revisión de la sismicidad y modelo sismogénico para actualización de las evaluaciones de amenaza sísmica en la región norcentral de Venezuela. IX CONVESIS, Caracas, 15p.
- Hernández, J.J. (2009b). Incorporación de la información macrosísmica en modelo sismogénico de Venezuela con fines de evaluaciones de amenaza sísmica. V Jornadas Venezolanas de Sismología Histórica, Mérida, 5p.
- Hernández JJ. (2009c). Confiabilidad sísmica-estructural de edificaciones existentes de Caracas. Proyecto Pensar en Venezuela, C.I.V., Jornadas 18 y 19 de septiembre de 2009, 107p.
- Hernández, J.J., Domínguez, J. (2009). Evaluación de edificaciones tipificadas. Sub.capítulo 5.3, Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007. Inédito, pp. 701-816.
- Hernández, J.J., Schmitz, M. (2009). Evaluación actualizada de amenaza sísmica para las microzonificaciones de Caracas, Barquisimeto y Cabudare. V Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas, 4p.
- Hernández, J.J, Schmitz, M. (2019). Amenaza sísmica en los Andes de Mérida, Venezuela. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 34(2), 15p.
- Hernández, J.J., Schmitz, M. (2023). Amenaza sísmica con efectos de sitio y análisis de recurrencia de intensidades para Caracas. *Rev. Ing. Sís.*, 110, 45-85. <https://www.smis.mx/index.php/RIS/index>.
- Hernández, J.J., Schmitz, M., Audemard, F., Malavé, G. (2006). Marco conceptual del proyecto de microzonificación de Caracas y Barquisimeto. VIII CONVESIS, Valencia, 8p.

- Hernández, J.J., Valleé, M., Feliziani, P., Schmitz, M., Oropeza, J., Tagliaferro, M., Castillo, A., Cano, V. (2008). Peligro sísmico de deslizamientos en laderas de Caracas. 50 aniversario de la Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG), Caracas, 14p.
- Hernández, J.J., Schmitz, M., Molina, D., Azuaje, J. (2009). Amenaza sísmica local. Capítulo 2.4 del Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, Inédito, pp. 150-250.
- Hernández, J.J., Schmitz, M., Delavaud, É., Cadet, H., Domínguez, J. (2011). Espectros de respuesta sísmica en microzonas de Caracas incluyendo efectos de sitio 1D, 2D y 3D. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 26 (2), 49–66.
- Hernández, J.J., Azuaje, J., Molina, D. (2016). 3.4 Amenaza sísmica local. En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). *Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare*, FUNVISIS, pp. 51-56.
- Hernández, J.J., Schmitz, M., Zerpa, S. (2021). Evaluación de la amenaza sísmica para la microzonificación sísmica de Carora. XVI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 2p.
- Hernández, J.J., Valleé, M.†, Schmitz, M., Oropeza, J., Tagliaferro, M., Feliziani, P. (2023). Peligro de deslizamientos en Caracas. En: Rodríguez, L.M. & equipo de apoyo técnico, *Atlas Sismológico de Venezuela*, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, ISBN: 978980 8017045, Parte 3 Geofísica, pp. 110-115.
- Hinojosa, M.G., Schmitz, M., Sánchez-Rojas, J., Rondón, F. (2021). Caracterización de la cuenca de Carúpano mediante el uso de las curvas de elipticidad de ondas de Rayleigh. XVI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 2p.
- Hobiger, M., Bard, P.-Y., Cornou, C., Bihan, N.L. (2009). Single Station Determination of Rayleigh Wave Ellipticity by Using the Random Decrement Technique (RayDec). *Geophys. Res. Lett.*, 36(14). doi:10.1029/2009gl038863.
- Idriss, I.M., Boulanger, R.W. (2004). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. *Proceedings of the 11th ICSDEE & 3rd ICEGE*. pp. 32-56.
- Kantak, P. (2001). Sediment thickness, an east-west cross section, shallow seismic velocities, and microtremor measurements in the Caracas valley. Graduate thesis, Universität Bonn (Germany) / FUNVISIS, Caracas (published on CD in GEOS, 35 (2002), UCV, Caracas), 268p.
- Kantak, P., Schmitz, M., Audemard, F. (2005). Sediment thickness and a west-east geologic cross section in the Caracas Valley. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 20(4), 43-56.
- Lang, D.H., Raschke, M., Schwarz, J. (2004). The Cariaco, Venezuela, earthquake of July 09, 1997: strong-motion recordings, site response studies and macroseismic investigations. *Schriftenreihe der Bauhaus-Universität Weimar*, 116p.
- Ley Orgánica para la Planificación y Gestión de la Ordenación del Territorio (1983). Ley Orgánica Derogatoria en la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 38.633 del 27 de febrero de 2007.
- Ley Orgánica de Ordenación Urbanística (1987). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N°33.868 del 17 de diciembre de 1987.
- Ley de la Organización Nacional de Protección Civil y Administración de Desastres (2001). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N°5.557, Extraordinaria del 13 de noviembre del 2001.
