

DISEÑO DE UN MODELO DE ANÁLISIS ESPACIAL MULTIVARIABLE PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO CON FINES DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN MANTA, COSTA ECUATORIANA

Orlando Josué Pillajo Blacio*, Francisco Javier Sáenz Vargas y Pablo Roberto Pérez Salazar

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador

*Autor de correspondencia: ojpillajo@espe.edu.ec

Recibido 17 julio 2018, aceptado después de revisión al 28 de julio 2018

RESUMEN

Este trabajo de investigación presenta metodologías para el cálculo del riesgo sísmico en un medio urbano y una contribución especial mediante una propuesta de ordenamiento territorial, en dos zonas de la ciudad de Manta-Ecuador, una de ellas zona 01 (Manta) escogida por estar dentro de un sector de grandes ingresos económicos, y la zona 02 (Tarqui) elegida por encontrarse en un sector en recuperación económica. Para el cálculo del Riesgo sísmico, se analizan las variables de Peligrosidad y Vulnerabilidad. El análisis de peligrosidad toma en cuenta los factores de fuente, trayectoria y efecto local, en un sentido probabilista, y se complementa con la desagregación de la peligrosidad que busca encontrar un terremoto de control para generar un escenario sísmico, el mismo corresponde a una Mw 7.4 y una distancia de 40-60Km compatible en una zona de interfase. El escenario se modela utilizando el GMPE de Zhao et al. (2006) para eventos de subducción. Con respecto a la determinación de la vulnerabilidad se definen las tipologías de las construcciones a partir de un proceso de dos etapas: la distribución inicial que es determinada por la clasificación sugerida en HAZUS (2003), y la clasificación designada según el nivel de diseño de acuerdo al cumplimiento o no de los códigos constructivos. El daño esperado se determina con el método (I-DCM). La zona 01 y 02 presentan mayor probabilidad de alcanzar o exceder estados daño moderado y extenso. Finalmente se logra representar un escenario optimista de acuerdo a los resultados de **cálculo del** daño.

Palabras Clave: Peligrosidad, Vulnerabilidad, Riesgo sísmico, ordenamiento territorial, Manta,

ABSTRACT

This research work presents methodologies for the calculation of seismic risk in an urban residence and a special contribution by means of a proposal of land management, in two areas of the city of Manta-Ecuador, one of those is the area 01 (Manta) chosen for being inside of a sector of high- incomes, and area 02 (Tarqui) chosen for being in a sector in economic recovery. For the calculation of the seismic risk analyses the variables of Danger and Vulnerability. The hazard analysis takes into account the factors of source, path and local effect, in a probabilistic sense, and it is complemented by the disaggregation of the danger that seeks to find a control earthquake to generate a seismic scene, it corresponds to an Mw 7.4 and a distance of 40-60Km in an interface zone compatible. The scene is modeled using the GMPE of Zhao et al. (2006) for subduction events. With respect to the determination of vulnerability, the construction's typologies are defined from a two-stage process: the initial distribution that is determined by the classification suggested in HAZUS (2003), and the classification designated according to the design level of according to the compliance or not of the constructive codes. The expected damage is determined with the method (I-DCM). Area 01 and 02 are more likely to reach or exceed moderate and extensive damage states. Finally, an optimistic scene can be represented according to the results of damage calculation.

Keywords: Hazard, vulnerability, seismic risk, territorial planning, Manta

INTRODUCCIÓN

Uno de los peligros que se producen en la naturaleza y de los más devastadores son los eventos sísmicos o comúnmente llamados terremotos, según el Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED) en las últimas dos décadas, los terremotos representaron más muertes que todos los demás peligros naturales combinados, causando el 55.6 % de la mortalidad mundial total por desastres entre 1996 y 2015 (Figura 1). Uno de los terremotos más significativos que ocurrió en la última década fue el sismo de Haití del 2010 de Mw 7, el cual causó alrededor de 225.000 fallecidos, dicho evento nos lleva a pensar en la importancia del comportamiento de los edificios que a su vez, su colapso genera pérdidas de vidas humanas y económicas, por causa del incumplimiento y ausencia de normas de diseño sismorresistente ya que la catástrofe no precisa de la existencia de una alta peligrosidad pero si de la vulnerabilidad en las edificaciones, este es el motivo de que los terremotos con moderada sismicidad terminen en catástrofes.

En la historia sísmica del Ecuador importantes terremotos destructivos ocurrieron, el más fuerte registrado fue de Mw 8.8 el 31 de enero de 1906 (entre los 10 más fuertes registrados en el mundo), con epicentro en el Océano Pacífico, a una profundidad de 20 Km, frente a las costas ecuatorianas (USGS, 2016), en la Figura 2 se muestra la distribución espacial de la sismicidad en el Ecuador. El último terremoto destructivo de interfase que ocurrió fue el 16 de abril de 2016 de Mw 7.8, dejó alrededor de 660 personas fallecidas (OIM, 2016), que afectó directamente a más de 35000 personas y causó daños generalizados en muchas ciudades, incluidas Pedernales, Muisne, Manta y Portoviejo. Se sintió en gran medida en Guayaquil y Quito, las ciudades más pobladas del país. El Ecuador tiene una alta actividad sísmica cuyo origen se debe a que se encuentra ubicado en el cinturón de fuego del Pacífico, donde se presenta la subducción de la Placa Oceánica de Nazca con las Placas Continental el Caribe y Sudamericana y por la presencia de un complejo sistema de fallas locales. (Figura 3)

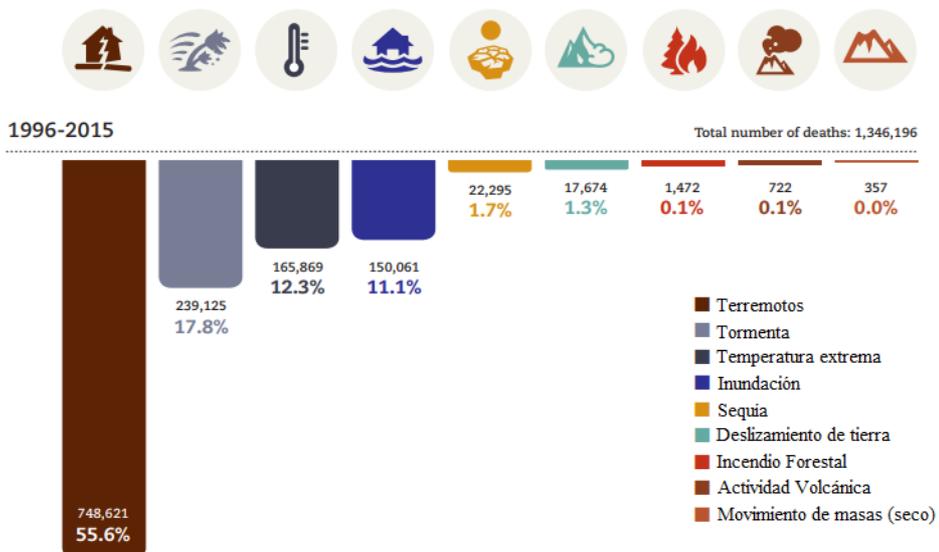


Figura 1. Números de muertos por tipos de desastres. (Modificado de CRED, 2016).

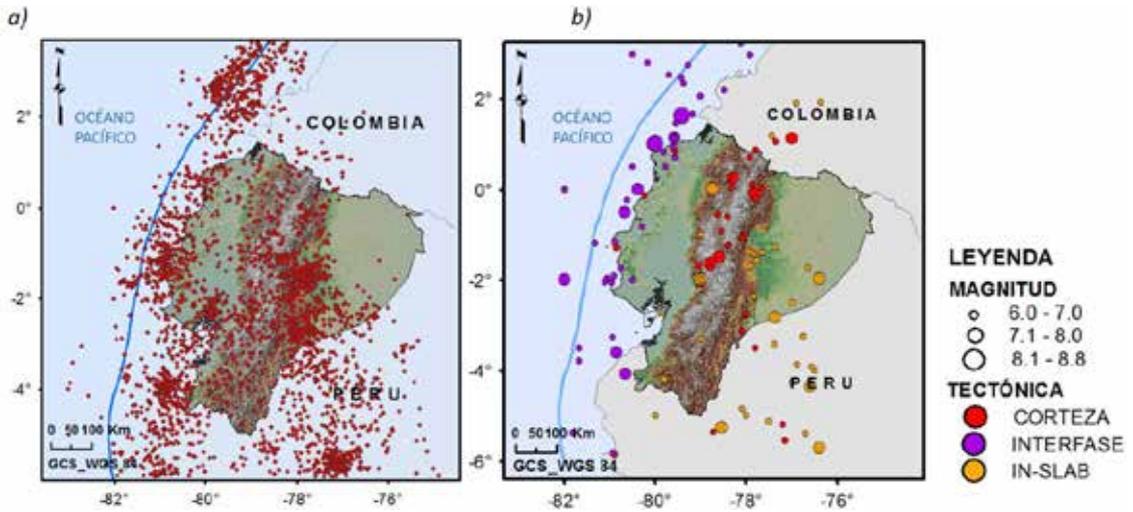


Figura 2. Mapa de eventos sísmicos del Ecuador. a) Epicentros con $M_w \geq 4.0$; b) Epicentros de los sismos con $MW \geq 6.0$. (Parra, 2016)

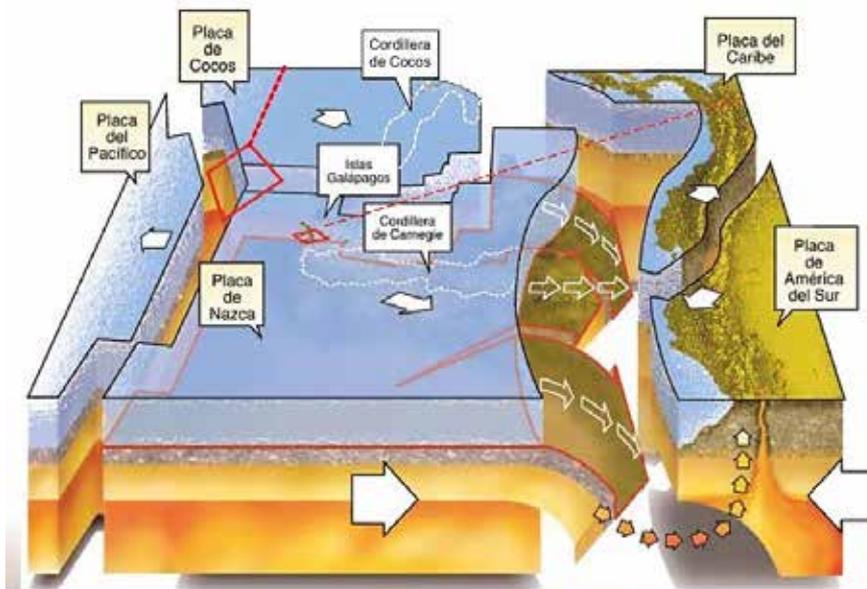


Figura 3. Situación Geodinámica del Ecuador y Placas Asociadas. (Toulkeridis, 2013)

En el Océano Pacífico coexisten entre sí dos placas divergentes: la Cordillera del Pacífico Oriental y el Centro de Expansión de las Galápagos, donde se crea constantemente la nueva corteza oceánica, justamente en esta zona se originan las Placas: Pacífico, Cocos y Nazca las mismas que se separan unas de las otras. Al momento que estas placas se separan, la de Nazca se dirige hacia el este colisionando en un área de convergencia con el continente de Sudamericano (Figura 4, a). Dicho continente Sudamericano está formado por dos placas continentales, la placa del Caribe y la placa Sudamericana, las mismas se rozan entre sí desplazándose en direcciones opuestas aquí se da lugar a la megafalla transformante Guayaquil-Caracas (Figura 4, b) que va desde el Golfo de Guayaquil hasta Venezuela (Toulkeridis, 2013).

El Golfo de Guayaquil se originaría por la subsidencia del movimiento de la Placa Caribe, resultado del aumento interplaca del acoplamiento de la presencia de Carnegie (Nocquet et al., 2014; Chunga et al., 2009; Trenkamp et al., 2002; Gutscher et al., 1999; Witt et al., 2006). A los terremotos superficiales (profundidad 0-40 km) se los asocia con las fallas activas, donde el avance o crecimiento de la placa continental se dirige en sentido Este y ratifica las deformaciones de la placa superior (Chunga et al., 2009).

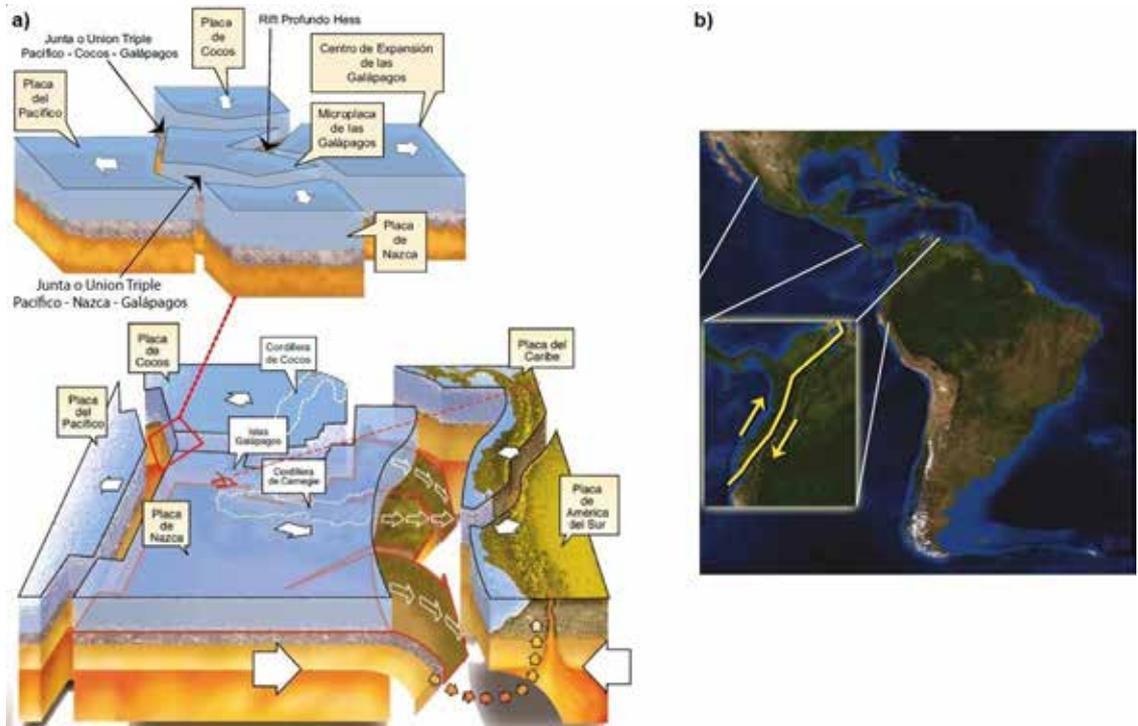


Figura 4. a) Tectónica de placas y b) Megafalla Guayaquil-Caracas (Modificado de Toulkeridis, 2013)

Para poder analizar, comprender y caracterizar el movimiento relativo de Nazca es necesario partir de algunas investigaciones que se relacionan con la Placa Sudamericana con respecto a la velocidad y orientación del desplazamiento. Una de las investigaciones es la de Nocquet et al. (2009), la cual se basa en mediciones geodésicas donde se muestra a la placa de Nazca realizar una convergencia con el borde costero ecuatoriano a una velocidad entre los 55 y 58 mm/año dirección N83°E, así mismo otro estudio indica que el desplazamiento relativo de la placa de Nazca y la Sudamericana es de 56 mm/año aproximadamente con dirección N83°E según Collot et al. (2009), o el estudio de Trenkamp et al. (2002), que hace mención sobre medidas GPS donde se aprecia la subducción que existe de la placa de Nazca con el borde de la costa ecuatoriana a 58 ± 2 mm/año.

La forma de la Cordillera de Carnegie tiende a alargarse hacia el Oeste y al Este, la cual logra desplegarse debajo de los Andes a 500 km de la fosa. Consta con una extensión de 1000 km, misma que parte de las Islas Galápagos a la trinchera de subducción, y posee un ancho de 280 km, además consta con una elevación de 2000 m que parte del fondo de la placa de Nazca con una depresión de 657 m (Michaud et al., 2009; Goyes, 2009). Se encuentra dividida en 3 zonas: 1) la Cordillera Oeste, que forma parte de la Plataforma Volcánica Galápagos; 2) la Depresión Central, que es una fosa de 2300 m de hondonada con material volcánico; 3) la Cordillera Este,

es una zona que posee una variación topográfica de profundidades dentro de 960 a 2300 m (Vaca et al., 2009; Michaud et al., 2009; Pazmiño & Michaud, 2009). Se estima que Carnegie llegó a la fosa de subducción hace 1.8 Ma aproximadamente (Egbue & Kellogg, 2010; Collot et al., 2009; Gutscher et al., 1999). Una parte de toda la subducción entre la placa oceánica de Nazca y las continentales de Caribe y Sudamericana se localiza frente a las costas del Ecuador. La orientación de la trinchera de subducción tiene como azimut de manera general N10°E entre del Golfo de Guayaquil y el Cabo San Lorenzo (Manta), y más adelante, frente a las costas de la provincia de Esmeraldas, cambia la dirección hacia el Este en N38°E (Chunga et al., 2009; Zamora & Litherland, 1993).

