

Determinación de Zonas de Peligrosidad Sísmica en la cuenca del río Jama con el uso de perfiles de respuesta del suelo

Determination of Seismic Hazard Areas in the Jama river basin with the use of soil response profiles

David Stay Coello ^{1,*}, Patricia Villa Ríos^{2,†}, Manuel Gómez de la Torre^{3,‡}, Melissa Briones ^{4,⊗}

^{1,2,3,4}Universidad de Guayaquil, Ecuador.

davidstay@ug.edu.ec¹, angela.vllar@ug.edu.ec²
manuel.gomezdelatorre@ug.edu.ec³, melissa.briones@ug.edu.ec⁴

Fecha de recepción: 31 de mayo de 2018 — Fecha de aceptación: 1 de octubre de 2018

Resumen—Esta investigación responde a la necesidad de disponer de mapas de zonificación que, permitan identificar zonas de mayor peligrosidad sísmica para la cuenca del río Jama. Para lograr esto se ha utilizado información de fácil verificación que normalmente se encuentra disponible para una cuenca hidrográfica; información obtenida mediante la utilización de sistemas públicos de información geográficos e información del área de estudio de Proyectos particulares. En la caracterización de este caso de Estudio de la Cuenca del Río Jama se ha evaluado la influencia de las condiciones geológico-geotécnicas, topográficas, geomorfológicas, parámetros geotécnicos e hidrología general. Para la identificación de las zonas de igual peligrosidad sísmica en el río Jama se generaron mapas temáticos de zonificación, mediante el uso del software de información geográfico ArcGis; el que nos permitió comparar la geología y geomorfología de la cuenca con la finalidad de delimitar zonas de similar respuesta sísmica. Los perfiles de Respuesta Sísmica fueron analizados mediante la metodología de Zonificación Detallada Grado 2 (de acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción año 2015) con el apoyo de ensayos geofísicos recopilados en las unidades geomorfológicas identificadas en el área de estudio, utilizando la velocidad de onda cortante promedio del suelo (V_s) (que sobreyace al semi-espacio). El resultado de esta investigación permitió establecer para cada zona un tipo de perfil de suelo y un espectro elástico en aceleraciones para el diseño de estructuras sísmo resistente, con la finalidad de brindar seguridad a los habitantes para el desarrollo de futuras infraestructuras.

Palabras Clave—Zonas de peligrosidad sísmica, diseño sísmo resistente, zonificación geotécnica.

Abstract—This research is motivated by the need to get zoning maps that allow identifying areas of greater seismic hazard for the Jama river basin; For that goal has been used the type of information easy to verify which is normally available for a watershed, information through the use of public geographic information systems and field works of individual projects of this study area. In the characterization of this segment of the Jama River basin was evaluated the influence of the geological-geotechnical, topographic, geomorphological, geotechnical parameters and general hydrology conditions. For the identification of zones of equal seismic hazard in the Jama river basin, zoning thematic maps were generated, using the ArcGis geographic information software, which allowed us to compare the geology and geomorphology of the basin in order to delimit zones of similar seismic response. The seismic response profiles were analyzed by the Grade 2 Detailed Zoning (classified according to the Ecuadorian Construction Standard year 2015), with the support of geophysical tests collected in the geomorphological units identified, using the average shear wave velocity of the soil (V_s). The result of this investigation allowed to establish for each zone a type of soil profile and an elastic spectrum in accelerations for the design of earthquake resistant structures, with the purpose of providing security to the inhabitants for the development of future infrastructures.

Keywords—Seismic hazard zones, earthquake resistant design, geotechnical zoning.

INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se va a analizar la cuenca hidrográfica del Río Jama que se encuentra ubicada en la zona norte de la provincia de Manabí, considerada para el análisis desde la línea de costa hasta 33 km tierra adentro. En la presente investigación se realiza la evaluación cartográfica con mapas de fuentes públicas como: Instituto Geográfico

Militar y Secretaría Nacional del Agua referidos a la cuenca del río Jama.

Con el uso del Software ArcGIS se pudo delimitar de la cuenca del río Jama en base a los mapas Topográficos del IGM se determinó que la cuenca del río tiene un área total de 1396 km² considerando a los cantones Jama, Pedernales, Chone, Flavio Alfaro, Sucre y San Vicente; de igual forma se pudo determinar que el curso principal del río tiene una longitud de 59 Km.