- Ley Orgánica del Sistema Venezolano para la Calidad (2002). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N°37.555 del 23 de octubre de 2002.
- Ley de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos (2009). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 39.095 del 9 de enero de 2009.
- Ley de Tierras Urbanas (2009). Gaceta Oficial Extraordinario de la República Bolivariana de Venezuela N° 5.933 del 21 de octubre de 2009.
- Linares, M., Rodríguez, L., García, I., González, O., Crasto, N., Alvarado, J.L., Schmitz, M., García, M.V., Valero, D., Abreu, O. (2026). Evidencias geomorfológicas de deformación de los sistemas de fallas activas en Boconó. Contribución al proyecto “Análisis de sistemas dinámicos sismológicos mediante gráficos de recurrencia y mapas autoorganizados para caracterizar la sismicidad en Venezuela” (Fonacit 2024PGP100), Informe inédito, FUNVISIS, 21p.

- López, N. (2021). Generación de mapas Vs30 y microzonas sísmicas, mediante el análisis multicanal de ondas superficiales interferométrico (IMASW) y ensayos geotécnicos en Maracay, estado Aragua. TEG, UCV, 99p.
- López, O.A., Coronel D., G. Editores (2024). Riesgo sísmico en Caracas y estrategias de mitigación. Ediciones de la Biblioteca EBUC-UCV, ISBN: 978-980-18-3841-8, 510p.
- López, O. A., Marinilli A., Coronel D., Editores (2015). Reducción del Riesgo Sísmico en Edificaciones Escolares de Venezuela. IMME-UCV, FUNVISIS y FEDE. ISBN: 978-980-12-7455-1 Depósito Legal: If25220146202146, 1046p.
- Louie, J.N. (2001). Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. Bull. Seismol. Soc. Am., 91, 347-364.
- Malavé, G., Suárez, G. (1995). Intermediate-depth seismicity in northern Colombia and western Venezuela and its relationship to Caribbean plate subduction. Tectonics, 14(3), 617-628, <https://doi.org/10.1029/95TC00334>.
- Martínez, C. (2007). Análisis espectral y modelado 3D de datos gravimétricos de la cuenca de Carora, estado Lara – Venezuela. TEG, UCV, 185p.
- Masaki, K., González, J., De Santis, F., Schmitz, M., Pernía, A., Sánchez, A., Saguchi, K., Duque, H. (1999). Caracterización de los suelos de Cariaco mediante mediciones de ruido ambiental, sísmica de refracción y análisis de información geotécnica. VI CONVESIS, Mérida, 6p.
- Mazuera, F., Sánchez, J., Cerrada, M., Rocabado, V., Schmitz, M., Morales, C., Yegres, L., García, K., Matos, S., Romero, M., Prieto, A., Carmona, N., Sánchez, T., García, O., Calderón, A., Linares, M. (2015). Investigación aplicada a la gestión del riesgo sísmico en las ciudades de Valera, Trujillo y Boconó, estado Trujillo, con fines de microzonificación sísmica. X CONVESIS, Cumaná, 11p.
- Medina, P., Paolini, M., Sánchez Rojas, J., Schmitz, M. (2016). Modelado preliminar 2D del subsuelo del Área Metropolitana Norte del Estado Anzoátegui, a través de datos de refracción sísmica. VII Coloquio de Microzonificación Sísmica, Mérida, 4p.
- Mendes, M. (2004). Caracterización geofísica del subsuelo de la zona oeste de Barcelona, estado Anzoátegui, aplicando métodos sísmicos y gravimétricos. TEG, UCV.
- Mijares, M.M., Schmitz, M., Sánchez-Rojas, J., Rondón, F. (2021). Estudio del parámetro Vs30 mediante el análisis multicanal de ondas superficiales en la ciudad de Valencia. XVI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 2p.
- Molina C. (2017). Penalización de la construcción social del riesgo de desastre en países Andinos. TEG-Msc, Gestión de Riesgos Socionaturales, ULA, 199p.
- Molina, D., Paolini, M., Moncada, J.A., Amarís, E., Reinoza, C., Quinteros, C., Pacheco, D. (2008). Estudio de amenaza sísmica del puerto de Carúpano y sus zonas aledañas, Estado Sucre. Contrato N° 4600005279 (PDVSA – FUNVISIS), Informe Técnico, FUN – 075, 2007, 73p.
- Molina, L., Rocabado, V., Schmitz, M. (2015). Caracterización sísmica del suelo aplicando el método de relación espectral H/V en las ciudades de San Antonio del Táchira y Ureña, estado Táchira. X CONVESIS, Cumaná, 8p.
- Molina, Z. (2016). Caracterización sísmica del suelo aplicando el método Nakamura en las ciudades Lobatera y Michelena Estado Táchira. TEG-Msc, Geofísica Aplicada, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría – CUAJE.
- Morales, C. (2006). Elaboración de un mapa de velocidades de ondas de corte hasta los 30m de profundidad mediante refracción sísmica y datos geotécnicos. TEG, UCV, 118p.