La profundidad de esta fosa varía en diferentes puntos por efecto de la subducción de la Cordillera submarina de Carnegie, por tanto, frente al Golfo de Guayaquil se tienen profundidades mayores a los 4700 metros, luego disminuye gradualmente hasta llegar a los 2800 m en Manabí frente al Cabo Pasado, posteriormente vuelve a aumentar su profundidad frente a las costas de la provincia de Esmeraldas con 3900 m (Goyes, 2009; Collot et al., 2009). La liberación de sismos alrededor de esta zona se debe, que durante la subducción, una parte del movimiento de la Placa Oceánica de Nazca se bloquea debajo del borde continental, y se genera una acumulación de energía o tensión (Marcaillou et al., 2009).

En el Ecuador existen las siguientes fuentes generadoras de sismos (Figura 5):

Fuente Sísmica de Interfase:

Comienza al inicio de la subducción, posee las siguientes características: Es justamente en esta fuente sísmica donde se obstruye parte del desplazamiento de la placa de Nazca, esto genera la deformación de la placa cuyas características son más densas logrando un aumento de tensión con el borde continental por razones de subducción de la misma (Egbue & Kellogg, 2010). La placa oceánica en esta zona tiene un ángulo de hundimiento o buzamiento entre 4° y 10°. Su extensión comprende desde los 100 a 120 km al Este de la trinchera (Manchuel et al., 2009; Chunga et al., 2009; Trenkamp et al., 2002). La profundidad comprende desde mínimos km y llega a alcanzar hasta los 40 a 70 km aproximadamente (Marcaillou et al., 2009; Collot et al., 2009; Michaud et al., 2009; Goyes, 2009; Pazmiño & Michaud, 2009).

Fuente Sísmica In-Slab:

Por consiguiente, luego de la fuente de Interfase está la In-Slab (llamada también Intraplaca) que continúa siendo una zona de subducción, misma se extiende en 400-500 km con profundidad de 200 Km. La actividad sísmica de esta área se caracteriza por los distintos niveles de profundidad y además la existencia de un extenso arco volcánico (Cordillera de los Andes). El buzamiento tiene una inclinación desde los 17° a 35°, y esta sumersión varía de manera más profunda en el Norte y Centro del Ecuador, y en el Sur se convierte más superficial (Goyes, 2009; Collot et al., 2009; Pedoja, 2009; Manchuel et al., 2009; Gutscher et al., 1999; Chunga et al., 2009; Trenkamp et al., 2002; Guillier et al., 2001).

CORTEZA CONTINENTAL

Está ubicada en el borde continental, la cual se formó por la placa Caribe y Sudamericana, cuyo desplazamiento es N-E, mediante un conjunto de fallas activas. Un factor que influye dentro de la geomorfología cortical es el procedimiento de la fase de subducción, donde adquiere una profundidad de 40 km, además de alcanzar en la región de cordillera un espesor

entre 50 – 75 km de depresión, y finalmente la región oriental que comprende la cuenca alta del Amazonas (Alvarado, 2012; Chunga et al., 2009; Egüez et al., 2003; Guillier et al., 2001; Trenkamp et al., 2002).

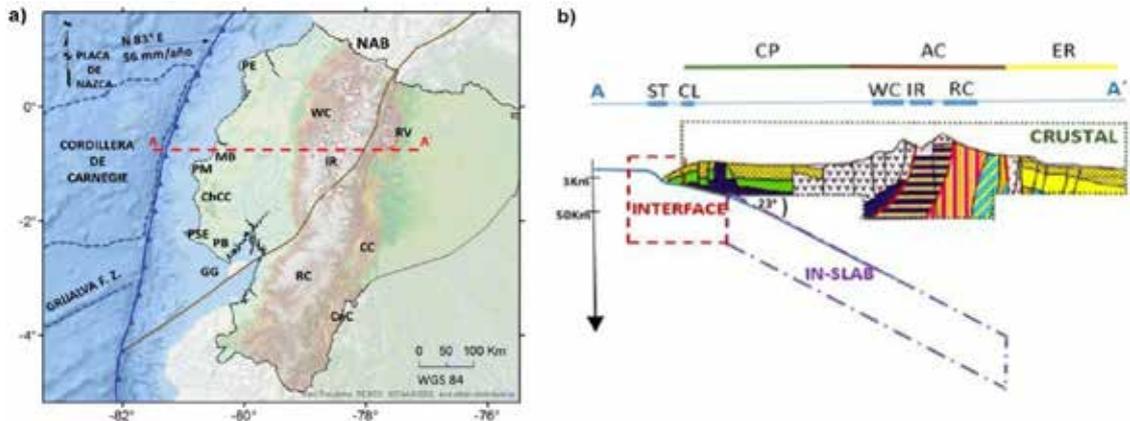


Figura 5. Fuentes de actividad sísmica en el Ecuador. a) Tectónicas y Corte transversal (A-A') en latitud -1. b) Representación de las zonas generadoras de sismos Interface, In-slab y Cortical, y del corte transversal A - A'. Notación: CP: Plano Costero; AC: Cordillera de los Andes; ER: Región Oriental; ST: Trinchera de subducción; CL: Línea de Costa; WC: Cordillera Occidental; IR: Región Interandina; RC: Cordillera Real (Parra, 2016).

ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y LA GESTIÓN DEL RIESGO:

Un municipio se enfrenta comúnmente con problemas como: la integración para reducir el riesgo de desastre el cual se debe a la falta de conocimiento de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo o a su vez por estudios que contienen información de difícil comprensión que producen una mala interpretación y malos resultados. La responsabilidad que tienen los tomadores de decisiones marca un punto de inflexión en el desarrollo y ordenamiento del territorio, por esta razón a nivel mundial existe el esfuerzo de introducir la variable riesgo para procesos de ordenamiento territorial, de esta manera reducir pérdidas de vidas humanas y económicas, como daños en infraestructuras físicas, productivas y sociales.

ÁREA DE INFLUENCIA

El proyecto se desarrolla en dos zonas de la ciudad de Manta, la cual se ubica en la parte occidental de la Provincia de Manabí, en la bahía de Manta, en la Costa Centro - Sur del Ecuador. Localizada en la zona 17 Sur de coordenadas UTM.

Estas dos zonas de estudio comprenden:

Zona 1: parte de los barrios Perpetuo Socorro, Córdoba y Almendros que comprenden las calles 25, M2, 20, 18, avenida 23, y Flavio Reyes

Zona 2: Centro de Tarqui conforma la avenida 105, calle 106, avenida 108 y calle 101 de la ciudad de Manta. Estas zonas se presentan en la Figura 6 y 7.

La zona 1 tiene una superficie de 209480 m² con 18 manzanas y la zona 2 con una superficie de 60682 m² con 13 manzanas.

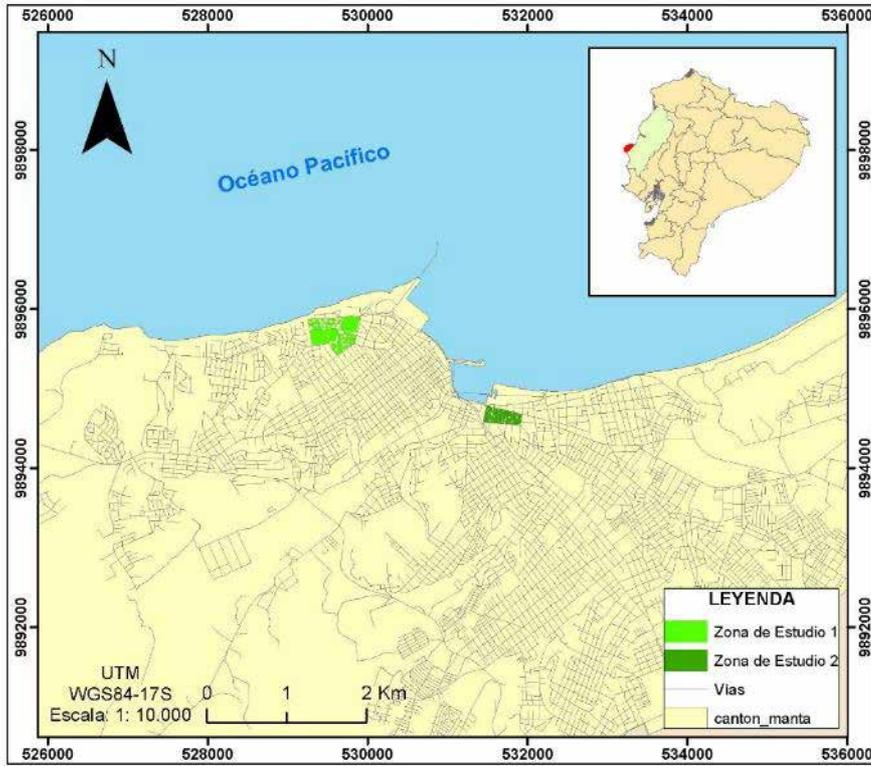


Figura 6. Zonas de estudio en la ciudad de Manta.

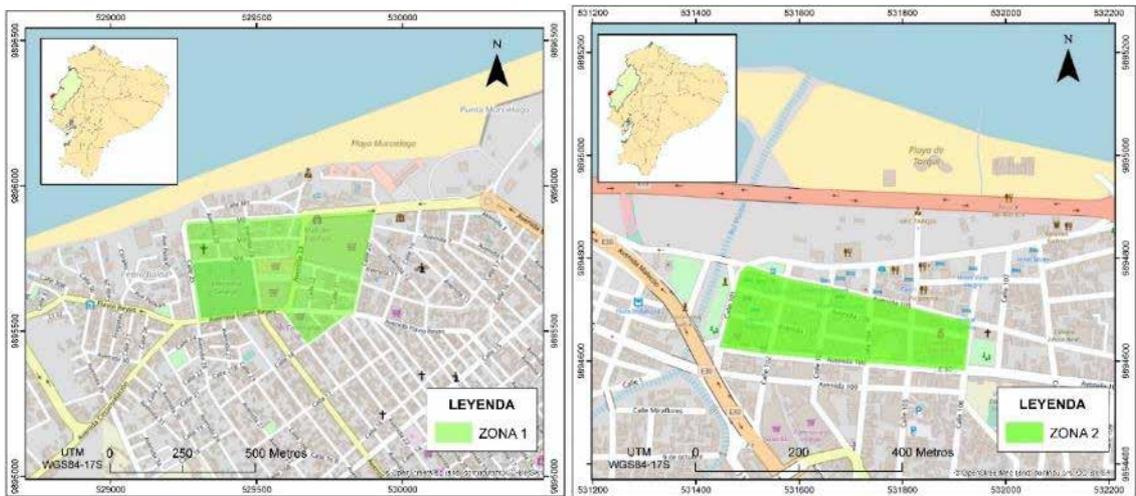


Figura 7. Mapa de ubicación de las zonas de estudio. Izquierda: Zona 1. Derecha: Zona2

Después de las pérdidas de vidas humanas y materiales tras el terremoto del 16 de abril del 2016, se logró identificar una serie de problemas constructivos por el incumplimiento de las normas actuales de construcción, además por el uso de materiales no adecuados para la construcción en mamposterías y estructuras de hormigón armado, baja calidad y ahorro de materiales, la falta de estudios de microzonación sísmica que permite determinar el tipo de suelo a escala urbana

y una mala planificación en el ordenamiento territorial por no considerar la variable de riesgo sísmico. Todo esto demostró lo vulnerable que es Manta ante eventos sísmicos, por tanto, un nuevo terremoto en una falla local o de subducción provocaría daños a las edificaciones de infraestructura estratégica y vital, pérdidas de vidas humanas, económicas y subsecuentemente también migración.

Para ello es necesario determinar el riesgo, integrar la peligrosidad y vulnerabilidad sísmica, analizar la fuente sísmica, trayectoria y efecto local, identificar las tipologías constructivas, determinar los espectros de demanda, capacidad, curvas de fragilidad y generar mapas de daños potenciales de la zona de estudio de la ciudad de Manta por diferentes intensidades sísmicas, con el fin de generar una propuesta de uso y ocupación del suelo.

ANTECEDENTES

La Constitución de la República del Ecuador en sus Art 264, 275 y 389 se refiere acerca de la planificación de desarrollo que tienen por obligación los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) en regular el uso y ocupación del suelo y a su vez hace énfasis en la Gestión de Riesgo como reducir vulnerabilidades, prevenir y eventualmente mitigar los daños causados por los desastres naturales. La herramienta que expone los principios de la constitución con respecto a la organización del territorio es el Código Orgánico de Organización Territorial (COOTAD) y la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial Uso y Gestión del Suelo (LOOTUS), el cumplimiento de los mismos es obligatorio para todos los GADs que permitan identificar los riesgos de origen natural, regular y controlar las construcciones para lograr un equilibrio territorial equitativo tanto administrativo, socio cultural y económico para un mejoramiento progresivo en el estilo de vida de la población.

El Plan Nacional De Desarrollo 2017-2021 continua el enfoque de incorporar la variable riesgo en los procesos de planificación y ordenamiento territorial como se muestra dentro del “Objetivo 1: Garantizar una vida digna con iguales oportunidades para todas las personas”. Ahora, según la “Actualización del Plan de desarrollo ordenamiento territorial con especial énfasis en la gestión del riesgo Manta – 2019” busca tomar acciones y enfrentar las amenazas que implican un riesgo para el cantón, mediante la planificación y coordinación de su propio equipo técnico. Este plan requiere de un mayor número de propuestas basadas en estudios científicos actualizados que estudien como solucionar los problemas de la ciudad.

Unos de los estudios recientes aplicados al cálculo del Riesgo Sísmico, es el de Parra (2016). Este estudio de riesgo sísmico analiza la peligrosidad y la vulnerabilidad para las edificaciones de uso residencial ubicadas en la Parroquia Mariscal Sucre de la ciudad de Quito, inició con la generación de un sistema de información geográfica, con datos del catastro del Municipio de Quito. Se simula un sismo de Mw 6.25, y se considera el plano y características de ruptura de la falla Ilumbisí La Bota. El efecto de la trayectoria se consideró a través del modelo de atenuación propuesto por Zhao et al. (2006) y para la estimación del efecto local se han utilizado los resultados de microzonificación del Consorcio de Evaluación de Riesgos Naturales-América Latina en el año 2012. Se determina espectros específicos de respuesta para los tres barrios que conforman la parroquia Mariscal Sucre (La Colón, La Floresta y Mariscal Sucre). El estudio de vulnerabilidad inició con la identificación de las tipologías constructivas dominantes en la zona de estudio a partir de la información contenida en el SIG. Como resultado se obtienen porcentajes de estados de daños potenciales en las construcciones: ninguno, leve, moderado, extenso y completo. Las construcciones que presentan una mayor probabilidad de daño moderado

y ligero, son las estructuras cuya tipología es de hormigón armado con un número de pisos mayor o igual a 8.

Para el cálculo de la peligrosidad y vulnerabilidad el factor local es fundamental, por tanto el tipo de suelo presente en el sitio puede amplificar el movimiento. El reciente estudio de Bonifaz & Haro (2017) determina las velocidades de onda de corte (V_{s30}) en la Ciudad de Manta, donde se toman registros con un sismógrafo de 12 canales y el análisis de los mismos se realiza mediante el método MASW para ondas superficiales y análisis de ruidos ambientales con método pasivo MAM para luego obtener un registro combinado de los dos. Se elaboran mapas de zonificación del suelo para las ciudades de Manta, Portoviejo, Chone y Bahía de Caraquez. Los valores de V_{s30} para Manta, van desde 143 m/s hasta 402.2 m/s, uno de los suelos predominantes es de tipo D, también zonas de perfil tipo C y E (Figura 8).

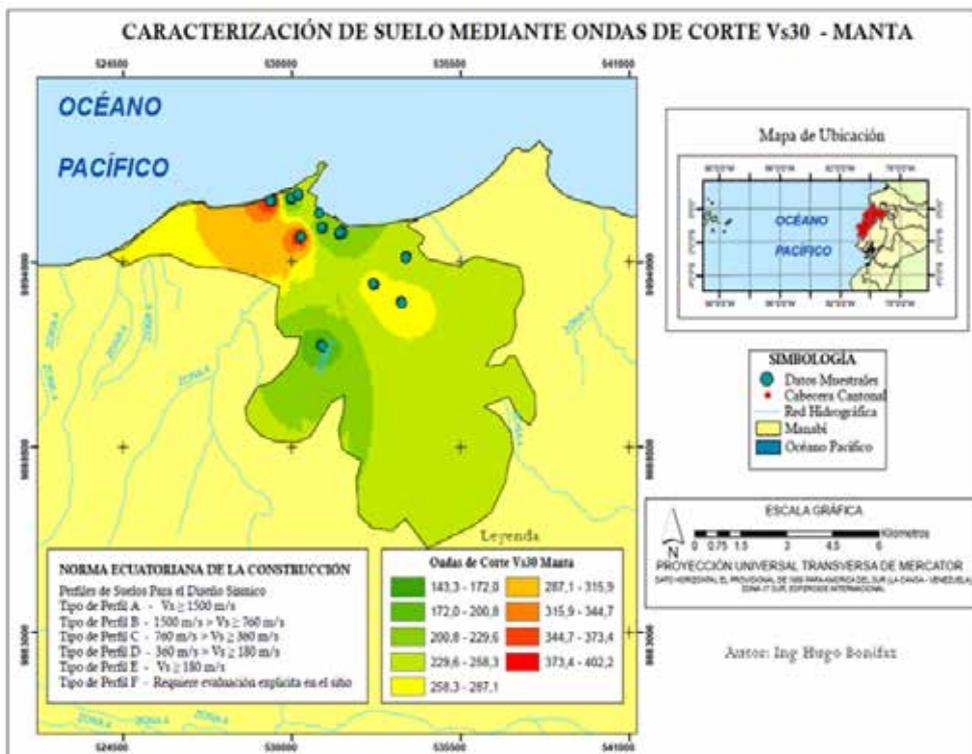


Figura 8. Mapa de ondas de corte V_{s30} en Manta. Bonifaz & Haro (2017)

La incorporación del riesgo en el ordenamiento territorial es necesario para la construcción de municipios seguros y sostenibles, donde las opciones de desarrollo no se vean amenazadas por las características ambientales del territorio, sino por el contrario donde tales características pueden ayudar a su crecimiento económico y social. La incorporación del riesgo en los procesos de planeación y ordenamiento territorial, permitirá establecer medidas de prevención y mitigación, orientadas a la reducción del riesgo existente y evitar la generación de nuevas pérdidas a futuro. La ciudad de Manta posee el puerto marítimo más importante del país, por ello la necesidad de cuidarla, preservarla y protegerla frente a amenazas y peligros de origen natural que se pueden presentar en cualquier momento. Dicha ciudad es el eje económico de la provincia de Manabí.