*Magíster en Geotecnia

†Magíster en Finanzas y Proyectos corporativos

‡Magíster en Ciencias

El Ecuador está ubicado en la parte noroccidental de Améri-

ca del Sur, el margen ecuatoriano es un límite convergente de placas, caracterizado por la subducción de la placa marina Nazca hacia el Este por debajo de la placa Sudamericana a una velocidad promedio de 5-7 cm/año. (Trenkamp et al., 2002).

El margen ecuatoriano además sufre deformaciones relacionadas a la subducción de la Placa de Nazca estructuralmente compleja, que incluye la presencia de la Cordillera asísmica de Carnegie, con 400km de ancho y 2km de alto aproximadamente (Michaud et al., 2006).

El basamento del margen continental involucra terrenos oceánicos acrecionados. El principal terreno costero corresponde a la formación Piñón, que es sobreyacido por material volcánico de San Lorenzo y Cayo, del Cretácico Tardío-Paleoceno en las cuencas de Antearco de Borbón, Manabí y Progreso (Baldock, 1982).

La zona urbana más importante en la cuenca es la ciudad de Jama, que se encuentra ubicada en la desembocadura del río Jama. La cuenca de aportación limita al Norte con las divisorias pertenecientes al sistema fluvial del río Esmeraldas, al Este con la subcuenca del río Daule perteneciente al sistema fluvial del río Guayas, al Sur con la cuenca del río Chone y al Suroeste con la cuenca del río Briceño y ríos costaneros.

El cantón Jama Tiene una población de 23.253 habitantes según el último censo realizado en el año 2010 por el Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador (INEC, 2010); las actividades agrícolas, pesquera, ganadera y la acuicultura se presentan como los principales agentes de la economía de cantón. Jama está a una altura media de 185 msnm, se encuentra rodeado de colinas, de alturas menores a los 500 msnm, presenta relieves que van desde planos a casi planos de valles fluviales, llanuras aluviales costeras y pie de monte occidental, terrazas, llanuras y cuencas deprimidas costera (SNI, 2013).

El área del cantón Jama se ha visto afectado por eventos sísmicos extremos como el suscitado el 16 abril del 2016 que provocó grandes pérdidas materiales, vidas humanas y estructuras colapsadas.

La norma ecuatoriana de la construcción NEC-15 que entró en vigencia en el año 2015 tiene como objetivo precautelar la vida humana, evitando el colapso de estructuras, donde se establece una serie de recomendaciones para el diseño y construcción de las estructuras sísmo-resistentes en todo el territorio. La mayoría del territorio del Ecuador se encuentra ubicado en una zona de alto peligro sísmico, como se evidencia en el capítulo NEC-SE-DS, esto nos indica que las edificaciones deben ser sísmo-resistentes. Así mismo la norma exige que para poblaciones de más de 100.000 habitantes se requiere de estudios de microzonificación sísmica y geotécnica, basada en: la geología, tectónica, la sismología y características locales del suelo. Aunque la Norma no exige al cantón Jama contar con estudios de microzonificación sísmica y geotécnica, porque tiene menos de 100.000 habitantes, dichos estudios son necesarios para el desarrollo de nuevas estructuras en la cabecera cantonal (NEC, 2013).

Esta investigación se basa en poder caracterizar aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos de la zona de estudio mediante manejo cartográfico de mapas temáticos a fin de determinar zonas erosivas y deposicionales. Los mapas de zonificación nos permitirán identificar zonas de similar peligrosidad sísmica, mediante el uso de perfiles de respuesta sísmica del suelo en la cuenca hidrográfica del Río Jama.

Con la información generada se puede realizar una Zonificación General (Grado 1) utilizando los aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos y posteriormente se puede realizar una Zonificación Detallada (Grado 2), mediante información de ensayos geofísicos y sondeos mecánicos para caracterizar los suelos y rocas, finalmente se definen zonas de similar respuesta sísmica mediante el uso de los perfiles de respuesta sísmica que se define en la NEC 2015.

Con la información recolectada y utilizando el software de información geográfico ArcGIS se puede generar cartografía temática para analizar e identificar las zonas de alta peligrosidad sísmica.