- Morales, C., Hernández, J.J., Schmitz, M., Cano, V., Tagliaferro, M. (2011). Velocidades promedias de ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad (Vs30), inferidos a partir del relieve en el Área Metropolitana de Caracas. Rev. Fac. Ing. UCV, 26 (2), 161–168.
- Morales, C., Schmitz, M., Pullammanappallil, S. (2015). Calibración del modelo geológico-geofísico del subsuelo de Barquisimeto y Cabudare a través de métodos sísmicos y la respuesta espectral en superficie. Bol. Geol., 37 (1), 57-66.
- Morejón, G., López, O.A., Berenguer, Y., Leyva, K., Villalón, M., Rengel, J.G., González, O., Álvarez, L., Schmitz, M. (2014). Evaluación del riesgo sísmico del fondo habitacional de las ciudades Guarenas y Guatire. Rev. Fac. Ing. UCV, 29(3), 37-50.

- Morfe, J., Schmitz, M., Alvarado, L., Álvarez, L., Zapata, J., Rendón, H. (2015). Simulación del campo de ondas sísmicas y caracterización de amplitud y período con fines de microzonificación sísmica para las ciudades Guarenas-Guatire. *Bol. Geol.*, 37 (1), 27-43.
- Murphy V, Linehan D, Turcotte T. (1969). Seismic investigations, Valley of Caracas and the Litoral Central. Weston, Massachusetts (under Planning and Supervision of the Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo): Weston Geophysical Engineers International, Inc.; 1969; pp. 1–22.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface. *QR of RTRI*, 30 (1).
- Niu, F., Bravo, T., Pavlis, G., Vernon, F., Renón, H., Bezada, M., Levander, A. (2007). Receiver function study of the crustal structure of the southeastern Caribbean plate boundary and Venezuela. *J. Geophys. Res.* 112, B11308.
- Olivier M. (2009). Evaluation of the liquefaction potential of the city of Cumaná, Venezuela. Internship Report. CEDI-FUNVISIS.
- OPS (1995). Evaluación sismorresistente del hospital Dr. Antonio Patricio de Alcalá, Cumaná, Estado Sucre. Organización Panamericana de Salud, Caracas, volumen 1, 132p.
- Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes del Municipio Iribarren (2018). Gaceta Municipal Extraordinaria del Municipio Iribarren, Estado Lara N° 4512 del 16 de mayo de 2018.
- Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital (2018). Gaceta Municipal del Municipio Bolivariano Libertador N° 4331-2 del 10 de julio de 2018.
- Ordenanza de Microzonificación Sísmica del Municipio Palavecino (2018). Gaceta Municipal del Municipio Palavecino, Estado Lara N° 9285 del 13 de julio de 2018.
- Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio El Hatillo del Estado Bolivariano de Miranda (2021). Gaceta Municipal del Municipio El Hatillo N° 119/2021 del 31 de mayo de 2021.
- Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Sucre del Estado Miranda (2021). Gaceta Municipal Extraordinario del Municipio Sucre N° 415-A del 25 de noviembre de 2021.
- Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital (2024). Gaceta Municipal del Municipio Bolivariano Libertador N° 5062-A del 17 de mayo de 2024.
- Ornelas A. (2018). Inversión 1D de la onda Rayleigh de datos de ruido ambiental en la ciudad de Maracay. TEG, USB, 123p.
- Oropeza, J. (2011). Resultados preliminares de la perforación profunda realizada en la ciudad de Cumaná, estado Sucre, para ulterior instalación de observatorios acelerográficos. FUN-058,2011. CEDI-FUNVISIS. 6p.
- Oropeza, J. (2012). Estudio de amenazas naturales en la cuenca de Carora, edo. Lara, con fines de microzonificación sísmica. Informe Interno FUN-067/2012, FUNVISIS. 68p. + 5 anexos.
- Pacheco, D. (2008). Estudio geofísico integrado de la ciudad de Carúpano, Edo. Sucre aplicando método gravimétrico y ruido sísmico ambiental. TEG, UCV, 138p.
- Padrón, C., Mendes, K., Schmitz, M., Hernández, J.J. (2011). La Microzonificación Sísmica en el Proceso de Planificación Urbana del Municipio Chacao. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 26 (2), 89–101.
- Padrón, M.F. (2012). Caracterización geofísica del subsuelo somero mediante ReMI en el Área Metropolitana del Norte de Anzoátegui. TEG, USB, 76p.
- Paolini, M. (2006). Análisis de los períodos fundamentales del suelo en la ciudad de Carora, Municipio Torres, estado Lara. TEG, USB, 97p.
- Paolini, M., Schmitz, M. (2014). Caracterización de sitio a partir de mediciones de ruido ambiental en la Región Norte Metropolitana del Estado Anzoátegui. VI Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Valencia, 4p.
- Paolini, M., Pacheco, D., Rocabado, V., Moncada, J., Reinoza, C., Amarís, E., Schmitz, M. (2009). Estudio geofísico integrado en la ciudad de Carúpano, estado Sucre. V Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Caracas, 4p.
- Paolini, M., Rodríguez, L.M., Olbrich, F. (2012). Actualización de las fallas activas de Venezuela como aporte a la evaluación de la amenaza sísmica. FUN-077; 2012, FUNVISIS, Caracas.