El proyecto de investigación beneficiará a la ciudad de Manta como una propuesta metodológica para la evaluación integral del riesgo sísmico con fines de ordenamiento territorial, mediante la utilización de métodos actuales y modelos óptimos para lograr cuantificar el daño que se genera por una simulación de un futuro evento sísmico y tratar de reducir pérdidas de vidas humanas y materiales ya que esta ciudad consta con 226.477 habitantes (INEC, 2010). El proyecto de investigación utilizará diferentes metodologías las cuales servirán como base para futuros análisis y lograr contribuir en la planificación de gestión de riesgo en la ciudad de Manta y otros pueblos con similares amenazas. Así habrá que determinar el riesgo sísmico mediante el diseño de un modelo de análisis espacial multivariable, para cuantificar el daño en edificaciones ante un evento sísmico futuro con fines de ordenamiento territorial en la ciudad de Manta. Al mismo tiempo trataremos en:

- Generar un modelo 3D con la toma de fotografías aéreas para el análisis espacial.
- Construir una base de datos con herramientas de Sistemas de Información Geográfica para el análisis del riesgo.
- Realizar el cálculo de peligrosidad, mediante un modelo de movimiento fuerte con datos registrados tras el terremoto de Ecuador del 16 de abril de 2016 para fines al estudio del riesgo sísmico.
- Definir la fuente sísmica a partir del régimen tectónico influenciado en la zona de estudio para el cálculo del escenario sísmico.
- Clasificar el tipo de suelo presente en la zona de estudio con las velocidades de onda de corte Vs30 para el análisis de efecto local.
- Elaborar una Base de Datos catastrales que parte de ortofotos según las normas de construcción de los años de 1976, 2001, 2011 y 2015 para el análisis de vulnerabilidad.
- Cuantificar el daño en las edificaciones de manera analítica mediante el procedimiento I-DCM.

METODOLOGÍA

RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Después de delimitar la zona de trabajo se procede al levantamiento de la información disponible, en primer lugar para la determinación del riesgo sísmico es necesario, obtener datos de vulnerabilidad y peligrosidad; para la vulnerabilidad, la información recogida fue: imágenes aéreas con cámaras (JET_R-20_año 1977, JET R-73_año 1981, JET R-115_año 1986, REC-30 R-51_año 2000, RC-30 R-74 CÓLOR_año 2007, Ortofoto_2011, Ortofoto_2016) proporcionados por el Instituto Geográfico Militar, además se realizó el levantamiento de información de campo mediante fichas que contienen: ubicación geográfica de la edificación, características constructivas, número de predio, pisos y año, y finalmente la captura de imágenes aéreas con dron, phantom 4. Para la peligrosidad se requiere datos de tipo de suelo (estudio de microzonificación sísmica de Manta) obtenido de Bonifaz y Haro (2017), también se realizó la búsqueda en la literatura especializada sobre modelos de movimiento fuerte del suelo (GMPEs) adecuados para la zona de estudio y parámetros de sismicidad de las geometrías de fuentes sísmicas del estudio de Parra (2016). En segundo lugar en el análisis de ordenamiento territorial, uso y ocupación del suelo se examinó los registros de las ordenanzas municipales y plan de Ordenamiento Territorial del cantón Manta en la plataforma web oficial del GAD Municipal de Manta.

De manera general en la Figura 9 se representa el levantamiento de la información.



Figura 9. Esquema para la recopilación de la información.

ANÁLISIS ESPACIAL

El modelamiento espacial constituye la generación de un modelo 3D para realizar un análisis espacial con fines a la toma de decisiones y a su vez a la extracción de datos espaciales para estudio del riesgo sísmico. En la Figura 10 se muestra el proceso de análisis espacial. La ejecución del plan de vuelo se realiza con la aplicación PIX4D capture, misma que permite enmarcar la zona de estudio, elegir la altura de vuelo (120 m), la forma de vuelo donde para modelos 3D se escoge Double Grid, inclinación de la cámara (70° y 90°) y el traslapo (80%). En el vuelo fotogramétrico se capturan las imágenes a través del drone phantom 4, el mismo permite acoplarse con la aplicación PIX4D capture y ejecutar el vuelo de forma automatizada. Para el procesamiento de la información se utiliza el programa Agisoft Photoscan 1.3.5, este permite orientar las fotografías para luego crear una nube de puntos densa y posteriormente generar ortofotos y modelos. Al obtener los modelos 3D se pueden realizar un análisis espacial para extraer información con altura de edificios y características constructivas mismas que pueden ser utilizadas para una planificación territorial de la ciudad.



Figura 10. Esquema del Modelamiento Espacial

FASES DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO

Los procesos que se realizan para determinar el daño en las edificaciones y a su vez lograr definir el Riesgo Sísmico son el cálculo de la vulnerabilidad y peligrosidad como se visualiza en la Figura 11. En la fase de peligrosidad se desarrolla el cálculo probabilístico, con el fin de

obtener un terremoto de control, así generar un escenario sísmico donde se incluya el tipo de suelo (amplificación local), con esto conseguir espectros de respuesta o demanda a partir de un modelo de atenuación. Respecto a la fase de vulnerabilidad se debe definir la geounidad (edificación), para poder construir una base de datos que contenga la asignación de tipologías constructivas para logra una clasificación de vulnerabilidad, generación de curvas de capacidad y fragilidad que conllevan al cálculo del riesgo a las edificaciones con su probabilidad de daño.

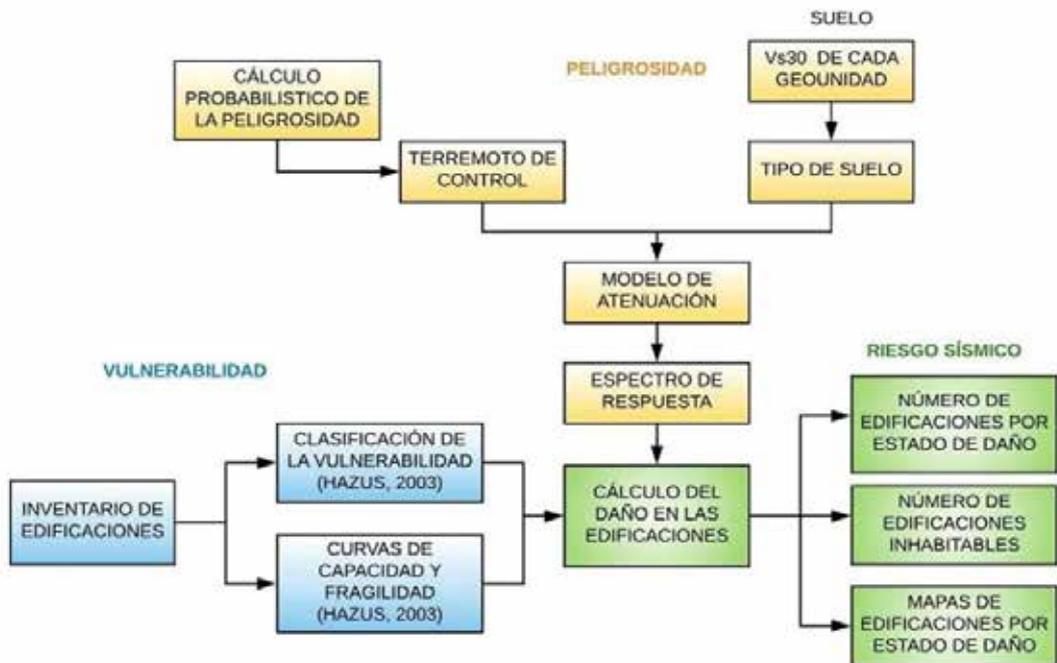


Figura 11. Esquema de Fases para el cálculo del Riesgo Sísmico. (Modificado de Parra, 2016)

CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD

Para determinar la peligrosidad en la zona de estudio, se representa las fases del cálculo en la Figura 12 en donde inicia con el análisis de la fuente, la propagación de las ondas y el efecto local, que se explica más adelante, luego de estos análisis se eligen las fuentes generadoras de sismos con sus parámetros de recurrencia, se elige un modelo de movimiento fuerte que se ajuste a las características tectónicas del emplazamiento, para dar paso al cálculo de la peligrosidad sísmica en roca. A continuación, la desagregación de la peligrosidad determina el terremoto de control que más contribuye a la peligrosidad. Con el terremoto de control se procede a generar un escenario sísmico, en el cual se tiene que realizar un análisis de la geometría de la fuente, y una asignación del tipo de suelo a partir de un estudio de microzonificación. Así con el modelo de movimiento fuerte elegido anteriormente se predice los espectros de respuesta o espectros de demanda, que son un imput para el cálculo del riesgo.

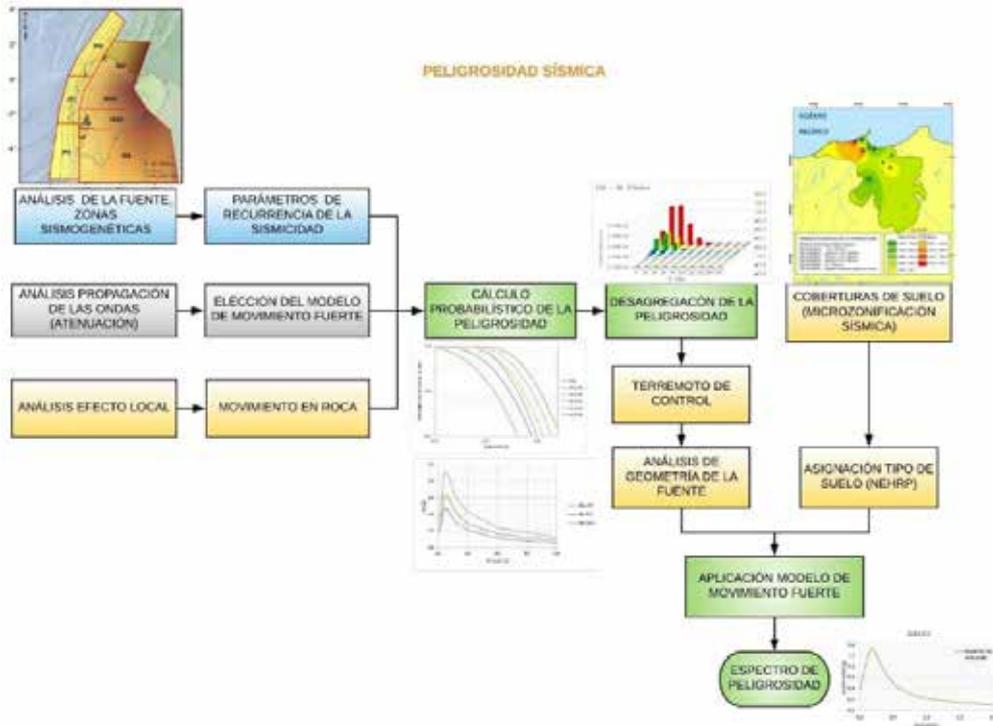


Figura 12. Esquema de Fases para el cálculo de la Peligrosidad.

ANÁLISIS DE LA FUENTE

Las fuentes generadoras de sismos se obtienen del estudio de Parra (2016) en el cual muestra la geometría de las mismas con sus niveles de profundidad. Estas zonificaciones corresponden a las regiones simogenéticas de subducción (Figura 13). La zonificación Cortical no se toma en cuenta en el presente estudio debido a una falta de modelización de fallas activas como unidades independientes.

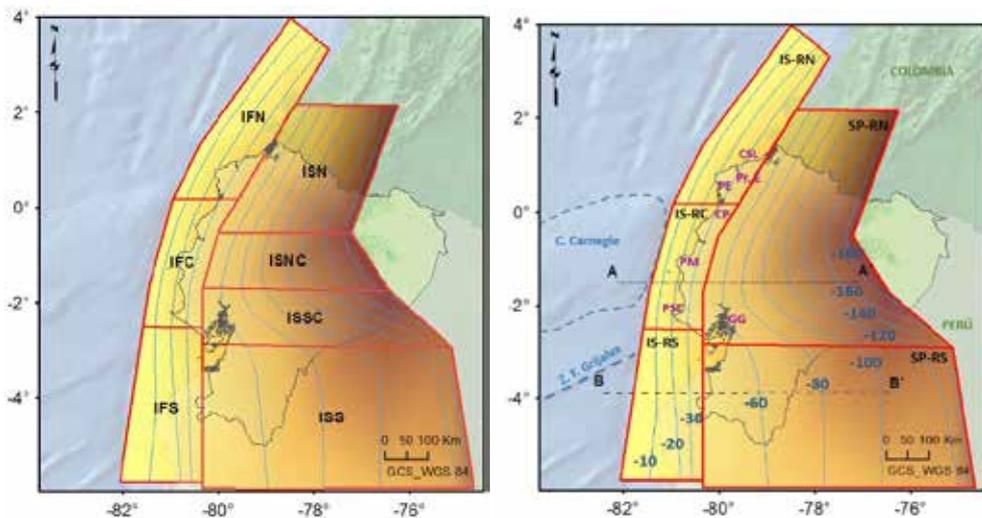


Figura 13. Zonificación simogenética de subducción para el Ecuador. Líneas con tonalidades celestes representan la profundidad en Kilómetros (Parra, 2016).

Así mismo cada fuente le corresponde sus respectivos parámetros de sismicidad, para ser usados en el modelamiento de estas geometrías. Los parámetros de la relación Gutenberg Richter se muestran a continuación en la Figura 14. Las fuentes en el presente estudio son IFC_B (fuente sísmica de interfase) debido al estar ubicada dentro de la zona de estudio y la ISNC (fuente sísmica de intraplaca) por estar cerca la zona en estudio.

ÁREA FUENTE	CÓD.	ÁREA	m_0	M_{max}	Δ	α	β	σ/β	$\dot{N}(m_0)$	$\dot{N}(m_0)/\text{ÁREA}$
Sismicidad Cortical										
Costa 1	C1	12950	4.0	5.9	1.2	10.74	1.99	1.65	0.32	2.47E-05
Costa 2A *	C2A	41619	4.0	4.8	0.0	17.42	2.96	0.29	2.54	6.10E-05
Costa 2B *	C2B	41619	4.9	6.8	0.4	10.96	1.59	0.70	0.27	6.44E-06
Costa 3	C3	19402	4.0	7.0	0.2	15.65	3.03	0.95	0.68	3.49E-05
Costa 4A *	C4A	24492	4.0	4.6	0.0	17.85	3.33	0.43	1.82	7.44E-05
Costa 4B *	C4B	24492	4.7	6.9	0.3	13.29	2.30	1.14	0.24	9.60E-06
Western Cordillera	CO1	24433	4.0	6.7	0.5	15.72	2.88	0.52	1.31	5.35E-05
Región Interandina 1	RI1	14389	4.0	6.9	0.4	7.96	0.98	0.31	0.26	1.79E-05
Región Interandina 2	RI2	3035	4.0	5.8	0.8	18.52	3.77	0.95	0.62	2.04E-04
Región Interandina 3	RI3	2778	4.0	6.6	0.3	9.41	1.47	0.47	0.34	1.20E-04
Región Interandina 4	RI4	6200	4.0	6.7	0.9	11.29	1.60	0.27	0.60	9.71E-05
Cordillera Real 1	CR1	18107	4.0	6.8	0.6	13.25	1.86	0.21	1.51	8.36E-05
Cordillera Real 2	CR2	74991	4.0	6.9	0.4	18.16	3.45	0.54	1.55	2.07E-05
Región Oriental 1	RO1	27569	4.0	6.8	0.3	15.59	2.83	0.46	1.40	5.07E-05
Región Oriental 2	RO2	47101	4.0	7.1	0.4	15.09	2.15	0.19	2.95	6.25E-05
Región Amazónica	A1	60682	4.0	5.0	0.2	12.68	2.43	1.21	0.38	6.23E-06
Sismicidad Interfase										
Interfase Norte A *	IFN_A	59914	4.0	5.9	0.0	14.06	1.87	0.10	6.61	1.10E-04
Interfase Norte B *	IFN_B	59914	6.0	8.8	0.7	8.74	1.00	0.37	0.14	2.37E-06
Interfase Centro A *	IFC_A	39396	4.0	5.3	0.0	14.55	2.09	0.14	4.48	1.14E-04
Interfase Centro B *	IFC_B	39396	5.4	7.9	0.1	10.29	1.30	0.39	0.24	6.12E-06
Interfase Sur	IFS	59122	4.0	7.5	0.4	13.99	1.87	0.11	6.21	1.05E-04
Sismicidad In-Slab										
In-slab Norte	ISN	81870	4.0	7.2	0.4	10.49	1.54	0.29	0.69	8.43E-06
In-slab Norte Centro	ISNC	49806	4.0	7.0	0.5	12.18	1.64	0.17	2.65	5.33E-05
In-slab Sur Centro	ISSC	66315	4.0	7.5	0.1	13.47	1.82	0.12	4.44	6.70E-05
In-slab Sur	ISS	202155	4.0	7.7	0.2	13.21	1.67	0.09	6.41	3.17E-05

Figura 14. Parámetros de Sismicidad de cada fuente (Parra, 2016).