Esta investigación incluye el análisis de pruebas geofísicas y ensayos de penetración (PT) en sondeos mecánicos. Los métodos de Grado 2 necesitan más información sobre el suelo ya que requiere de investigaciones subsuperficiales para evaluar las propiedades geotécnicas en sitios específicos. La primera parte consiste en definición del lecho rocoso, utilizando microtemores, y perfiles de la velocidad de onda de corte. La definición del basamento rocoso se considera para los estratos con velocidades de onda de corte en el orden de 760 m/s (NEC, 2013). Para identificar los perfiles de suelo, además de los perfiles geofísicos se puede utilizar la Prueba de Penetración Estándar (SPT) que mediante correlaciones también se puede obtener la velocidad de onda cortante, que son parámetros clave en el enfoque Grado 2 (of ISSMGE, 1993).

Para la determinación de zonas de peligrosidad sísmica se utilizó la metodología descrito en el Manual de Zonificación de amenazas por sismos, zonificación detallada Grado 2 que se describe en la Figura 1.

Con la finalidad de poder llegar a determinar la caracterización de la zonificación detallada Grado 2, en esta investigación se procedió a la generación de información cartográfica como: Mapa Hidrográfico de la Cuenca del Río Jama, Mapa Geológico de la Cuenca Hidrográfica, Mapa de geomorfología, Mapa de Pendientes y el Mapa de ubicación de los ensayos geofísicos ayudados del software ArcGIS para determinar las zonas de similar peligrosidad sísmica.

METODOLOGÍA

En esta investigación se utilizó la combinación de la técnica analítica y trabajos de campo, donde se analizaron la influencia de las condiciones geológicas, geomorfológicas y topográficas, lo cual nos permitió determinar la composición del terreno donde se encontró la presencia de terrenos blandos que tienen como característica ampliar los efectos de los terremotos (con-

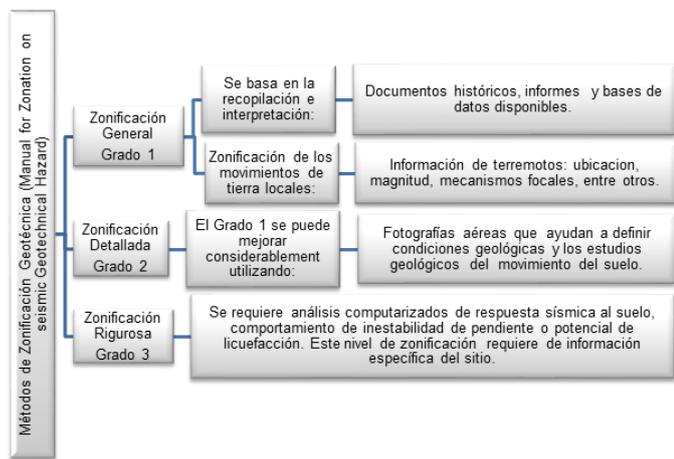


Figura 1. Cuadro de los Métodos Zonificación Geotécnica según TC4 of ISSMGE 1999

Fuente: Elaboración propia

siderando un efecto local). Mediante cartografía geotécnica, topografía base, pudimos realizar la descripción geomorfológica, con los parámetros geotécnicos e hidrológicos generales de la cuenca del Río Jama se analizaron las zonas de mayor peligrosidad sísmica.

En la Figura 2 se especifican los tipos de datos fuentes en forma secuencial que se utilizaron para determinar la zona de similar peligrosidad sísmicas que deben ser considerados en el diseño de edificaciones sismorresistentes.



Figura 2. Flujo de datos fuentes a considerarse para determinar la zona de similar peligrosidad sísmicas

Fuente: Elaboración propia

Mediante el uso del software ArcGIS nos permitió generar mapas de zonificación con la delimitación de zonas de similar peligrosidad sísmica de acuerdo con la metodología determinada en la Figura 3. Estos productos cartográficos ayudarán a la toma decisiones de las autoridades locales para salvaguardar vidas de la población afectada.

Para la determinación de los Mapas de Zonificación Sísmica detallada de Grado 2 se requiere disponer del análisis de geología regional, hidrografía de la cuenca y el análisis de ensayos geotécnicos como se define en la Figura 3.