- Papageorgiou AS, Kim J. (1991). Study of the propagation and amplification of seismic waves in Caracas valley with reference to the 29 July 1967 earthquake: SH waves. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 81, 2214–2233.
- Parra, J., Morales, C., Schmitz, M., Cerrada, M., Linares, M., Sánchez Rojas, J. (2016). Analogía entre valores de Vs30 calculados para ciudades venezolanas a partir del relieve y refracción por microtemores. VII Coloquio de Microzonificación Sísmica, Mérida, 4p.
- Pastor, P (2014). Caracterización de los sedimentos someros y profundos en Valle de la Pascua, Estado Guárico, Aplicando el Método ReMi. TEG, USB.
- Pérez, O.J.P., Wesnousky, S.G., De La Rosa, R., Márquez, J., Uzcátegui, R., Quintero, C., Liberal, L., Mora-Páez, H., Szeliga, W. (2018). On the interaction of the North Andes plate with the Caribbean and South American plates in northwestern South America from GPS geodesy and seismic data. *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1093/gji/ggy230.
- Pombo A. (2018). Riesgo sísmico en el Área Metropolitana de Valencia. Tesis doctoral, U. Carabobo, Valencia, 271p.
- Pombo, A., Ramírez, O., Schmitz, M., Niño, Z. (2014). Mapas del Potencial de Licuación de los Suelos en el Área Metropolitana de Valencia, Estado Carabobo. VI Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Valencia, 4p.
- Ramírez, N. (2014). Aplicación de una metodología para zonificar susceptibilidad ante movimientos de masa. Ciudad de Mérida y sus alrededores. TEG-Msc, ULA.
- Ramírez-Lisboa, P., Guillén, B., Sánchez-Rojas, J., Schmitz, M. (2015). Modelado gravimétrico 3D del basamento del Área Metropolitana del Norte del estado Anzoátegui, Venezuela. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 30 (4), 35-48.
- Reglamento de la Ley Orgánica de Ordenación Urbanística (1991). Decreto 833, Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 34.678 del 19 de marzo de 1991.
- Reinoza, C., Sánchez, J., Schmitz, M., Klarica, S. (2006). Modelado geofísico del basamento del área Metropolitana de la ciudad de Mérida, Venezuela. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 21(4), 71-80.
- Reinoza, C., Morales, C., Rocabado, V., García, K., Sánchez, C., Abreu, R., Schmitz, M. (2011). Espesores de sedimentos a partir de la integración de datos geofísicos en Barquisimeto y Cabudare, Venezuela. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 26 (2), 67–76.
- Reinoza, C., Rocabado, V., Morales, C., Ávila, J., Schmitz, M., García, K., Sánchez, J., Sánchez, C., De Marco, R., Solórzano, A., Varguillas, P., Urbani, F. (2016). 4.3 Espesores y características de los sedimentos profundos. En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, pp. 71-82.
- Rendón, H., Alvarado, L., Vásquez, R., Romero G. (2014). Depuración y actualización del catálogo sísmico instrumental de Venezuela, BASEVEN, como producto previo al catálogo necesario en los estudios de la amenaza sísmica. FUN-056,2014, FUNVISIS, Caracas, 38p.
- Risk Engineering (1998). EZ-FRISKTM Version 4.1. Boulder, Colorado, US, <https://ez-frisk.org/>
- Rocabado, V., Schmitz, M., Rendón, H., Vilotte, J.-P., Audemard, F., Sobiesiak, M., Ampuero, J.-P., Alvarado, L. (2006). Modelado numérico de la respuesta sísmica 2D del valle de Caracas. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 21(4), 81-93.
- Rocabado, V., Schmitz, M., Sánchez, J., Reinoza, C. (2007). Geophysical studies in Barquisimeto metropolitan area, Venezuela, as contribution to a seismic microzoning Study: 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Paper No. 1425.
- Rocabado, V., Aray, J., Morales, C., García, K., Schmitz, M., Sánchez, C., Heredia, J., Pombo, A., Rojas, C., Meza, J. (2011). Determinación del espesor de sedimentos para las ciudades de Maracay y Valencia a partir de mediciones de ruido ambiental y sísmica de refracción como aporte a los estudios de microzonificación. JIFI-UCV, 2p.
- Rocabado, V., Schmitz, M., Cerrada, M. (2015). Determinación de las funciones de transferencia para la ciudad de Mérida a partir de registros acelerográficos de pozo. X CONVESIS, Cumaná, 5p.
- Rodríguez, A.R. (2013). Caracterización geofísica del subsuelo profundo mediante la técnica ReMi en el Área Metropolitana del Norte del Estado Anzoátegui. TEG, USB, 67p.
- Rodríguez, A., Sánchez, A. (2016). Determinación de los periodos fundamentales del subsuelo a través de mediciones de ruido sísmico ambiental en San Juan de Lagunillas, Edo. Mérida con fines de microzonificación sísmica. TEG, Ingeniero Geólogo, ULA.