ANÁLISIS DE ATENUACIÓN

Es indispensable calibrar un modelo de movimiento fuerte para elegir el mejor modelo que se ajuste a las características tectónicas de la región y predecir las aceleraciones espectrales. Este análisis se muestra en el Anexo 1 conforme al estudio de Pillajo et al. (2018, en imprenta), donde se concluye existe un mejor ajuste entre los valores registrados y estimados con el modelo Zhao et al. (2006), tanto para PGA como para aceleraciones espectrales, y que el modelo de Youngs et al. (1997) sobreestima los valores registrados. Por tanto, se elige y utiliza el modelo Zhao et al. (2006) en el presente estudio.

CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA

La evaluación del peligro sísmico se realiza en condiciones roca, el factor de amplificación se considera en el escenario sísmico. Todas las características de sismicidad reunidas anteriormente se ingresan en el Software CRISIS2014 V1.0 (Ordaz et al., 2014), donde se obtienen: las curvas de Peligrosidad para la ciudad de Manta, para una probabilidad de excedencia de 50 años, espectros de peligrosidad uniforme en (PR de 475, 975 y 2475 años), y desagregación de la peligrosidad con las contribuciones de los pares Mw , R al movimiento objeto dado por PGA y SA (1s) con PR de 475 y 2475 años.

ESPECTROS DE PELIGROSIDAD

El terremoto de control que se identifica con mayor contribución en la desagregación de la peligrosidad es de utilidad para generar un escenario sísmico en Manta y obtener los espectros de peligrosidad (respuesta o demanda). Para lograr esto, primeramente, se analiza la geometría de la fuente que más contribuye en el cálculo, que puede ser una fuente sísmica de interfase o intraplaca, luego de este análisis se modela el plano de ruptura con los parámetros establecidos por Leonard (2010), para posteriormente realizar la asignación del tipo de suelo al emplazamiento en cuestión, de acuerdo a la clasificación por el National Earthquake Hazards Reduction Program-NEHRP. Con los datos anteriormente estimados se procede aplicar el modelo de predicción del movimiento fuerte de Zhao et al. (2006) y finalmente obtener los espectros de respuesta para un Suelo C, D y E.

CÁLCULO DE LA VULNERABILIDAD

Para el cálculo de la vulnerabilidad se parte de dos etapas fundamentales, la primera determinar el tipo de estructura de acuerdo a la clasificación de HAZUS (2003), donde se toma en cuenta el tipo, descripción y altura de pisos, esta información fue levantada en campo a través de fichas e imágenes drone. En la segunda fase se añade el nivel de diseño de acuerdo a las normas constructivas, en nuestro estudio se establecieron cuatro períodos con los siguientes niveles de diseño:

- Pre-código (Pre): edificaciones cuyo año de construcción es anterior a 1976.
- Código bajo (low): edificaciones cuyo año de construcción se encuentra entre 1976 y 2001.
- Código moderado (mod): edificaciones cuyo año de construcción se encuentra entre 2001 y 2015.
- Código alto (high): edificaciones cuyo año de construcción es posterior al 2015.

Para la determinación del nivel de diseño se hizo un estudio temporal mediante imágenes satelitales y se verificó con las fichas de campo. Para las construcciones donde el estado de conservación se encuentra en condiciones malas, se aplicada una penalización en el nivel de diseño. En otras palabras, las construcciones con el código de 2001-2015, en el cual el nivel de diseño es moderado (Mod), y se encuentran en estado de condiciones malas, se penaliza con nivel de diseño bajo (Low). Después de determinar las tipologías constructivas y las clases de vulnerabilidad de las edificaciones se procede a asignar las curvas de capacidad que son el input para el cálculo del daño. (Figura 15)

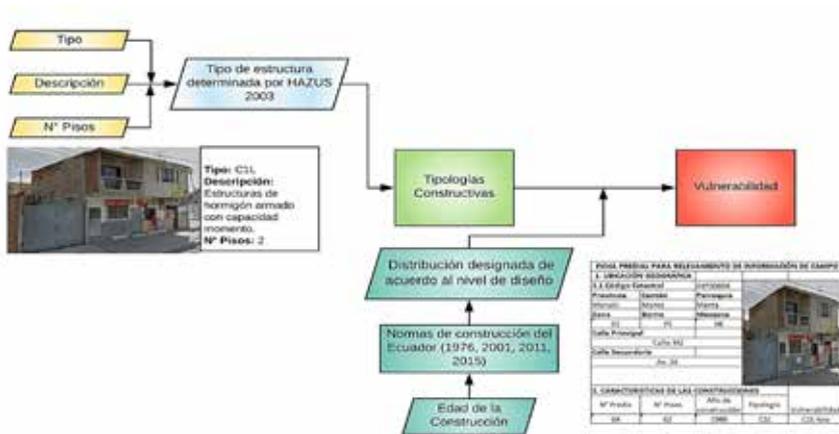


Figura 15. Esquema de Fases para el cálculo de la Vulnerabilidad.

DETERMINACIÓN DEL DAÑO

Para la estimación del daño en las edificaciones se utiliza el método IDCM donde previamente se debe calcular los datos de peligrosidad y vulnerabilidad, es decir los espectros de demanda y las curvas de capacidad generando curvas de fragilidad, esto a su vez permite estimar un porcentaje de cada nivel de daño. El desplazamiento espectral correspondiente al punto de rendimiento es la entrada para la curva de fragilidad del edificio, que proporciona la distribución de probabilidad de daño esperado, que reflejen resultados con probabilidades de daño nulo, leve, moderado, extenso y completo, como de muestra en la Figura 16.

ANÁLISIS DEL RIESGO CON FINES AL ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Un análisis multivariable que integra los Modelos Espaciales y el Riesgo Sísmico contribuye a la planificación urbana, que debe convertirse en una línea estratégica de los planes de ordenamiento y desarrollo territorial de las administraciones municipales y estar dentro de las agendas de los gobernantes, como una herramienta para el mejoramiento de la calidad de vida de la población y la seguridad de inversiones futuras en infraestructura y edificaciones nuevas en zonas de expansión. (Figura 17).

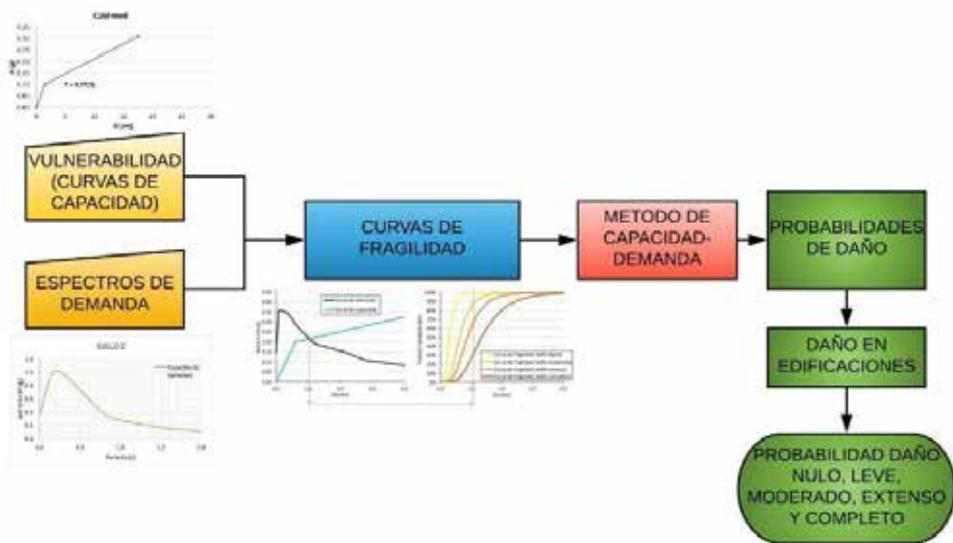


Figura 16. Esquema para el cálculo de daño en las edificaciones.

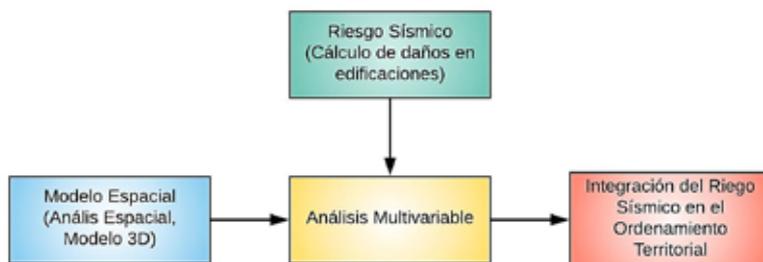


Figura 17. Esquema del Análisis Multivariable.

Para llevar a cabo la Integración del Riesgo Sísmico al Ordenamiento Territorial orientado al uso y ocupación del suelo se utiliza la Prospectiva Territorial a través de escenarios prospectivos, para llegar a estos escenarios se aplican los métodos MICMAC y SMIC PROB EXPERT. Donde, primeramente, con el método MICMAC se identifica a las variables más importantes que influyan o dependan en el presente análisis, luego con las variables identificadas se formulan cuestiones para encontrar el camino probable de los escenarios por medio del método SMIC PROB EXPERT. Parte de la ejecución de estos métodos requiere de un juicio de expertos.

RESULTADOS

Para la ciudad de Manta, se representa en la Figura 18 las curvas de peligrosidad en las ordenadas espectrales de PGA, SA (0.1s), SA (0.3s), SA (0.5s), SA (1s) y SA (2s) para una probabilidad de excedencia de 50 años. Asimismo, en la Figura 29 se muestra los espectros de peligrosidad uniforme (UHS) que se obtiene para Manta, para los períodos de retorno 475, 975 y 2475 años.

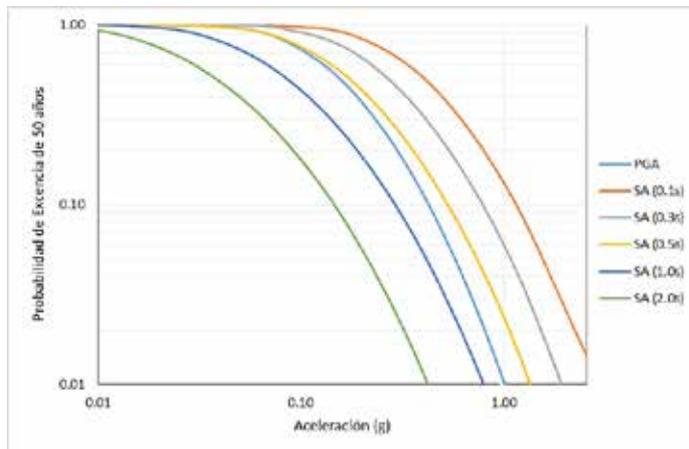


Figura 18. Curvas de Peligrosidad para la ciudad de Manta, con una probabilidad de excedencia de 50 años.

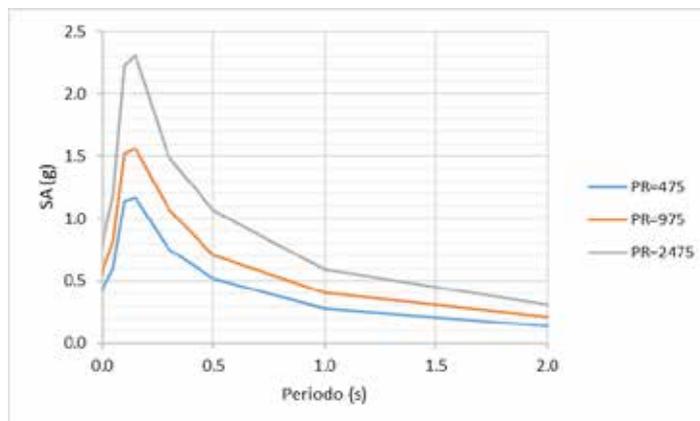


Figura 19. Espectros de peligrosidad uniforme obtenidos en Manta, para periodos de retorno de 475, 975 y 2475 años.

El análisis de la peligrosidad sísmica en la ciudad de Manta se completa con la desagregación de la peligrosidad para movimientos fuerte representativos como PGA y SA(1.0s) con periodos de retorno de 475 y 2475 años. De esta manera se logra obtener el terremoto de control que más contribuye a la peligrosidad, con una probabilidad de excedencia del 10% y 2% en 50 años. Estos terremotos de control se caracterizan por su magnitud (M_w) y rango de distancia (R), esta distancia corresponde a una distancia epicentral. Por tanto, los resultados de la desagregación se muestran en la Figura 30 donde se representa las contribuciones en intervalos de M_w y R , y en la Tabla 3 están los sismos que más alta tienen su contribución para periodos estructurales cortos y largos con periodos de retorno de 475 y 2475 años (Fig. 19).

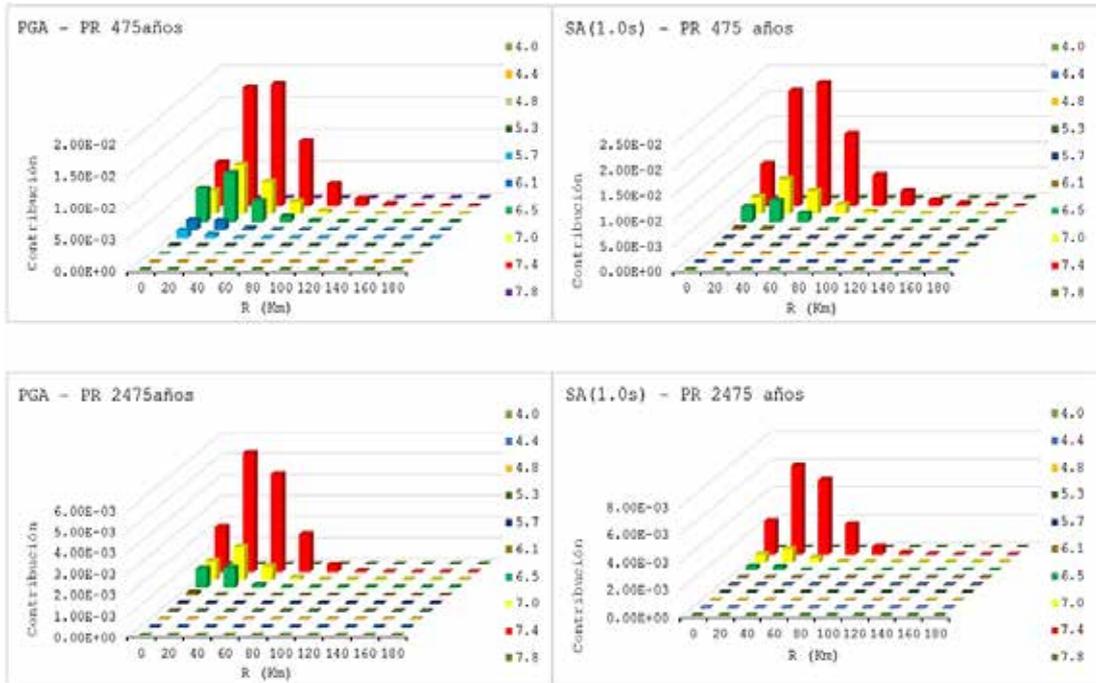


Figura 20. Resultados de la desagregación de la peligrosidad en la ciudad de Manta. Contribuciones de los pares (M_w , R) al movimiento objeto dado por PGA y SA (1s) para un periodo de retorno de 475 y 2475 años.

Tabla 1: Resultado de la Desagregación - Terremoto de Control:

CIUDAD	PERÍODO DE RETORNO 475 años				PERÍODO DE RETORNO 2475 años			
	PGA		SA (1s)		PGA		SA (1s)	
	M_w	R(Km)	M_w	R(Km)	M_w	R(Km)	M_w	R(Km)
Manta	7.4	40-60	7.4	40-60	7.4	20-40	7.4	20-40

Con el terremoto de control identificado de M_w 7.4 y una distancia de 40-60 Km, se genera un escenario, donde se obtienen los espectros de respuesta para las zonas de estudio para su posterior cálculo del riesgo (Tabla 1). Los espectros de respuesta se predicen con el modelo de movimiento fuerte de Zhao et al. (2006), este modelo incluye el efecto local, donde se identifica en la Zona 1 tipos de suelo C y D y en la Zona 2 un suelo E. Estos resultados de aceleración se muestran en la Tabla 2 y Figura 21 en unidades de g y son los valores de la media del modelo de Zhao et al. (2006).