Para generar el análisis de la geología a nivel regional

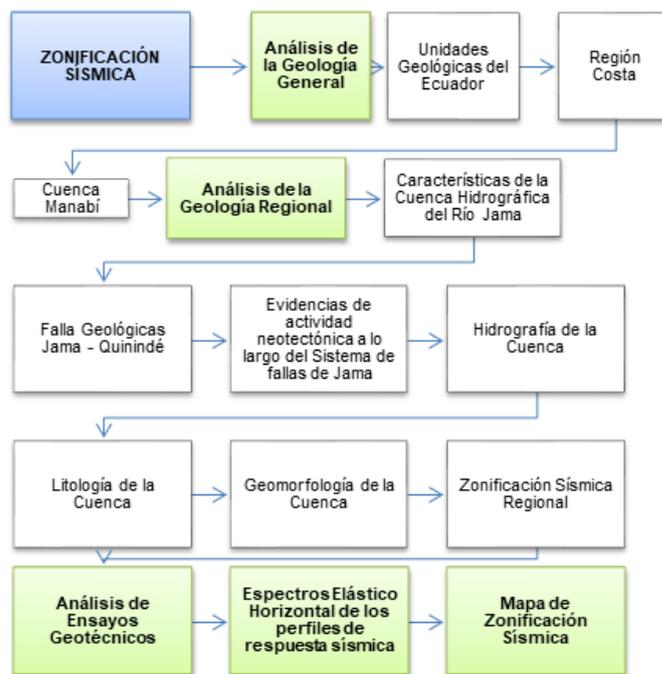


Figura 3. Flujo de datos fuentes a considerarse para determinar la zona de similar peligrosidad sísmicas

Fuente: Elaboración propia

se obtuvo a partir de las hojas geológicas de Jama (10 CT-MIII-B) y Bahía de Caráquez (11-CT-MII-D) en las que se determinaron las unidades geológicas del Ecuador. Con el análisis de la geología regional se analizó las características fisiográficas de la cuenca hidrográfica del río Jama, se unificó con los datos del mapa de Falla Geológicas Jama – Quinindé y considerando evidencias de actividad neotectónicas a lo largo del Sistema de fallas de Jama.

Partiendo del mapa de Hidrografía de la Cuenca en estudio y considerando los datos de: Litología de la misma, la Geomorfología, el mapa de Peligro Sísmico del Ecuador, los Análisis de Ensayos Geofísicos nos permitió determinar los Mapa de Zonificación Sísmica de la Cuenca Hidrográfica del Río Jama.

Al aplicar la metodología propuesta de la Zonificación Detallada Grado 2 de la Figura 3 y mediante el uso de perfiles de respuestas sísmicas de suelos citados en la NEC-2015 “Peligro Sísmico” nos permitió establecer las zonas de peligrosidad sísmicas las mismas que deberán ser consideradas en el diseño de edificaciones sismo-resistentes en el área de estudio.

Generación de Mapas Temáticos.- Para esta investigación fue necesario generar varios mapas temáticos los que nos ayudaron a realizar los análisis para obtener el Mapa de Zonificación Sísmica, con la utilización de la cartografía base y las temáticas características de cada producto, a continuación, se describe la generación de los mapas utilizados para esta investigación:

Mapa Hidrográfico de la Cuenca del Río Jama

Para la generación del mapa Hidrográfico de la Cuenca del Río Jama se procedió a descargar los mapas de: Cuencas Hidrográficas del Río Jama (090) en formato shape a escala 1:250.000 elaborado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) en el año 2011, y la cobertura shape de la red hidrográfica del Ecuador desde el geoportel del Instituto Geográfico Militar (IGM) del año 2008.

Con las dos coberturas ingresadas en el software ArcGis se discriminaron los datos mediante el uso de filtros donde se clasificaron los atributos que pertenecen a la sub-cuenca del río Jama obteniendo el Mapa Hidrográfico de la Cuenca del Río Jama que visualiza en la figura 4.