- Rodríguez, L., Singer, A. (2016). 4.4 Evaluación de Geoamenazas en Barquisimeto-Cabudare. En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, pp. 82-98.
- Rodríguez, L., Singer, A., Rocabado, V. (2005). Evidencias geomorfológicas de fenómenos de sufosión-tubificación-colapso en el tope de la terraza pleistocena de Barquisimeto. IV Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Barquisimeto, noviembre 2005, en CD, Serie Técnica FUNVISIS No. 1, 2005, pp. 235-239.
- Rojas, C. (2008). Determinación de los períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Maracay, Edo. Aragua. TEG, UCV, 123p.
- Rojas, M. (2015). Determinación de los periodos fundamentales de los suelos en la localidad de Lagunillas Estado Mérida, a partir de mediciones de ruido sísmico ambiental, con fines de microzonificación sísmica. TEG, ULA.
- Rojas, R., Delgado, J., Domínguez, J., Hernández, J.J. (2016). 5.2 Distribución de edificaciones. En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, pp. 120-129.
- Román W. (2011). Caracterización geofísica del subsuelo mediante estudios sísmicos con fines de microzonificación en la ciudad de Cumaná, estado Sucre. TEG. UCV.
- Romero, G. (2017). Elaboración de un modelo gravimétrico en 3D del basamento en la ciudad de Maracay. TEG, USB, 68p.
- Romero, M., Cragno, A., Ambrosio, R., Schmitz, M. y González, J. (2006). Evaluación geofísica de los conos aluviales en Macuto, Caraballeda y Tanaguarena, edo. Vargas. Boletín del IMME, Vol. 44 (1), 16-29.
- Sánchez J.A. (2015). Caracterización de la cuenca de Guarenas-Guatire, estado Miranda, mediante perfiles de refracción sísmica. TEG, UCV, 57p.
- Sánchez, J., Schmitz, M. y Cano, V. (2005a). Mediciones sísmicas profundas en Caracas para la determinación del espesor de sedimentos y velocidades sísmicas. Boletín Técnico del IMME, 43(2), 49-67.
- Sánchez, J., Hecht, J., Amarís, E., Rodríguez, S., Schmitz, M. (2005b). Estudio geofísico de la cuenca de Guarenas-Guatire y la zona este de expansión de la ciudad de Caracas (Municipios Sucre y Plaza, Distrito Capital). IV Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Barquisimeto, noviembre 2005, Serie Técnica FUNVISIS No. 1, pp. 254-259.
- Sánchez, J., Götze, H.-J., Schmitz, M. (2010). A 3-D lithospheric model of the Caribbean-South American plate boundary. International J. Earth Sci., 100 (7), 1697-1712.
- Sánchez-Rojas, J., Prieto, A., Mazuera, F., Schmitz, M. (2016). Análisis y modelado 3D del subsuelo a partir de integración de información geológica y gravimétrica con fines de microzonificación sísmica de la ciudad de Valera, estado Trujillo. JIFI-UCV, 8p.
- Schmitz, M., Singer, A. (Editores) (2015). Microzonificación sísmica de Caracas. FUNVISIS, 171p.
- Schmitz, M., Morales, C. (Editores). 2016. Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare, FUNVISIS, 161p.
- Schmitz, M., Alvarado, L., González, J., Audemard, F. (1999). Informe final proyecto INTEVEP 98-437 Estudio de Neotectónica, Geología de Fallas Activas y Refracción Sísmica Superficial en el Área de Expansión Oeste de Barcelona. FUNVISIS, Informe inédito, Volumen 1, 24p.
- Schmitz, M., Alvarado, L., Lüth, S. (2005). The velocity structure of the Cariaco sedimentary basin, northeastern Venezuela, from refraction seismic data and possible relationship to earthquake hazard. J. South Am. Earth Sciences, Vol. 18 (2), 89-105.
- Schmitz, M., Romero, M., Bonive, F., Audemard, F., González, J. (2006). Resultados de mediciones sísmicas e implicaciones de dinámica de suelo en torno al hospital Dr. Antonio Patricio de Alcalá, Cumaná, Estado Sucre. Boletín del IMME, 44(1), 30-50.
- Schmitz, M., Hernández, J.J., Morales, C., Tagliaferro, M., Valleé, M., Leal, V., Rocabado, V., Cano, V., Audemard, F., Aguilar, I., Caraballo, E., Urbani, F., Rendón, H., Palma, M., Vásquez, R., Romero, G., López, R., Rodríguez, J., Molina, D., González, J., Araque, J., Ollarves, R., Rodríguez, L., Azuaje, J., Singer, A., Zambrano, A., Oropeza, J., García, K., González, M., Flores, Y., Villar, M., Justiniano, A., Moncada, J., Amarís, E., Sánchez, J., Domínguez, J., Hernández, A., Delavaud, E., Alvarado, L., Vilotte, J.-P., Feliziani, P., Castillo, A., Zamora, J., Anzola, F., Zambrano, H.,

- Colmenárez, L., Cornou, C., Cadet, H., Aguilar, A., Guzmán, J., Marín, W., Quintero, B. (2009a). Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, Inédito, 978p.