Tabla 2: Valores de aceleración (g) que configuran los espectros de respuesta, para el escenario sísmico definido, en las dos zonas de estudio

Suelo	PGA	SA (0.1s)	SA (0.2s)	SA (0.3s)	SA (0.5s)	SA (0.8s)	SA (1.0s)	SA (1.5s)	SA (2.0s)
C	0.382	0.914	1.110	0.859	0.483	0.280	0.224	0.147	0.104
D	0.383	0.818	1.014	0.967	0.731	0.379	0.287	0.177	0.122
E	0.396	0.830	1.008	0.901	0.723	0.535	0.432	0.236	0.150

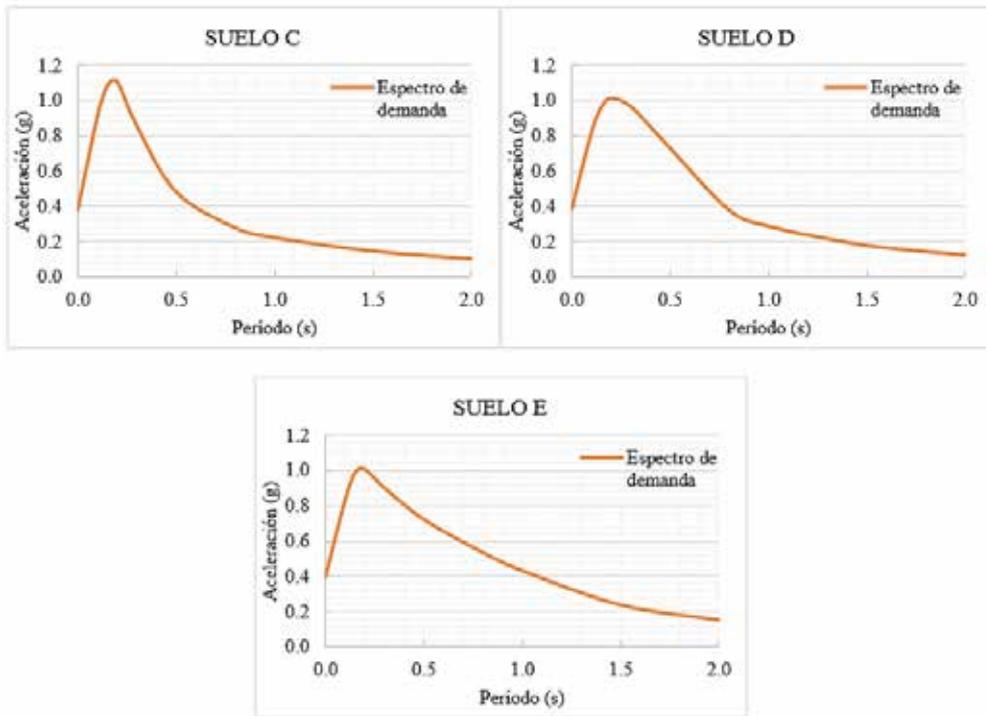


Figura 21. Espectros de respuesta (curvas de demanda), para el escenario sísmico definido, en las zonas de estudio.

En la Tabla 3 se muestra las diferentes clases de vulnerabilidad encontradas en la zona 01 y zona 02 de Manta. En este caso aún no se considera el nivel de diseño otorgados por las normas de construcción.

Tabla 3: Clasificación de vulnerabilidad adoptada, según HAZUS (2003) sin considerar el nivel de diseño.

No.	VULNERABILIDAD	DESCRIPCIÓN (HAZUS, 2003)	NÚMERO DE PISOS
1	C1L	Estructuras de hormigón armado con capacidad momento.	1-3
2	C1M		4-7
3	C1H		8+
4	C2L	Estructuras de hormigón armado con muros de corte de concreto.	1-3
5	C2H		8+
6	S1L	Marcos de acero con momento.	1-3
7	S1M		4-7
8	W1	Marcos de madera liviana.	1-2

En la Tabla 4 se muestran identificadas las diferentes clases de vulnerabilidad, mismas ya constan con nivel de diseño, se puede determinar la existencia de 165 edificios con estructura de Hormigón Armado con una altura entre 1-3 pisos cuyo nivel de diseño es moderado (C1L_low), es decir que en las dos zonas de estudio analizadas, posee edificaciones con estructuras de Hormigón Armado en más de un 50% del total de las analizadas, así mismo estructuras con un nivel sísmico recomendado como el de acero (S1M) solo existe la presencia de un edificio.

Tabla 4: Clases de vulnerabilidad identificadas para el presente estudio.

TIPOLOGÍA	Zona 01 (Manta)	Zona 02 (Tarqui)	TOTAL
C1H-mod	0	1	1
C1L-pre	6	14	20
C1L-low	68	97	165
C1L-mod	11	17	28
C1L-high	1	2	3
C1M-pre	4	0	4
C1M-low	18	7	25
C1M-mod	2	0	2
C1M-high	2	1	3
C2H-high	0	1	1
C2L-high	0	1	1
S1L-low	4	3	7
S1L-mod	3	4	7
S1L-high	12	3	15
S1M-mod	1	0	1
W1-pre	4	2	6
TOTAL	136	153	289

La Tabla 5 representa valores de desplazamiento y aceleración que corresponden a los puntos de fluencia y capacidad última, tomando en cuenta para cada clase de vulnerabilidad.

Tabla 5: Parámetros de las curvas de capacidad con respecto a cada clase de vulnerabilidad.

CLASIFICACIÓN HAZUS	Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)	PERÍODO T (S)
C1H-mod	2,56	0,05	22,99	0,15	1,44
C1L-pre	0,25	0,06	4,4704	0,19	0,41
C1L-low	0,25	0,06	3,7338	0,19	0,41
C1L-mod	0,51	0,12	8,94	0,38	0,41
C1L-high	0,99	0,25	23,85	0,75	0,40
C1M-pre	0,74	0,05	8,7884	0,16	0,77
C1M-low	0,74	0,05	7,3152	0,16	0,77
C1M-mod	1,47	0,10	17,55	0,31	0,77
C1M-high	2,92	0,21	46,84	0,62	0,75

C2H-high	7,47	0,25	74,65	0,64	1,10
C2L-high	1,22	0,40	24,36	1,00	0,35
S1L-low	0,38	0,06	5,8166	0,19	0,50
S1L-mod	0,79	0,12	13,97	0,38	0,51
S1L-high	1,55	0,25	37,26	0,75	0,50
S1M-mod	2,26	0,08	27,051	0,23	1,07
W1-pre	0,61	0,20	10,9728	0,60	0,35

Notación:

- Dy:** desplazamiento en el punto de fluencia.
- Ay:** aceleración en el punto de fluencia.
- Du:** desplazamiento último.
- Au:** Aceleración última.

A continuación, se muestran en las Figuras del 22 al 25, los valores de desplazamiento y aceleración, las cuales representan el comportamiento de cada clase de vulnerabilidad frente a un sismo.

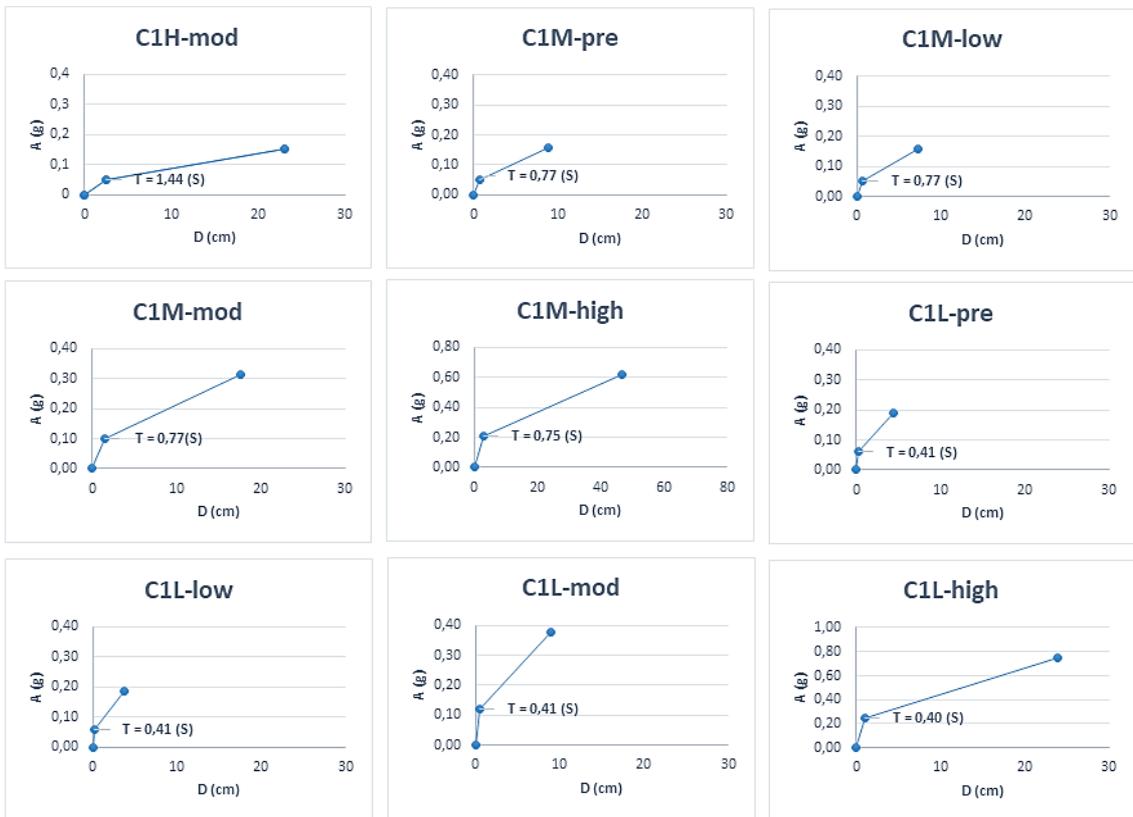


Figura 22. Curvas de capacidad desarrollada en HAZUS (2003) para estructuras de hormigón armado con capacidad momento. C1H_mod, con altura mayor a 8 pisos; C1L_pre, _low, _mod y _high, con altura (1-3 pisos) y C1M_pre, _low, _mod y _high, con altura (4-7 pisos).

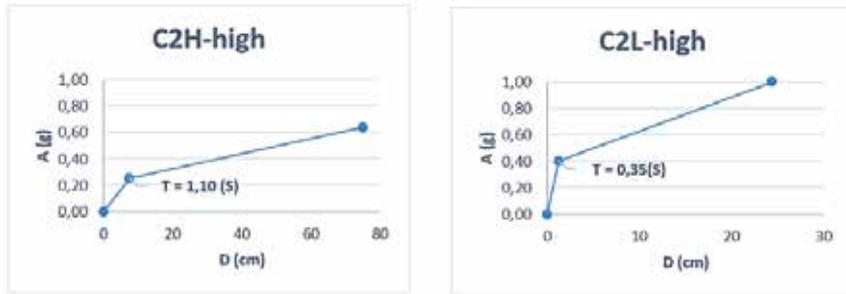


Figura 23. Curvas de capacidad desarrollada en HAZUS (2003) para estructuras de hormigón armado con muros de corte de concreto. C2H_high, con altura mayor a 8 pisos y C2L_high, con altura (1-3 pisos).

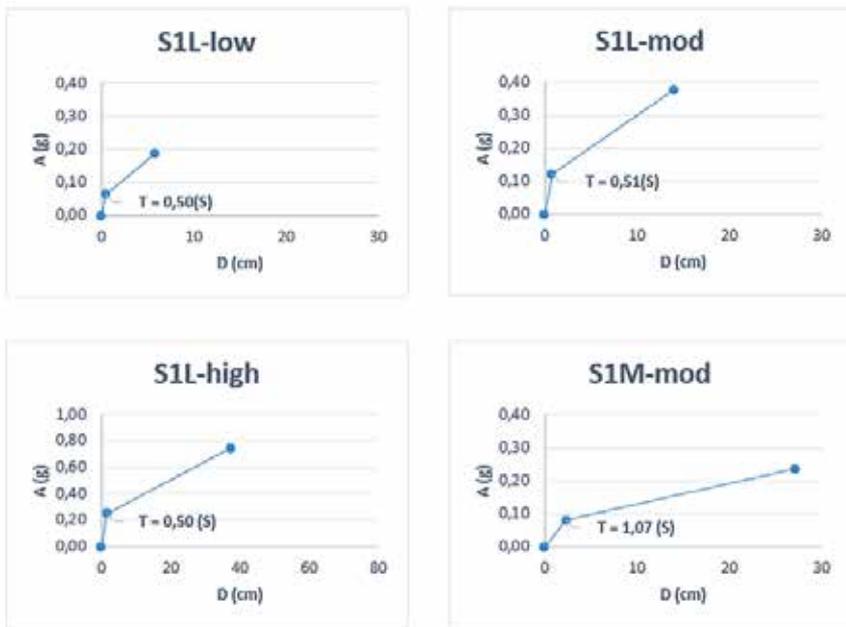


Figura 24. Curvas de capacidad desarrollada en HAZUS (2003) para estructuras de marco de acero con momento. S1L_low, _mod, _high, con altura (1-3 pisos) y S1M_mod, con altura (4-7 pisos).

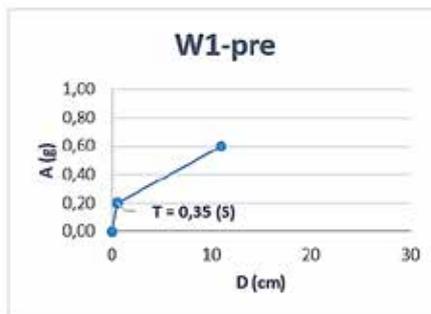


Figura 25. Curvas de capacidad desarrollada en HAZUS (2003) para estructuras con marcos de madera liviana. W1_pre, con altura (1-2 pisos).

En las Tablas 6 y 7 se muestran los valores de los diferentes parámetros conseguidos por el método IDC, para las tipologías correspondientes a la zona 01 y 02 de Manta.

Tabla 6: Valores deducidos por el Método de Coeficiente de Desplazamiento para las diferentes clases de vulnerabilidad en la zona 01 (Manta)

TIP. HAZUS	PERÍODO T_e (s)	SA (T_e)	SD (T_e)	C1	C2	δ (cm)
C1L-pre	0.41	0.84	0.03	2.29	2.25	17.92
C1L-low	0.41	0.84	0.03	2.29	2.25	17.95
C1L-mod	0.41	0.83	0.04	1.58	1.26	7.03
C1L-high	0.40	0.85	0.03	1.25	1.05	4.39
C1M-low	0.77	0.37	0.05	1.18	1.09	7.04
C1M-high	0.75	0.38	0.05	1.02	1.00	5.45
C1H-mod	1.44	0.16	0.08	1.01	1.00	8.15
C2L-high	0.35	0.91	0.03	1.17	1.02	3.29
C2H-high	1.10	0.21	0.06	1.00	1.00	6.21
S1L-low	0.50	0.72	0.05	1.72	1.60	12.62
S1L-mod	0.51	0.71	0.05	1.31	1.11	6.81
S1L-high	0.50	0.73	0.05	1.13	1.02	5.21
W1-pre	0.35	0.91	0.03	1.48	1.13	4.61

Notación: **PERÍODO (T_e):** segundos.
SA: aceleración espectral.
SD (T_e): desplazamiento espectral.
C1: adimensional.
C2: adimensional.
 δ : coeficiente de desplazamiento.

Tabla 7: Valores deducidos por el Método de Coeficiente de Desplazamiento para las diferentes clases de vulnerabilidad en la zona 02 (Tarqui)

TIP. HAZUS	PERÍODO T_e (s)	SA (T_e)	SD (T_e)	C1	C2	δ (cm)
C1L-pre	0.41	0.80	0.03	2.23	2.13	15.82
C1L-low	0.41	0.80	0.03	2.23	2.14	15.98
C1L-mod	0.41	0.80	0.03	1.55	1.23	6.51
C1L-high	0.40	0.81	0.03	1.23	1.04	4.10
C1M-pre	0.77	0.52	0.08	1.26	1.19	11.63
C1M-low	0.77	0.53	0.08	1.27	1.19	11.72
C1M-mod	0.77	0.53	0.08	1.12	1.04	9.01
C1M-high	0.77	0.53	0.08	1.27	1.19	11.72
S1L-low	0.50	0.72	0.05	1.72	1.59	12.41
S1L-mod	0.51	0.71	0.05	1.31	1.11	6.83
S1L-high	0.50	0.72	0.04	1.13	1.02	5.13
S1M-mod	1.07	0.40	0.11	1.06	1.02	12.28
W1-pre	0.35	0.85	0.03	1.44	1.11	4.16

La Tabla 8 representa la escala sugerida en HAZUS (2003), como daño: nulo, leve, moderado, extenso y completo, características que representan los parámetros de las curvas de fragilidad.