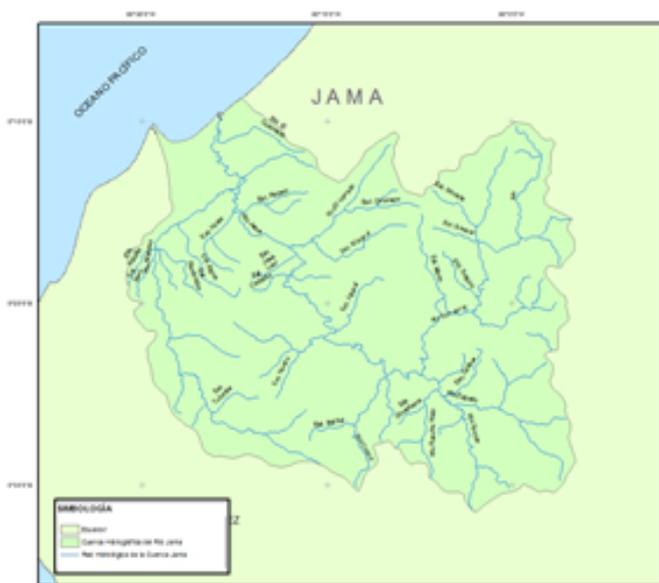


Figura 4. Mapa Hidrográfico de la Cuenca del Río Jama
Fuente: Elaboración propia

La cuenca hidrográfica obtenida y calculada en el mapa cubre un área de 1396km^2 y esta compartida con los cantones Sucre, Chone y San Vicente; constituyendo uno de los siete estuarios principales del litoral ecuatoriano.

Generación Mapa Geológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Jama

Para la generación de este mapa se georreferenciaron las hojas geológicas de Bahía de Caráquez y Jama; mediante las herramientas de reproyección y filtros del software ArcGIS se pudo determinar los diferentes ambientes geológicos que afectan el área de estudio generando una cobertura de geología general de la cuenca que contiene las unidades geológicas características de la región como se muestra en la figura 5.

Generación del Mapa de Pendientes

Para realizar el mapa de pendientes que se muestra en la figura 6 se utilizaron las coberturas shape tomadas del geoportel del IGM (Jama_8417S, Canoa_8417S, Convento_8417S, Diez_De_Agosto_8417S, Flavio_Alfaro_8417S, La_Alianza_8417S, Lazaro_8417S, Ricaurte_8417S, San_Isidro_8417S) de las curvas de nivel con

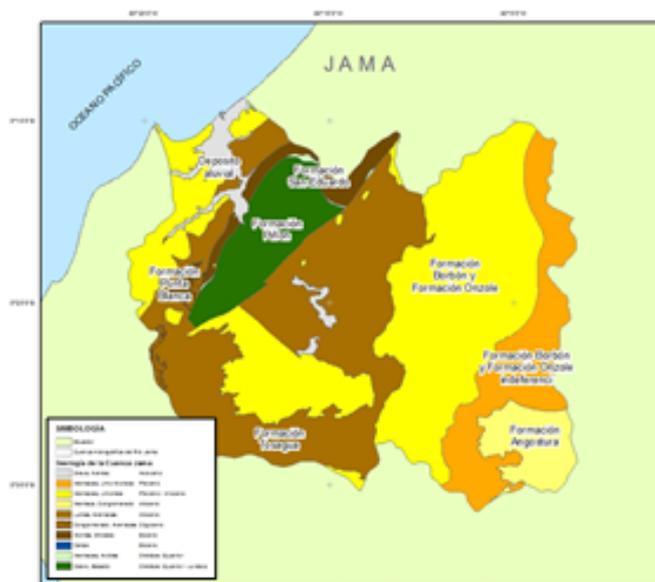


Figura 5. Mapa Geológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Jama.
Fuente: Elaboración propia

su respectiva elevación de la zona de estudio las mismas que fueron comparadas con la topografía otorgada por el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de la provincia de Jama año 2017.

Para la determinación del mapa de pendientes generamos un TIN (capa de redes irregulares de triángulos) mediante el uso de la herramienta del software Arc-Gis “créate TIN” y posteriormente se convierte en imagen ráster para poder visualizar el DEM (representación ráster de una superficie continua, que en general hace referencia a la superficie de la tierra), y finalmente usamos las herramientas de clip de ArcGis para extraer el mapa de pendientes del área de estudio.

Se realiza una reclasificación de los parámetros donde se ingresan los rangos de las pendientes y se obtiene el mapa de pendientes como se visualiza en la figura 6.

Mapa de geomorfología

Se procede a analizar la geomorfología del área de estudio. Tomando como referencia el lugar donde resalta el relieve más característico de la cuenca del Río Jama de la zona y las características geomorfológicas desarrolladas por el CLIR-SEN, 2012. Con base en los atributos línea de costa, valle fluvial, zona de laderas determinados con el sistema fluvial y se cruza con el mapa de pendientes para obtener el Mapa de Geomorfología como se muestra en la figura 7.

Dentro de la composición geomorfológica de la cuenca Jama, se visualizan unidades cuya característica principal son la presencia de superficies elevadas con pendientes medias a altas.