- Schmitz, M., Hernández, J.J., García, K., Leal, V., Rocabado, V., Reinoza, C., Timaure, N., Rodríguez, L., Rendón, H., Palma, M., Vásquez, R., Romero, G., López, R., Bueno, M., Rodríguez, J., Araque, J., Audemard, F., Ollarves, R., Azuaje, J., Cano, V., Molina, D., Morales, C., Masy, J., Tagliaferro, M., Andrade, L., Rojas, R., Ávila, J., Sánchez, J., Sánchez, C., De Marco, R., Solorzano, A., Varguillas, P., Urbani, F., Singer, A., Domínguez, J., Delgado, J., Marante, M.E., Andrade, M., Abreu, R., Alvarado, L., Aguilar, A., Quintero, B., Guzmán, J., Marín, W., Figueira, L., Quinteros, C. (2009b). Informe Técnico Final, Volumen 2 Barquisimeto, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035b, 2007, Inédito, 432p.
- Schmitz, M., Hernández, J.J., Morales, C., Domínguez, J., Rocabado, V., Valleé, M., Tagliaferro, M., Delavaud, É., Singer, A., Amarís, E., Molina, D., González, M., Leal, V. y el grupo de trabajo del proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas (2011). Principales resultados y recomendaciones del proyecto de microzonificación sísmica en Caracas. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 26 (2), 113–127.
- Schmitz, M., Álvarez, L., Morejón, G., García, K., López, O.A., Berenguer, Y., Leyva, K., Villalón, M., Vega, I., Rengel, J.G., Aguilar, A., Aguilar, I., Alvarado, L., Amarís, E., Ascanio, W., Audemard, F.A., Betancourt, A., González, J., González, O., Guasch, F., Leal, A., Miró, C., Morales, C., Morfe, J., Olbrich, F., Oliva, R., Páez, V., Rendón, H., Rodríguez, L., Rojas, R., Singer, A., Tagliaferro, M., Vallée, M., Viète, H., Zapata, J. (2012). Mirozonificación sísmica para la planificación urbana y la gestión local de riesgo de las ciudades en los ejes de desarrollo: caso piloto Guarenas y Guatire - continuación del proyecto anterior y estudios comparativos en Santiago de Cuba - Informe técnico final. FUN 04-2012, 414p.
- Schmitz, M., Cano, V., López, O.A., Klarica, S., Pombo, A., Díaz, J.F., Heredia, J., Avendaño, J., Morales, C. y el grupo de riesgo sísmico del proyecto Investigación Aplicada a la Gestión Integral del Riesgo en Espacios Urbanos (2015). Estudios geofísicos en cuencas urbanas en Venezuela con fines de microzonificación sísmica. *Bol. Geol.*, 37 (1), 17-26.
- Schmitz, M., Fuenmayor, R., Morales, C., Valera, E., Hernández, J.J., Chollett, E., Andrade, L., Avón, D., Mendez, R., Mendez, D., Rodríguez, L., Fernández, A.E. (2017). Proyecto de ordenanza para edificaciones sismorresistentes del municipio Iribarren, estado Lara. XI CONVESIS, Caracas, CONV-110, 14p.
- Schmitz, M., Sánchez, J., Rocabado, V., García, K., Paolini, M., Yegres, L., Ávila, J., Aray, J., Medina, P., Morales, C., Mazuera, F., Cerrada, M., Andrade, L., Rojas, R., Pombo, A., Ramírez, O., Heredia, J., Sanzonetti, E., Álvarez, F., Molina, L. (2019). Espesores sedimentarios de cuencas urbanas como aporte a los estudios de microzonificación sísmica en Venezuela. *Geominas*, 47(79), 81-98.
- Schmitz, M., Hernández, J.J., Rocabado, V., Domínguez, J., Morales, C., Valleé†, M., García, K., Sánchez, J., Singer, A., Oropeza, J., Coronel, G., Flores, A. and the Caracas Seismic Microzoning Project Working Group (2020a). The Caracas, Venezuela, seismic microzoning project: methodology, results and implementation for seismic risk reduction. *Progress in Disaster Science* 5, doi: 10.1016/j.pdisas.2019.100060.
- Schmitz, M., Morales, C., Hernández, J.J., Chollett, E., Andrade, L., Avón, D., Mendez, R., Mendez, D., Rodríguez, L., Rojas, R., Rocabado, V., García, K., Durán, L. y el grupo de trabajo de microzonificación sísmica Barquisimeto-Cabudare (2020b). Resultados e implementación de la Microzonificación Sísmica de Barquisimeto y Cabudare. *Geominas*, 48(81), 3-14.
- Schmitz, M., Rondón, F., Guerrero, L., Moreno, P., González, D., Saavedra, M.J., Contreras, M.V., Alonso, M., Ramírez, K., Díaz, H. (2020c). Informe de adquisición sísmica en Guatire en el marco del proyecto de microzonificación sísmica de Guarenas-Guatire. Informe técnico preliminar, Volumen 1. Informe inédito, FUNVISIS, FUN-GEOFISICA-001,2020, 9p.