Tabla 8: *Parámetros de las curvas de fragilidad (Hazus, 2003)*

TIP. HAZUS	Sd (slight) (cm)	Beta (slight)	Sd (moderate) (cm)	Beta (moderate)	Sd (extensive) (cm)	Beta (extensive)	Sd (complete) (cm)	Beta (complete)
C1H-mod	2.286	0.890	3.962	0.900	10.668	0.900	27.432	0.890
C1L-pre	1.829	0.980	2.921	0.940	7.315	0.900	18.288	0.970
C1L-low	2.286	0.950	3.658	0.910	9.144	0.850	22.860	0.970
C1L-mod	2.286	0.890	3.962	0.900	10.668	0.900	27.432	0.890
C1L-high	2.286	0.810	4.572	0.840	13.716	0.860	36.576	0.810
C1M-pre	3.048	0.730	4.877	0.770	12.192	0.830	30.480	0.980
C1M-low	3.810	0.700	6.096	0.740	15.240	0.860	38.100	0.980
C1M-mod	3.810	0.700	6.604	0.700	17.780	0.700	45.720	0.890
C1M-high	3.810	0.680	7.620	0.670	22.860	0.680	60.960	0.810
C2H-high	4.394	0.680	10.973	0.650	32.918	0.660	87.782	0.750
C2L-high	1.829	0.810	4.572	0.840	13.716	0.930	36.576	0.920
S1L-low	3.302	0.770	5.258	0.780	11.125	0.780	27.432	0.960
S1L-mod	3.302	0.800	5.690	0.750	12.903	0.740	32.918	0.880
S1L-high	3.302	0.800	6.579	0.760	16.459	0.690	43.891	0.720
S1M-mod	5.486	0.650	9.499	0.680	21.488	0.690	54.864	0.870
W1-pre	1.016	1.010	2.540	1.050	7.849	1.070	19.202	1.060

En las Figuras 26 y 27, se muestran las probabilidades de alcance o excedencia para el correspondiente estado de daño de cada clase de vulnerabilidad, cuyos resultados se presenta en porcentaje para la zona 01 y 02 de estudio. De los resultados analizados se observa que probabilidades más altas corresponden a daño moderado, en cambio las probabilidades disminuyen en daño extenso y completo.

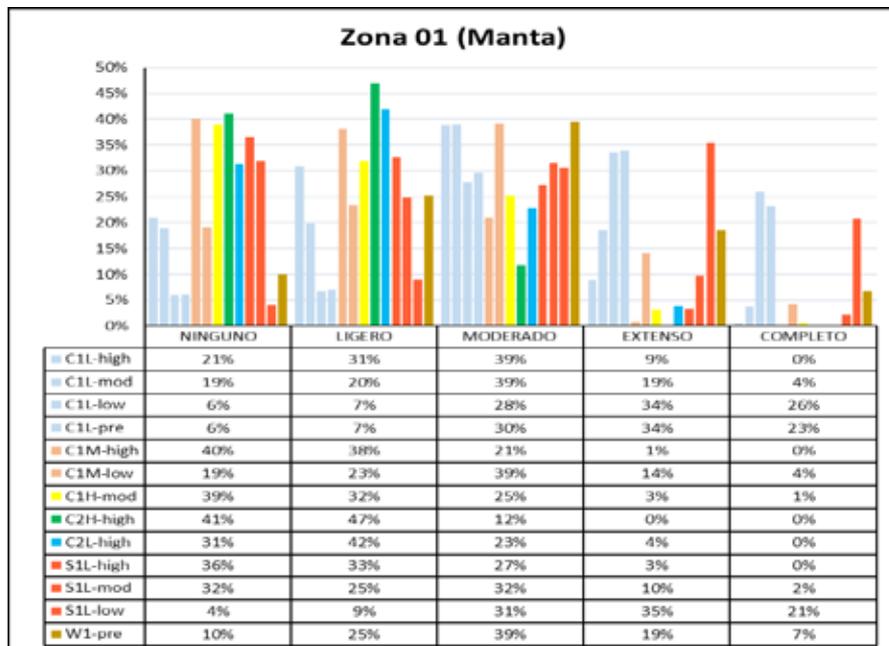


Figura 26. Estados de daño por tipología en la Zona 01 Manta

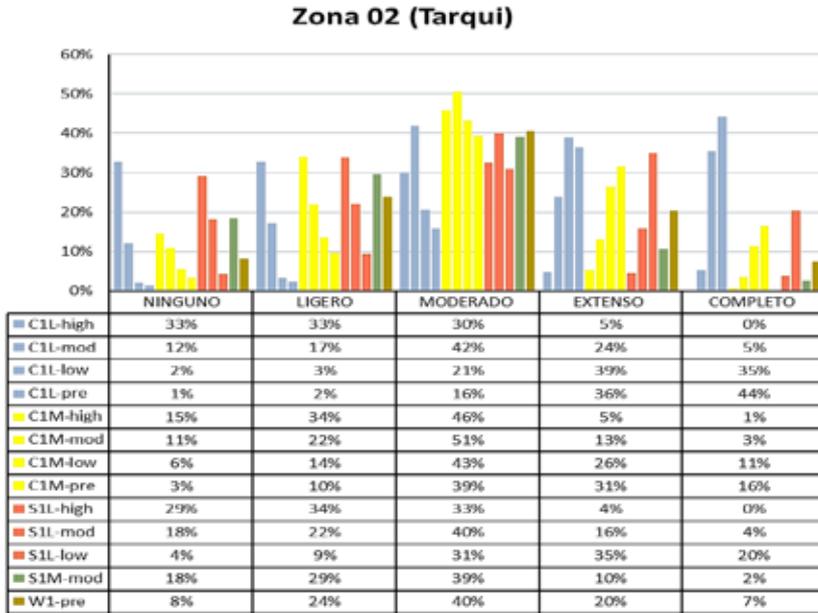


Figura 27. Estados de daño por tipología en la Zona 02 Tarqui.

En las Figuras 28 y 29 se puede apreciar la tonalidad de color rojo a las edificaciones que alcanzarían un **daño moderado** con un rango de 34.3 – 41.7% de la zona 01 (Manta), y un rango de 36.9 – 50.6% de la zona 02 (Tarqui).

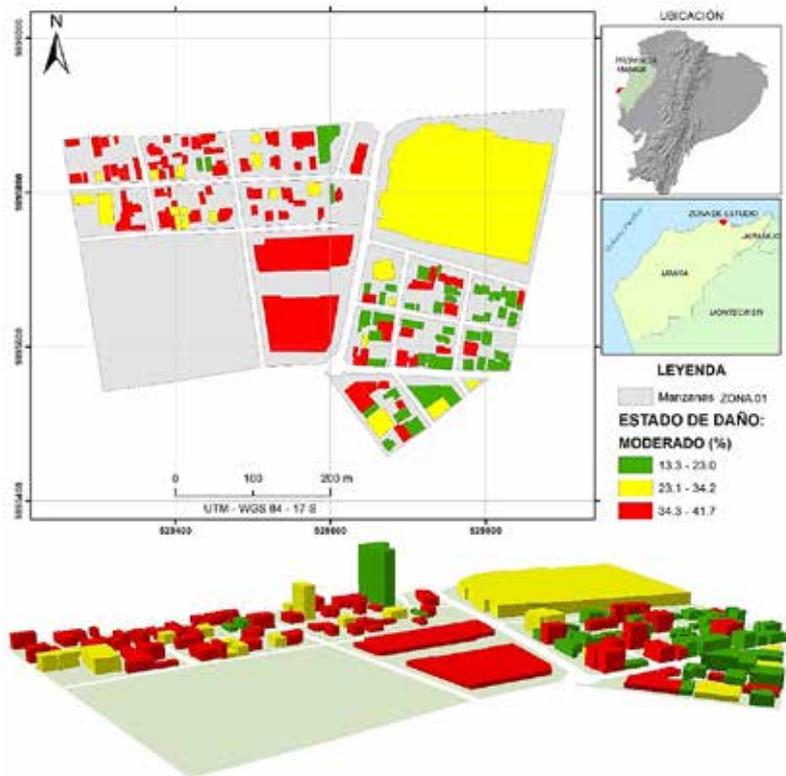


Figura 28. Mapa de distribución del estado de daño Moderado en la Zona 01- Manta.

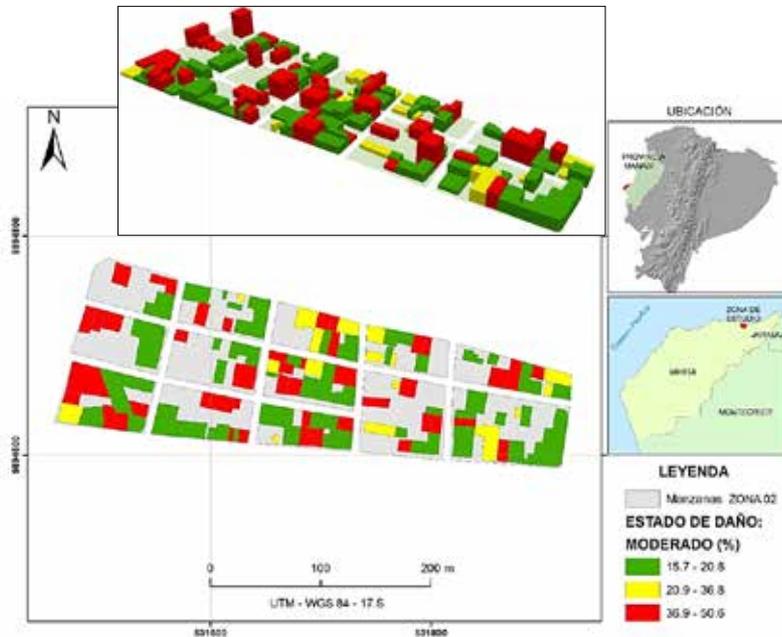


Figura 29. Mapa de distribución del estado de daño Moderado en la Zona 02- Tarqui.

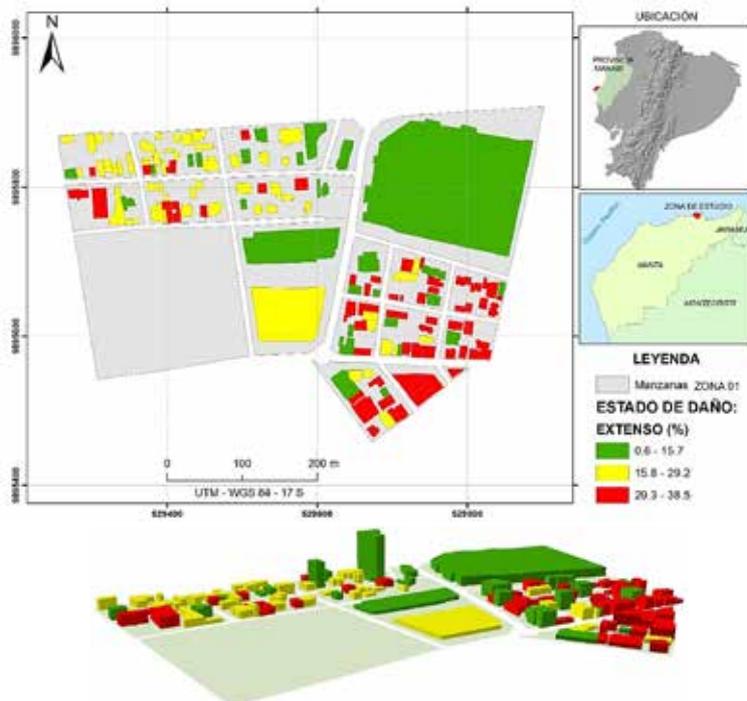


Figura 30. Mapa de distribución del estado de daño Extenso en la Zona 01- Manta

De igual forma en las Figuras 30 y 31 se puede apreciar la tonalidad de color rojo a las edificaciones que alcanzarían un *daño extenso* con un rango de 29.3 – 38.5% de la zona 01 (Manta), y un rango de 31.6 – 38.8% de la zona 02 (Tarqui).

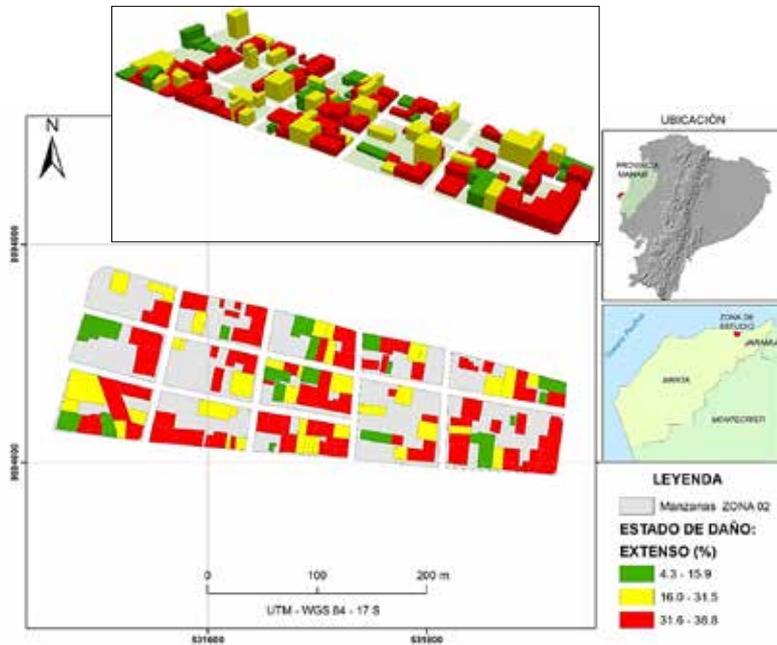


Figura 31. Mapa de distribución del estado de daño Extenso en la Zona 02- Tarqui.

Y finalmente en las Figuras 32 y 33 se puede apreciar la tonalidad de color rojo a las edificaciones que alcanzarían un *daño completo* con un rango de 21.0 – 49.2% de la zona 01 (Manta), y un rango de 20.5 – 44.6% de la zona 02 (Tarqui).

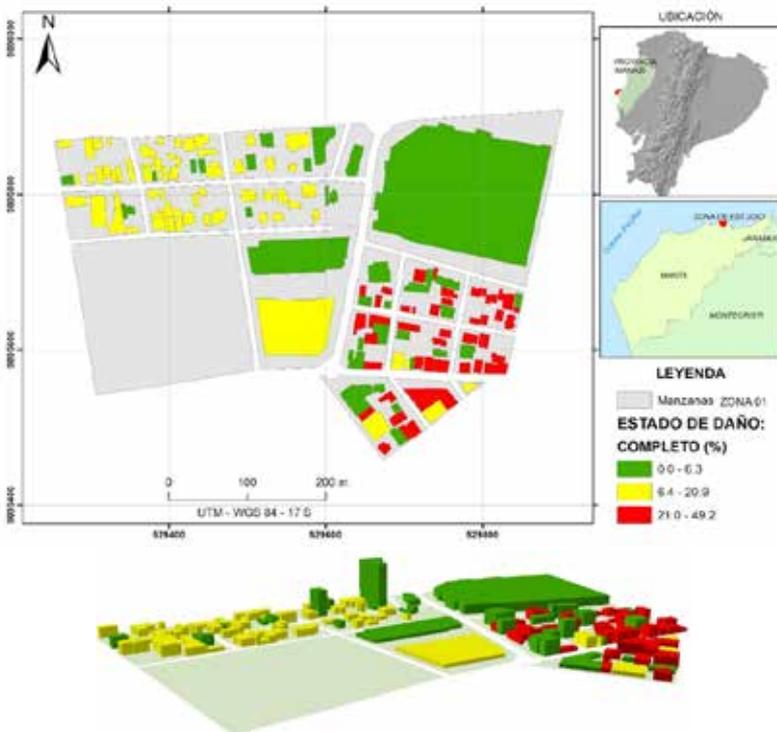


Figura 32. Mapa de distribución del estado de daño Completo en la Zona 01 - Manta

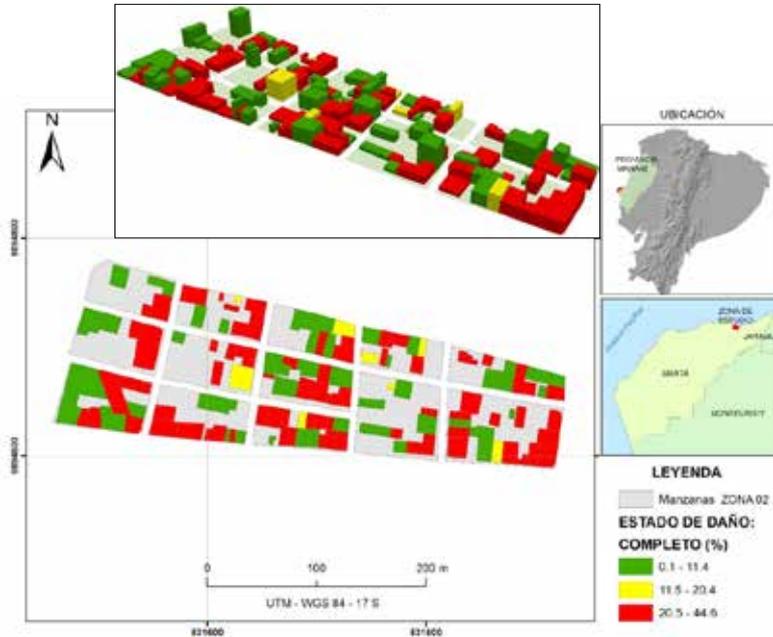
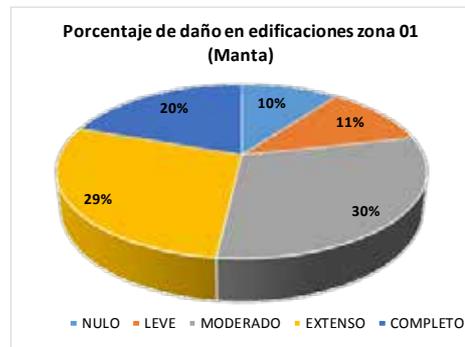


Figura 33. Mapa de distribución del estado de daño Completo en la Zona 02 - Tarqui.