Mapa de ubicación de los ensayos geofísicos

Una vez obtenido el mapa geológico y geomorfológico se

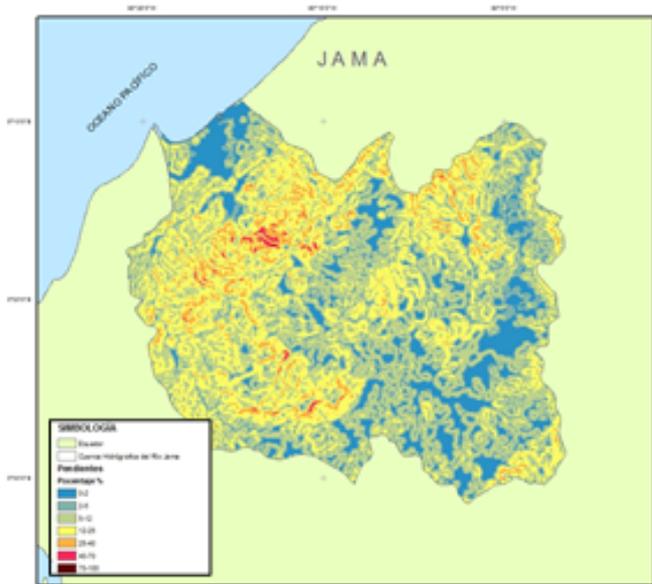


Figura 6. Mapa de pendientes
Fuente: Elaboración propia

zonificación detallada Grado 2 como se muestra en la figura 8.

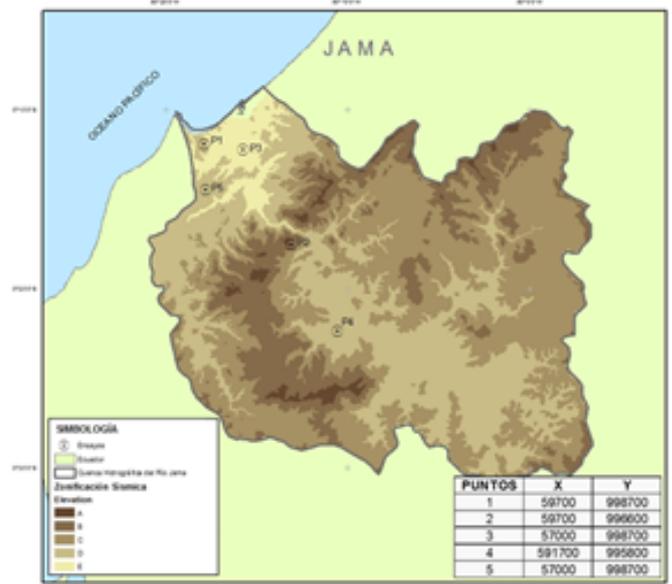


Figura 8. Mapa de pendientes
Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

Se realiza el ploteo de las referencias geofísicas que se utilizaron para el atributo geotécnica del área de estudio en términos de velocidad de propagación de la onda de cortante Vs 30.

Una vez analizado los ensayos geofísicos recopilados se realiza un mapa de zonificación utilizando el software ArcGis donde son ploteados los perfiles de respuesta sísmica de la NEC-2015.

Se realizó la zonificación Grado 1 recopilando e interpretando la información disponible y mapas temáticos.

Se caracterizó los suelos y rocas realizando una zonificación Grado 2 que consistió en la recopilación de datos de campo, se definió las zonas de similar respuesta sísmica comparando los diferentes ensayos geofísicos y mecánicos. Utilizando la velocidad de onda superficial Vs se obtuvo el tipo de perfil del suelo que se encuentran en la NEC-2015.

Se determinó el comportamiento de los suelos frente a movimientos sísmicos y de esta manera definir una reglamentación local para el diseño y construcción sismo-resistente de edificaciones y obras de infraestructuras vitales.

Se identificó y planteó diferentes mapas temáticos con los aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos del área de estudio, el cual determinó los tipos y parámetros de los suelos de la cuenca utilizadas para determinar los perfiles de respuesta sísmica del suelo según los lineamientos de la norma NEC-15. Presentada en la tabla 1.