- Schmitz, M., Ramírez, K., Mazuera, F., Ávila, J., Yegres, L., Bezada, M., Levander, A. and the active seismic working group of the GIAME project (2021). Moho depth map of northern Venezuela

- based on wide-angle seismic studies. *J. South Am. Earth Sci.*, 107, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103088>.
- Schmitz, M., Hernández, J.J., Rondón, F., Morales, C., Rocabado, V., Sánchez-Rojas, J., García, K., Paolini, M., Aray, J., Medina, P., Rodríguez, L., Mazuera, F., Yegres, L., Ávila, J., Reinoza, C., Moncada, J., Amarís, E., Ramírez K. y el grupo de Microzonificación Sísmica (2023a). Estudios de Microzonificación Sísmica en Venezuela. En: Rodríguez, L.M. & equipo de apoyo técnico, Atlas Sismológico de Venezuela, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, ISBN: 978980 8017045, Parte 3 Geofísica, pp. 92-97.
- Schmitz, M., Hernández, J.J., Zerpa, S. (2023b). Microzonificación Sísmica de Carora, Municipio Torres, estado Lara. Informe Interno FUN-008/2023, FUNVISIS, 52p. + 1 Apéndice.
- Schmitz, M., Hernández, J.J., Rocabado, V., Domínguez, J., Morales, C., Valleé, M.†, García, K., Sánchez-Rojas, J., Singer, A., Oropeza, J., Flores, A.†, Rondón, F. y el Grupo de Trabajo del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas (2023c). Estudio de microzonificación sísmica de Caracas. En: Rodríguez, L.M. & equipo de apoyo técnico, Atlas Sismológico de Venezuela, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, ISBN: 978980 8017045, Parte 3 Geofísica, pp. 98-103.
- Schmitz, M., Hernández, J.J., Günther, A., Buchert, W., Alam, M.F. (2025). Recommendations on implementing results of seismic microzonation in Bangladesh – experiences from South America. The 15th Asian Regional Conference (ARC-15) of IAEG, Kathmandu, Asian J. Eng. Geol., 2 Special Issue, ARC-15 of IAEG, Abstract No. 147. DOI: <https://doi.org/10.64862/ajeg.2025.2sp.42.147>.
- Schnabel, P., Lysmer, J., Seed, H. (1972). SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-72/12. University of California, Berkeley.
- Seed H.B., Alonso J.L. (1973). Soil-structure Interaction effects in the Caracas Earthquake of 1967. Fifth World Conference in Earthquake Engineering, Rome.
- Seed. H.B., Idriss, I.M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *J Soil Mechan Found Div*, 1249–1273.
- Seed, H.B., Idriss, I.M., Dezfulian, H. (1970). Relaciones entre las condiciones del suelo y el daño a edificios durante el sismo de Caracas del 29 de Julio de 1967. Estudio realizado para la Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo. Report EERC 70-2. University of California, Berkeley, 38p.
- Silva, P., Andrades, L., Schmitz, M., Rondón, F., Andrades-Grassi, J., Hernández, J.J. (2023). Determinación de microzonas sísmicas preliminares en El Tocuyo, municipio Morán, estado Lara, basado en la evaluación de Vs30 y espesores sedimentarios. II Congreso Venezolano de Geociencias, Caracas, 2p.
- Singer, A., Zambrano, A., Oropeza, J., Tagliaferro, M. (2007). Cartografía de las unidades geológicas cuaternarias del Valle de Caracas a escala 1:25.000. IX Congreso Geológico Venezolano, Caracas.
- Singer, A., Rodríguez, L., Noda, F. Schmitz, M. Rocabado, V. (2008). Fuentes de geoamenazas a lo largo de la ruta y para las obras del tren Caracas-Guarenas-Guatire y estudios geofísicos (sísmica de refracción en Guarenas y Guatire). Segundo informe de avance, en el estudio de amenaza sísmica, procesos geomorfológicos activos y estimación de los efectos de sitio para el proyecto del tren Caracas – Guarenas – Guatire. (Informe interno FUNVISIS), 34p.
- Singer, A., Nevado, F., Gómez, A., Rodríguez, L. (2014). Evidencias de actividad tectónica reciente en la falla de Las Trincheras. VI Coloquio de Microzonificación Sísmica, Valencia, 6p.
- Singer, A., Zambrano, A., Oropeza, J., Tagliaferro, M. (2023). Mapa de unidades geológicas cuaternarias del valle de Caracas. En: Rodríguez, L.M. & equipo de apoyo técnico, Atlas Sismológico de Venezuela, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, ISBN: 978980 8017045, Parte 3 Geofísica, pp. 104-1093.
- Stephan, J. (1985). Carte Geologique de la Transversale de Barquisimeto. Entre la faille de Boconó et le neautochtone du Falcón (Etats de Lara, Trujillo et Falcón: Venezuela). Andes et chaîne Caraïbe sur la Transversale de Barquisimeto (Vénézuéla): évolution géodynamique. Symposium géodynamique des Caraïbes. París, Francia, pp. 505-529.