En la zona 01 (Manta), se analizó un total de 153 edificios donde el 30% de los mismos (46 edificios) presentan un estado de daño moderado ante la ocurrencia de un escenario sísmico de Mw 7.4, así mismo un 29% (44 edificios) con un daño extenso y un 20% (30 edificios) con daño completo, como se observa en la Figura 34.

ZONA 01						
TIPOLOGÍA	N°	NULO	LEVE	MODERADO	EXTENSO	COMPLETO
C1L-high	2	0,55	0,63	0,68	0,11	0,02
C1L-mod	17	3,21	3,35	6,63	3,17	0,64
C1L-low	97	5,76	6,53	26,99	32,52	25,20
C1L-pre	14	0,86	0,98	4,16	4,75	3,24
C1M-high	1	0,30	0,39	0,29	0,02	0,00
C1M-low	7	1,33	1,63	2,75	0,99	0,30
C1H-mod	1	0,27	0,32	0,34	0,06	0,01
C2H-high	1	0,31	0,50	0,19	0,01	0,00
C2L-high	1	0,23	0,42	0,29	0,06	0,00
S1L-high	3	1,09	0,98	0,82	0,10	0,00
S1L-mod	4	1,28	0,99	1,26	0,39	0,09
S1L-low	3	0,12	0,27	0,92	1,06	0,63
W1-pre	2	0,20	0,51	0,79	0,37	0,13
TOTAL	153	16	18	46	44	30



	NULO	LEVE	MODERADO	EXTENSO	COMPLETO
Estructuras de hormigón armado con capacidad momento	12,29	13,84	41,85	41,61	29,41
Estructuras de hormigón armado con muros de corte de concreto	0,54	0,92	0,47	0,06	0,00
Marcos de acero con momento	2,50	2,24	3,00	1,55	0,71
Marcos de madera liviana	0,20	0,51	0,79	0,37	0,13
TOTAL	16	18	46	44	30



Figura 34. Número de edificaciones por estado de daño y clase de vulnerabilidad zona 01-Manta.

En la zona 02 (Tarqui), se analizó un total de 136 edificios donde el 29% de los mismos (40 edificios) presentan un estado de daño moderado ante la ocurrencia de un escenario sísmico de Mw 7.4, así mismo un 30% (41 edificios) con un daño extenso y un 23% (31 edificios) con daño completo, como se observa en la Figura 35.

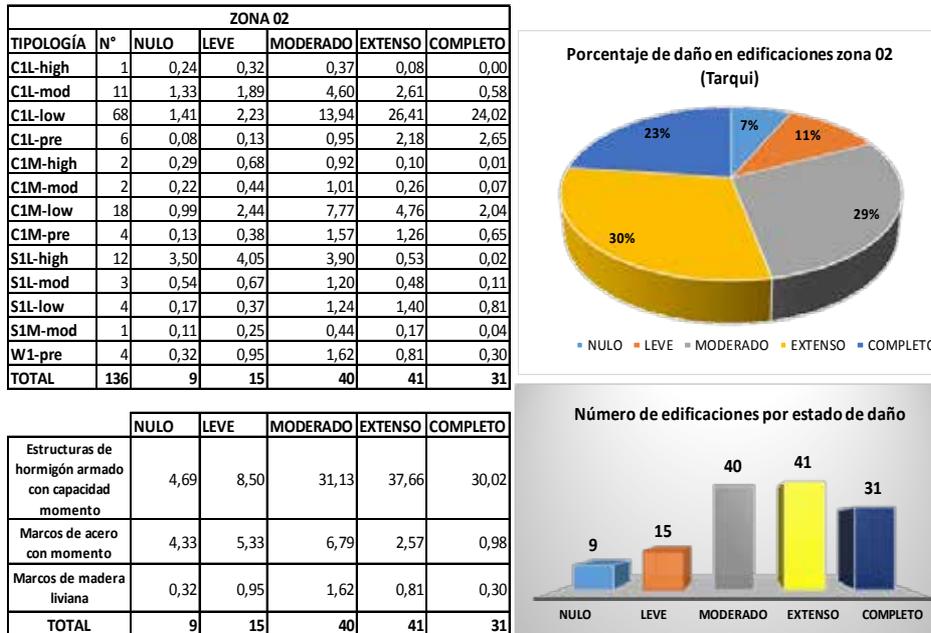


Figura 35. Número de edificaciones por estado de daño y clase de vulnerabilidad zona 02-Tarqui.

Para la determinación del cálculo del daño, se analizó los componentes de peligrosidad y vulnerabilidad por separado. Los resultados de peligrosidad obtenidos en el presente estudio para Manta con un período de retorno de 475 años en roca, son similares a los valores estimados de la NEC-15, donde esta norma ubica a Manta en la zona 5 con valores de PGA de ≥ 0.50 g. De igual manera se presenta la peligrosidad en periodos de retorno de 975 y 2475 años, además, sus correspondientes espectros uniformes de peligrosidad y la desagregación de la peligrosidad en diferentes periodos de retorno y ordenadas espectrales. Para Manta en un período de retorno de 475 años se identifica un sismo de control caracterizado por el par Mw 7.4 y R= 40-60 Km, para el movimiento dado por la PGA (cortos periodos) como para SA (1.0s) (largos periodos estructurales). La fuente responsable para este terremoto de control estaría asociada a la zona de subducción de interfase.

A partir del terremoto de control identificado, se genera un escenario sísmico en Manta, donde se obtienen los espectros de respuesta resultantes de este movimiento. Los mapas de aceleración de este escenario para PGA y SA(1.0s) en roca se presentan en el Anexo 2 y se aprecia una clara atenuación, sin embargo, el efecto local puede aumentar la aceleración como se observa en los espectros de control identificados en las zonas de estudio, donde se alcanzan valores de hasta 1.11 g (valores de la media del modelo de atenuación). Con respecto al análisis de vulnerabilidad se determinó la presencia de 16 tipologías constructivas adaptadas a la descripción de HAZUS (2003), mismas partieron de la descripción de estructuras dominantes como: Hormigón Armado con capacidad momento (C1), Hormigón Armado con muros de corte de concreto(C2), marcos de acero(S1) y marcos de madera(W1), considerando el nivel de diseño, donde se tiene como

resultado un total de 289 edificios analizados de los cuales 136 pertenecen a la zona 01 (Manta) y 153 a la zona 02 (Tarqui); la tipología dominante en las dos zonas de estudio es C1L_low con 165 edificios de estructura de Hormigón Armado con una altura entre 1-3 pisos siendo más del 50% del total de las edificaciones. Las curvas de capacidad son asignadas a cada clase, las cuales son obtenidas por HAZUS (2003), estas curvas son de gran importancia para poder formar los escenarios de cada daño ya que al cruzarse las curvas de demanda y capacidad se permite estimar la demanda del desplazamiento gracias al método I-DCM formulado por FEMA 440 (2005). Luego de obtener las estimaciones del desplazamiento se procede a establecer un estado de daño a cada una de las tipologías con ayuda de las curvas de fragilidad.

Como resultado general con respecto a todas las tipologías el daño dominante es moderado en cambio las probabilidades disminuyen en daño extenso y completo. Esto se puede apreciar en la zona 01 donde el 30% de las edificaciones se estima un estado de daño moderado, un 29% con un daño extenso y un 20% con daño completo. De igual manera la zona 02, que presenta resultados similares con el 29% de edificios con daño moderado, 30% daño extenso y 23% daño completo.

PROPUESTA USO Y OCUPACIÓN DEL SUELO

La presente propuesta conlleva un análisis de variables para generar escenarios prospectivos, para lo cual se muestra el estudio de dichas variables identificando a las más significativas: Normas de Construcción, Densidad de Construcción, Altura de Edificaciones, Estudios de Suelos, Ordenanza Uso y Ocupación del Suelo, en donde se utilizó el programa MICMAC como herramienta de análisis. Posteriormente las variables significativas fueron consideradas para el estudio de los tres escenarios prospectivos, donde se formula preguntas con las variables consideradas claves y con criterio de expertos, a través de encuestas, se da respuestas probables a los escenarios optimista, tendencial y pesimista. En la Figura 36 se aprecia las vías que toman los diferentes escenarios, este análisis morfológico se lo realiza en el programa Smic-Prob-Expert.

Tabla 9: Escenarios Prospectivos para el uso y ocupación del suelo

ESCENARIOS PROSPECTIVOS	NORMAS DE CONSTRUCCIÓN	DENSIDAD DE CONSTRUCCIÓN	ALTURA	ESTUDIOS DE SUELO	ORDENANZA USO Y OCUPACIÓN DEL SUELO
PESIMISTA	No se Cumplen	Se incrementa, del 50 al 90%	Aumenta el número de pisos en construcciones antiguas.	Existen limitados estudios	No se cumple
TENDENCIAL	Se cumplen parcialmente	Aumenta del 50% al 80%	Existe desigualdad de alturas	Aumentan estudios en un 50% de la ciudad	Se cumple parcialmente
OPTIMISTA	Se cumple estrictamente y existe un control por el GAD	Se realizan reestructuraciones parcelarias: manzanas y predios.	La altura es limitada y alcanza su nivel máximo (uniformidad de alturas)	Existe microzonificación sísmica del suelo a nivel manzanero en toda la ciudad.	Se cumple y existe un control por el GAD

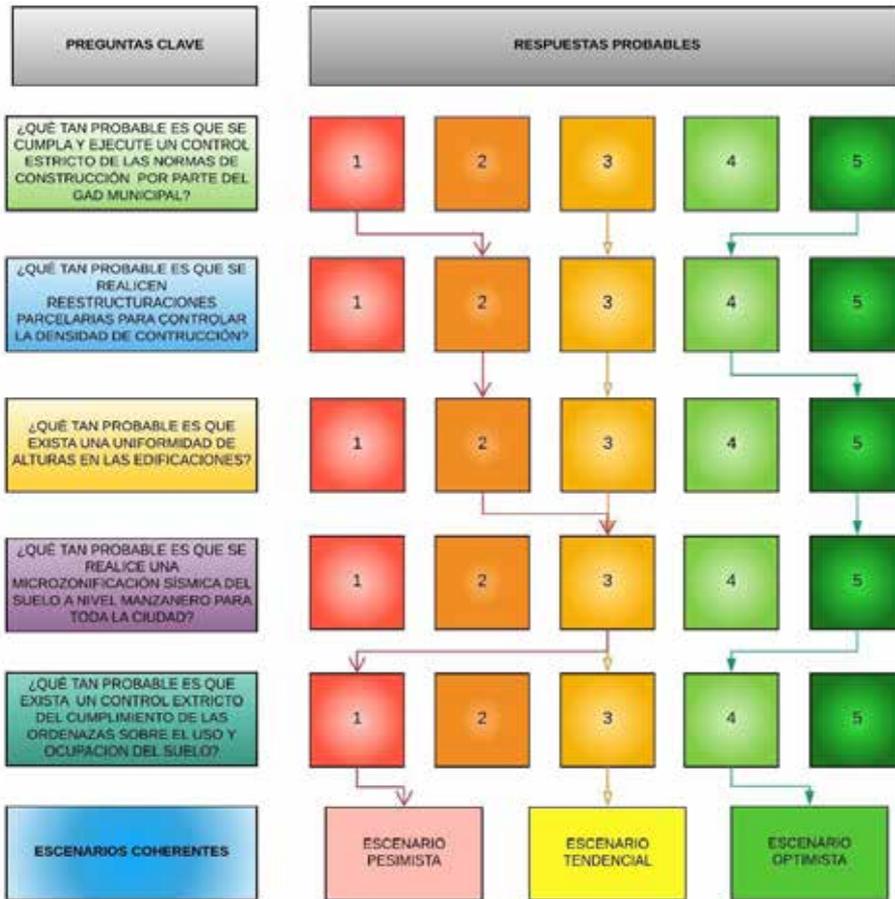


Figura 36. Análisis morfológico de los escenarios pesimista, tendencial y optimista.

Luego del análisis morfológico mostrado anteriormente se describe en la Tabla 9 a cada escenario prospectivo, donde por ejemplo en un escenario pesimista las normas constructivas no se cumplen, en un tendencial se cumple parcialmente y en un optimista se cumplen estrictamente con un control por el GAD.

En las Figuras 37, 38 se presenta el modelo 3D generado a partir de la toma de fotografías aéreas, obtenido en el software Agisoft Photo Scan, en estos modelos se puede apreciar las zonas de estudio como se encuentran actualmente, a partir de los resultados se representa un escenario optimista más adelante.



Figura 37. Modelo 3D y Ortofoto de la zona 01 (Manta).



Figura 38. Modelo 3D y Ortofoto de la zona 02 (Tarqui).

En la Figura 39 se visualiza la propuesta del escenario optimista de la zona 01, esta zona se caracteriza por presentar un tipo de suelo C (suelo muy denso y roca suave) y D (suelo firme), estas condiciones de suelo favorecen a un crecimiento vertical en edificaciones además este sector contiene áreas: hotelera, comercial, residencial y mixta (comercial-residencial), que tomando en cuenta los resultados del presente estudio de riesgo sísmico, se llega a establecer por este escenario optimista una reestructuración parcelaria de lotes, las normas de construcción y ordenanzas de uso y ocupación del suelo se cumplirían estrictamente donde serían controladas por el GAD, y se lograría una uniformidad de altura de los edificios. En la Tabla 10 se visualiza la propuesta de uso y ocupación del suelo de esta zona.



Figura 39. Representación del escenario optimista zona 01 (Manta).

Tabla 10: Propuesta de zonificación urbana a la Zona 01 - Manta

EDIFICACIÓN										
A	AISLADA									
Nº	ZONA	Altura Máxima		Retiros			Distancia entre bloques	COS-PB	COS TOTAL	Lote Mínimo m2
		Pisos	m	F	L	P	D	%	%	
1	A604_60	4	10	3	3	3	6	60	240	600
2	A806_75	6	15	2	2	2	4	75	450	800
3	A1212_70	12	30	3	3	3	6	70	840	1200
4	A1710_40	10	25	3	3	3	6	40	400	1700
C	CONTINUA									
Nº	ZONA	Altura Máxima		Retiros			Distancia entre bloques	COS-PB	COS TOTAL	Lote Mínimo m2
		Pisos	m	F	L	P	D	%	%	
1	C703_80	3	7,5	2	0	2	4	80	240	700
2	C704_80	4	10	2	0	2	4	80	320	700
D	SOBRE LÍNEA DE FÁBRICA									
Nº	ZONA	Altura Máxima		Retiros			Distancia entre bloques	COS-PB	COS TOTAL	Lote Mínimo m2
		Pisos	m	F	L	P	D	%	%	
1	D603_80	3	7,5	0	0	2	4	80	240	600
2	D604_80	4	10	0	0	2	4	80	320	600
3	D1003_80	3	7,5	0	0	2	4	80	320	1000

La propuesta del escenario optimista de la zona 02 se visualiza en la Figura 40, esta zona se caracteriza por presentar un tipo de suelo E (suelo blando), estas condiciones de suelo se deben tomar en cuenta para futuros estudios y lograr que se favorezca un crecimiento vertical en edificaciones, además este sector contiene áreas: hotelera, comercial, educación, residencial y mixta (comercial-residencial), que tomando en cuenta los resultados del presente estudio de riesgo sísmico, se llega a establecer por este escenario optimista una reestructuración parcelaria de lotes, las normas de construcción y ordenanzas de uso y ocupación del suelo se cumplirían estrictamente donde serían controladas por el GAD, y se lograría una uniformidad de altura de los edificios. En la Tabla 13 se visualiza la propuesta de uso y ocupación del suelo de esta zona.

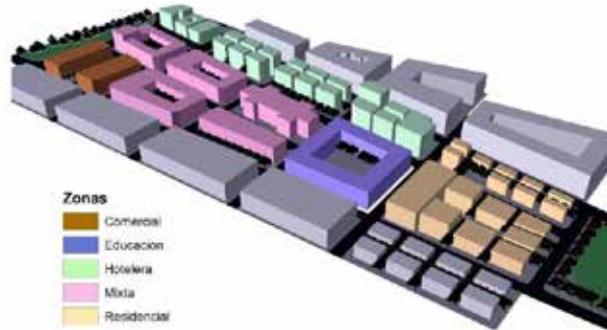


Figura 40. Representación del escenario optimista zona 02 (Tarqui).