- Stewart, J., Douglas, J., Javanbarg, M.B., Di Alessandro, C., Bozorgnia Y., Abrahamson, N., Boore, D., Campbell, K., Delavaud, E., Erdik, M.Y., Stafford, P. (2013). GEM-PEER Task 3 Project:

- Selection of a Global Set of Ground Motion Prediction Equations. PEER Report 2013/22, Pacific Earthquake Engineering Research Center, U. California, Berkeley, 251p.
- Sun, M., Bezada, M.J., Cornthwaite, J., Prieto, G.A., Niu, F., Levander, A. (2022). Overlapping slabs: Untangling subduction in NW South America through finite-frequency teleseismic tomography. *EPSL*, 577, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117253>.
- Theilen-Willige, B. (2002). Beitrag der Fernerkundung zur Erdbebenvorsorge -Fernerkundungsmethoden bei der Erfassung von durch Erdbeben und durch Erdbebenfolgeschäden gefährdeten Bereichen. En: Fiedler, F. (Ed.), *Naturkatastrophen in Mittelgebirgsregionen*, VWF, Berlin, pp. 245-270.
- Timaure, N., Rodríguez, L., Hernández J.J. (2016) 4.5 Caracterización de laderas. En: Schmitz, M., Morales, C. (Editores). *Microzonificación sísmica del Área Metropolitana Barquisimeto-Cabudare*, FUNVISIS, pp. 98-104.
- Urbani, F. (2018). Una revisión de los terrenos geológicos del Sistema Montañoso del Caribe, norte de Venezuela. *Bol. Geol. XXIII* (36), 118–210.
- Urbani, F., Rodríguez, J. (2004). *Atlas geológico de la Cordillera de la Costa de Venezuela*. Ediciones Fundación GEOS, escala 1:25000, 146p.
- Valls., J. (2008). Caracterización geofísica en la zona de Quíbor, estado Lara, mediante estudios gravimétricos y de ruido sísmico ambiental. TEG, UCV, 151p.
- Van der Hilst, R., Mann, P. (1994). Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. *Geology* 22(5), DOI: 10.1130/0091-7613.
- Vernaéz, G., Cano, V., Schmitz, M., Manchego, M., Salcedo, A., Courtel, F., Leal, V., Madrid, I., Flores, H., Rodríguez, I., Pombo, A., Capriles, M.D., Guzmán, J., Paolini, M., Reinoza, C., Rocabado, V., Aguilar, A., Jegat, H., Alvarado, M., Cerrada, M., Dugarte, M., Ferrer, C., Flórez, J., Klarica, S., Guerrero, O., Rivero, P., Vera, B., Gutierrez, J., Guillén, W., Montilla, N., Cordero, A., Liñayo, A., Chacón, I., Maldonado, N.J., Estévez, R., Laffaille, J., Saldivia, L., Paredes, G., Marín, W., Morales, C., García, K., Ramírez, O., Heredia, J., Fermín, C., Hernández, R., Riveros, P., Ramos, L., Suárez, M., Vilorio, J., Martínez, A., Medina, J., Quintero, B., Romero, G., Avendaño, J., Diaz, J., Sanzonetti, J. (2011). Informe Técnico de Avance correspondiente al Segundo Año del Proyecto de investigación aplicada a la gestión integral del riesgo en espacios urbanos (FONACIT 2007000939). FUN 012-2011, 229p.
- Viete H. (2012). Evaluación geológica con fines de Microzonificación Sísmica de la región de Cumaná, edo. Sucre. Informe Técnico. CEDI-FUNVISIS. Caracas.
- Weber, J.C., Dixon, T.H., DeMets, C., Ambeh, W.B., Jansma, P., Mattioli, G., Saleh, J., Sella, G., Bilham, R., Pérez, O. (2001). GPS estimate of relative motion between the Caribbean and South American plates, and geologic implications for Trinidad and Venezuela, *Geology*, 29(1), 75-78.
- Wurst, M. (2010). Neotectonic cartography of the eastern flank and geophysical modeling of the sediment thickness in the depression of Quibor, state of Lara, Venezuela. Diploma tesis, Technische Universität Berlin, 101p.
- Yamazaki, Y., Audemard, F., Altez, R., Hernández, J., Orihuela, N., Safina, S., Schmitz, M., Tanaka, I., Kagawa H., and JICA Study Team -Earthquake Disaster Group (2005). Estimation of the seismic intensity in Caracas during the 1812 earthquake using seismic microzonation methodology. *Rev. Geogr. Ven.*, Número Especial 2005, 199-216.
- Yegres, L., Schmitz, M., Cerrada, M., Rojas, R. (2020). Evaluación del efecto de amplificación sísmica, a partir de la integración de métodos geofísicos y el análisis lineal 1D del suelo en Mérida – Venezuela. CIVGEO, Perú, 3p.
- Zerpa, S. (2019). Inversión de curvas de elipticidad de ondas Rayleigh para la caracterización de la ciudad de Carora. TEG, USB, 100p.
- Zinck, A. (1980). Valles de Venezuela. Caracas: Cuadernos LAGOVEN, pp. 1–154.