Tabla 11: Propuesta de zonificación urbana a la Zona 02 – Tarqui

EDIFICACIÓN										
A	AISLADA									
N°	ZONA	Altura Máxima		Retiros			Distancia entre bloques	COS-PB	COS TOTAL	Lote Mínimo m2
		Pisos	M	F	L	P				
1	A202_40	2	5	2,5	2,5	2,5	5	40	80	200
2	A203_40	3	7,5	2,5	2,5	2,5	5	40	120	200
3	A304_60	4	10	2	2	2	4	60	240	300
4	A403_65	3	7,5	2	2	2	4	65	195	400
5	A503_70	3	7,5	2	2	2	4	70	210	500
6	A605_60	5	12,5	3	3	3	6	60	300	600
C	CONTINUA									
N°	ZONA	Altura Máxima		Retiros			Distancia entre bloques	COS-PB	COS TOTAL	Lote Mínimo m2
		Pisos	M	F	L	P				
1	C403_50	3	7,5	5	0	5	10	50	150	400
D	SOBRE LÍNEA DE FÁBRICA									
N°	ZONA	Altura Máxima		Retiros			Distancia entre bloques	COS-PB	COS TOTAL	Lote Mínimo m2
		Pisos	M	F	L	P				
1	D304_90	4	10	0	0	2	4	90	360	300
2	D4503_60	3	7,5	0	0	10	20	60	180	4500
3	D403_85	3	7,5	0	0	3	6	85	255	400
4	D406_85	6	15	0	0	2	4	85	510	400

CONCLUSIONES

En el Ecuador existen diferentes fuentes generadoras de sismos como los cercanos de la zona de subducción. Estos sismos producen movimiento en el suelo y las zonas que poseen aceleraciones altas se encuentran en la costa del país. La ciudad de Manta al estar ubicada en una zona costera, presenta esta alta peligrosidad, por tanto, si se genera otro evento sísmico fuerte existiría un alto riesgo de daños a las edificaciones, como lo ocurrido en el terremoto del 16 de abril del 2016. El presente trabajo busca determinar el riesgo de daño en las edificaciones, para lo cual se obtuvo el análisis de la peligrosidad y vulnerabilidad, siendo estas las variables esenciales para su cálculo.

Los espectros de respuesta o demanda para las zonas de estudio de Manta se obtuvieron en base a un estudio de peligrosidad, donde primeramente se consideró un posible escenario de ruptura en la zona de interfase a unos 40 Km de la ciudad de Manta, con un evento de Mw 7.4 tomado de los resultados de la desagregación de la peligrosidad, y se modelizó el movimiento que éste generaría en esta ciudad, empleando el modelo de Zhao et al (2006) para sismos de subducción en zonas de interfase, en el cual se tomaron los valores de la media del modelo para la generación de estos espectros de respuesta, tanto para suelos C, D y E presentes en la zonas estudiadas. Estos espectros de control en periodos estructurales cortos superarían la aceleración de la gravedad (g) en los tres tipos de suelos.

Para determinar el cálculo de vulnerabilidad se comenzó identificando las tipologías dominantes de la zona 01(Manta) y 02(Tarqui) de estudio, como las estructuras C1, C2, S1 y W1, encontradas en 289 edificios, la tipología más frecuente hallada en las dos zonas de estudio es la estructura de Hormigón Armado (C1L_low), con 165 edificios de una altura entre 1-3 pisos. Esta tipología conforma más del 50% del total de las edificaciones. Luego se procede a la asignación de las curvas de capacidad para cada clase de vulnerabilidad, definidas por HAZUS (2003), estas curvas forman un papel importante para determinar los escenarios del daño como nulo, ligero, moderado, extenso y completo gracias a la estimación del método I-DCM formulado por FEMA 440 (2005).

Las tipologías C1L_low y C1L_pre, presentan una alta probabilidad de llegar a un grado de daño completo; así mismo las que presentan una probabilidad de llegar a un grado de daño moderado son C1M_mod; finalmente las tipologías que presentan una probabilidad de llegar a un grado de daño nulo son: C2H_high y S1L_high.

En resumen, La zona 01 y la zona 02 presentan mayor probabilidad de alcanzar o exceder estados daño moderado y extenso.

En la propuesta de Uso y Ocupación del Suelo se plantea un escenario prospectivo optimista, el cual se caracteriza por el cumplimiento estricto de las normas de construcción y por la delimitación de alturas. En la zona 01 (Manta) se distribuye en áreas comerciales, hoteleras, residenciales y mixtas, mientras que en la zona 02 (Tarqui) se distribuye en áreas comerciales, educativas, hoteleras, residenciales y mixtas.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, R. (2013). *Microzonificación sísmica de Quito* (Primera ed.). Quito, Ecuador: CEINCI-ESPE.
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J., Lagreulet, S., Segovia, M., Font, Y., . . . Quidelleur, X. (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics*, 33(2), 67-83. doi:10.1002/2012TC003224

- ATC. (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California. Report ATC-13, Applied technology Council, Redwood City, California.*
- Barbat, A. (1998). El riesgo sísmico en el diseño de edificios, Calidad Siderúrgica, Madrid.
- Benito, B., & Jiménez, M. (1999). Peligrosidad sísmica. Física de la Tierra.
- Bonifaz, H., & Haro, J. (2017). Tipos de perfil de suelo para diseño sísmico en Manta, Portoviejo, Chone y Bahía de Caráquez ciudades afectadas por el sismo del 16 Abril del 2016. *Proceedings of the "Third Annual State-of-the-Art in Civil Engineering Structures and Materials" 26th – 28th July 2017, Universidad Central del Ecuador and Universidad de Las Fuerzas Armadas – ESPE, Quito, Ecuador .*
- Brenes, L. (2016). Metodología para la generación de mapas tridimensionales a partir de fotogrametría con vehículo aéreo no tripulado. *Degree Thesis. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.*
- CADS-ESPOL. (2013). Proyecto de Evaluación de Vulnerabilidad y Reducción de Riesgo de Desastres a Nivel Municipal en el Ecuador – ECHO/DIP/BUD/2011/91002. En <http://repositorio.cedia.org.ec/bitstream/123456789/852/1/Perfil%20territorial%20MANTA>.
- Castillo, D. (2013). Peligro Sísmico de la cuenca de Loja - Ecuador. *Degree Thesis. Universidad Católica de Loja. Loja -Ecuador.*
- Chunga, K., Michetti, A., Pazmiño, N., Martillo, C., Romero, A., & Quiñonez, M. (2009). Estimación de máximos niveles de sismicidad para el litoral ecuatoriano a través de la integración de datos geológicos, sismológicos y sismotectónicos. *Revista Internacional: Oro y Petróleo, 19, 46-57.*
- Collot, J., Michaud, F., Alvarado, A., Marcaillou, B., Sosson, M., Ratzov, G., & Pazmino, A. (2009). *Visión general de la morfología submarina del margen convergente de Ecuador-Sur de Colombia: Implicaciones sobre la transferencia de masa y la edad de la subducción de la Cordillera de Carnegie.*
- CRED. (2016). Centre for Research on the Epidemiology Disasters - Poverty & Death: Disaster Mortality 1996-2015. *Naciones Unidas. Comisión Económica para América Latina y el Caribe-CEPAL.*
- Egbue, O., & Kellogg, J. (2010). Pleistocene to Present North Andean “escape”. *Tectonophysics(489), 248-257.* doi:10.1016/j.tecto.2010.04.021.
- Egüez, A., Alvarado, A. Y., Machette, M., Costa, C., & Dart, R. (2003). Database and Map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions, Open-File report 03-289.Sp. pub. USGS-International Lithosphere program.
- Escalante, J., Cáceres, J., & Porras, H. (2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Tecnura, 20(50), 119-140.* doi:10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a09
- FEMA/NIBS. (1999). Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences. HAZUS’ 99 Technical Manual. Earthquake Loss Estimation Methodology, vol. 1-3. Washington, D.C., USA.
- FEMA/NIBS. (2009). NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures FEMA P-750 / 2009 Edition. .
- FEMA-440. (2005). Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. . *Technical report. Applied Technology Council (ATC), California, USA. pp. 392.*
- Freeman, S. (1988). The Capacity Spectrum Method as a Tool for Seismic Design, Eleventh European Conference on Earthquake Engineering, September 6-11th 1998, Paris, A.A.Balkema.
- Fuenzalida, M., Buzai, G., Moreno, A., & García De León, A. (2015). *Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones* (Primera ed.). Santiago de Chile: Triángulo.
- GADM. (2013). Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Manta. Ordenanza de urbanismo arquitectura, uso y ocupacion del suelo en el canton Manta.
- Godet, M. (2000). La Caja de Herramientas de la Prospectiva Estratégica. Recuperado el 4 de Junio de 2018, de http://www.asapbiblioteca.com.ar/wp-content/uploads/2014/10/cajadeherramientas_godet.pdf
- GoogleImages. (2018). *Google Images*. En <https://www.google.com.ec/imghp?hl=es>

- Goyes, P. (2009). Fondos Marinos de Soberanía y Jurisdicción del Ecuador. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Guayaquil, Ecuador: Argudo & Asociados.
- Guillier, B., Chatelain, J., Jaillard, E., Yepes, H., Poupinet, G., & Fels, J. (2001). Seismological evidence on the geometry of the Orogenic System in central-northern Ecuador (South America). *Geophysical Research Letters*, 28(19), 3749-3752.
- Gutscher, M., Malavielli, J., Lallemand, S., & Collot, J. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 168, 255-270.
- HAZUS. (2003). Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Technical manual. Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington DC, USA. pp. 712. .
- INEC. (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Censos*. Recuperado el 27 de Diciembre de 2017, de www.ecuadorencifras.gob.ec
- Lawson, R., Vance, V., & Krawinkler, H. (1994). Nonlinear static pushover analysis-why, when and how? *Proc., 5th U.S. Conf. Earthq. Engrg.*, 1, 283-292.
- Leonard, M. (2010). Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(5A), 1971-1988.
- LOOTUS. (2016). *Ley Organica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo. Registro Oficial N° 790. Ecuador* .
- López-Arroyo, A., & Villacañas, J. (1999). *Metodología Simplificada para el Análisis del Riesgo Sísmico*. Física de la Tierra.
- Maduro, R. (2013). *Sensoriamento Remoto. [Figura]*. En <https://image.slidesharecdn.com/aula01introduo-130927170714-phpapp01/95/sensoriamento-remoto-dos-recursos-naturais-aula-01-3-638.jpg?cb=1380302056>.
- Manchuel, K., Pontoise, B., Béthoux, N., Régnier, M. F., Sallares, V., & al, e. (2009). Sismicidad e implicaciones estructurales en el área de Esmeraldas (Norte de Ecuador): a partir de los experimentos Sublime y Esmeraldas. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Guayaquil, Ecuador: Argudo & Asociados.
- Marcaillou, B., Spence, G., Collot, J., Wang, K., & Ribodetti, A. (2009). Segmentación térmica del margen del Norte del Ecuador y del Sur de Colombia (1-4 N): su relación con la ubicación 177 de la zona sismogénica. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Guayaquil, Ecuador: Argudo & Asociados.
- Masini, E., & Medina, J. (2000). Scenarios as seen from a human and social perspective. *Technological Forecasting and Social Change*. 65, 49-66.
- Michaud, F., Pazmiño, N., & Collot, J. (2009). El karst submarino de mega depresiones circulares de la Cordillera de Carnegie (Ecuador): posible origen por disolución submarina. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Guayaquil, Ecuador: Argudo & Asociados.
- Moreno, A. (2015). *Interpretación de Mapas y Planos Topográficos y Dibujos de Planos Sencillos*. Madrid, España: Paraninfo, S.A.
- NEC-15. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción. Registro Oficial No. 413 del 10 de enero de 2015*. En <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion>
- Nikolaou, S., Vera-Grunauer, X., & Gilsanz, R. (2016). GEER-ATC Earthquake Reconnaissance: April 16 2016, Muisne, Ecuador, Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association Report GEER-049, Version 1b. doi:10.18118/G6F30N
- Nocquet, J., Villegas-Lanza, J., Chlieh, M., Mothes, P., Rolandone, F., Jarrin, P., & Yepes, H. (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. *Nature Geoscience*, 7, 287-291. doi:10.1038/NGEO2099
- OIM. (2016). *Organización Internacional para las Migraciones*. Recuperado el 12 de Mayo de 2018, de <http://oim.org.ec/pdf/terremoto/reporte2%20eng.pdf>

- Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., & D'Amico, V. (2014). CRISIS 2014 V1.0, Program for computing seismic hazard. . *Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Parra, H. (2016). Desarrollos Metodológicos y Aplicaciones hacia el Cálculo de la Peligrosidad Sísmica en el Ecuador Continental y Estudio de Riesgo Sísmico en la Ciudad de Quito. *Doctoral Thesis. Universidad Politécnica De Madrid. Madrid-España* .
- Pazmiño, N., & Michaud, F. (2009). Descripción de los Sedimentos Marinos en la Cordillera Submarina de Carnegie. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Guayaquil, Ecuador: Argudo & Asociados.
- Pedroja, K., Dumont, J., & Ortlieb, L. (2009). Levantamiento Cuaternario costero del Arco de Talara (Ecuador y norte del Perú): cuantificaciones con las secuencias de terrazas marinas. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Guayaquil, Ecuador: Argudo & Asociados.
- Pillajo, J., Sáenz, F., Benito, M., Gaspar-Escribano, J., Parra, H., & Padilla, O. (2018, en imprenta). Analysis of the accelerometric data of the seismic series of Pedernales (April 2016), calibration of GMPEs and simulation of a local seismic scenario .
- PNBV. (2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2019, Toda una Vida. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo - Senplades 2017*. Quito, Ecuador.
- Quirós, L. (2017). Modelizaciones y análisis de sensibilidad en la evaluación integral del riesgo sísmico a escala urbana. Aplicación a la ciudad de Lorca. *Doctoral Thesis. Universidad Politécnica de Madrid*.
- Ruiz-Barajas, S. (2013). Multi-hazard analysis and identification of priority settlements for land management in Haiti. *Master's Thesis. Universidad Politécnica de Madrid and Technische Universität München*.
- SNI. (2017). *Sistema Nacional de Información*. En <http://sni.gob.ec/coberturas>
- Toulkeridis, T. (2013). *Volcanes activos Ecuador*. Santa Rita, Quito, p 152.
- Toulkeridis, T. (2011): Volcanic Galápagos Volcánico. Ediecuatorial, Quito, Ecuador: 364pp.
- Toulkeridis, T., Chunga, K., Rentería, W., Rodríguez, F., Mato, F., Nikolaou, S., D'Howitt, M.C., Besenon, D., Ruiz, H., Parra, H. and Vera-Grunauer, X., 2017b. The 7.8 M w Earthquake and tsunami of 16th April 2016 in Ecuador: Seismic Evaluation, Geological Field Survey and Economic Implications. *Science of Tsunami Hazards*, 36(4): 197-242.
- Toulkeridis, T., Parra, H., Mato, F., Cruz D'Howitt, M., Sandoval, W., Padilla Almeida, O., Rentería, W., Rodríguez Espinosa, F., Salazar Martínez, R., Cueva Girón, J., Taipe Quispe, A. and Bernaza Quiñonez, L., 2017a: Contrasting results of potential tsunami hazards in Muisne, central coast of Ecuador. *Science of Tsunami Hazards*, 36: 13-40.
- Toulkeridis, T., Mato, F., Toulkeridis-Estrella, K., Perez Salinas, J.C., Tapia, S. and Fuentes, W., 2018: Real-Time Radioactive Precursor of the April 16, 2016 Mw 7.8 Earthquake and Tsunami in Ecuador. *Science of Tsunami Hazards*, 37: 34-48
- Trenkamp, R., Kellogg, J., Freymuller, J., & Mora, H. (2002). Wide plate margin deformation, South Central America and Northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 157-171.
- UNDRO. (1979). *Natural Disasters and Vulnerability Analysis, Informe de la Reunión del Grupo de Expertos 9-12 de Julio, 1979, Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en casos de Desastre, Ginebra*.
- USGS. (2016). *United States Geological Survey*. Recuperado el 20 de Abril de 2018, de https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official19060131153610_30#origin
- Vaca, S., Régnier, M., Bethoux, N., Álvarez, V., & Pontoise, B. (2009). Sísmicidad de la región de Manta: Enjambre sísmico de Manta-2005. En J. Collot, V. Sallares, & N. Pazmiño (Edits.), *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos* (págs. 151-166). Guayaquil, Ecuador: Argudo & Asociados.
- Vera-Grunauer, X. (2014). Seismic Response of a Soft, High Plasticity, Diatomaceous Naturally Cemented Clay Deposit, Doctoral Dissertation, University of California, Berkeley. .

- Vergara-Schmalbach, J., Fontalvo-Herrera, T., & Maza-Ávila, F. (2010). Scenario Planning: Review of concepts and methodological proposals. *Prospect*, 8(2), 21-29.
- Wilches-Chaux, G. (1989). *Herramientas para la Crisis: Desastres, Ecologismo y Formación Profesional*; Popayan: Sena.
- Witt, C., Bourgois, J., Michaud, F., Ordoñez, M., Jiménez, N., & Sasson, M. (2006). Development of the Gulf of Guayaquil (Ecuador) during the Quaternary as an effect of the Nort Andan block tectonic escape. *Tectonics*. 25 (TC3017), 1-22. doi:10.1029/2004TC001723
- Yépez, F. (1996). Simulación de escenarios de daño sísmico en zonas urbanas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño de la Ingeniería*, 12(3), 331-358.
- Youngs, R., Chiou, S., Silva, W., & Humphrey, J. (1997). Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 58-73.
- Zamora, A., & Litherland, M. (1993). *Mapa Geológico de la República del Ecuador; Esc. 1:1'000.000. Corporación de Desarrollo e Investigación Geológico Minero-Metalúrgico y Misión Geológica Británica-British Geological Survey*.
- Zhao, J., J. Z., Asano, A., & et.al. (2006). Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Base don Predominant Period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898-913. doi:10.1785/0120050122