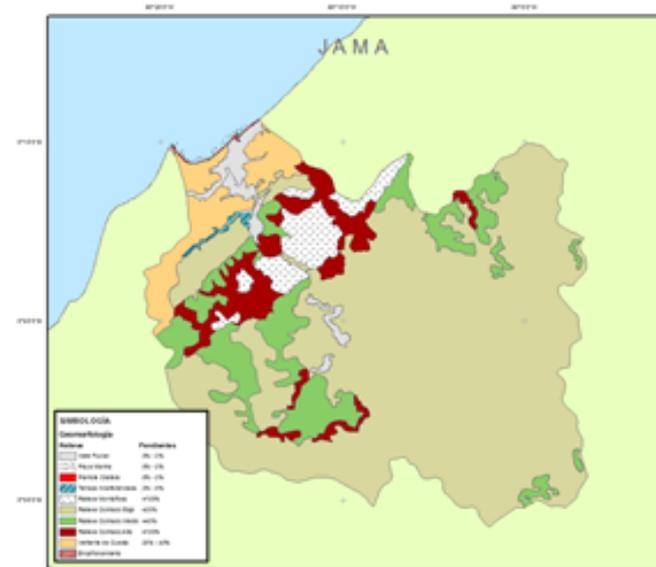


Figura 7. Mapa de pendientes
Fuente: Elaboración propia

procede a la ubicación de 5 ensayos geofísicos distribuidos en la Cuenca del Río Jama. Con la finalidad de poder realizar la caracterización de los ensayos geofísicos se consideraron los ensayos geofísicos del GAD provincial de Jama, los mismos que se ubican en todas las formaciones geológicas representativas en el área de estudio.

Mediante el uso de la plataforma ArcGis y con las herramientas de ploteo de puntos se procede a ubicar geográficamente los 5 ensayos geofísicos y mecánicos recopilados de la zona de estudios, podemos caracterizar los suelos y rocas de la cuenca hidrográfica del Río Jama para así obtener una

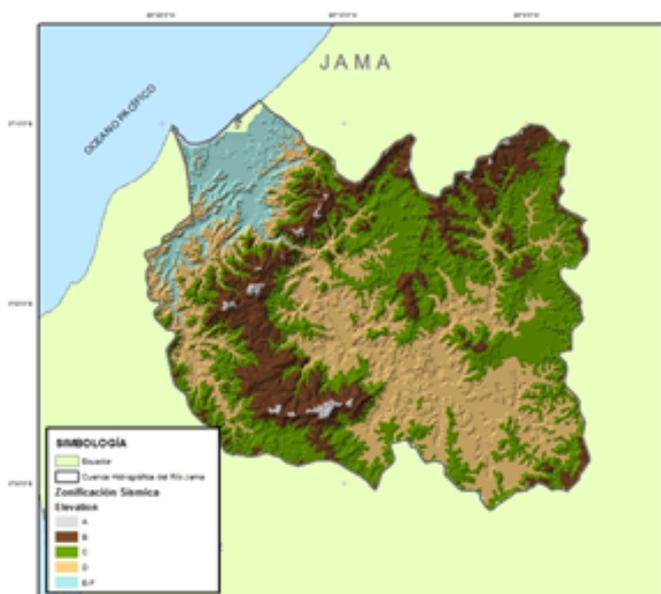


Figura 9. Zonificación de los perfiles de Respuesta Sísmica del suelo en la Cuenca Hidrográfica del Río Jama.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Tabla de sectores con clasificación de perfiles del suelo

Tipo de perfil	Sector
A	Falla Cañaverál
B	San Benito, San Miguel
C	San Isidro, Muele, José Loor La Máncora, Manta, Blanca, Covento, Coque
E	Jama, El Matal

Fuente: Elaboración propia.

Con el mapa de la Cuenca Hidrográfica del río Jama (figura 4) se pudo determinar el Factor de Forma, considerando la relación entre el área de la cuenca y la longitud del cauce principal de la misma como se demuestra en la siguiente fórmula:

$$F = A/Lc^2 = (1396Km^2)/(59Km) = 0,40 \quad (1)$$

Considerando el Mapa del Esquema Estructural de la Cuenca de Manabí (Figura 10), se puede interpretar que el sector de afloramiento de rocas de la formación Piñón que se encuentra en el mapa de geología (figura 5) está limitado por la falla Jama que origina un control geológico en el patrón de drenaje de la cuenca. En el mapa geomorfológico (figura 7) se observa que el límite de las geoformas denominadas relieve montañoso y relieve colinado alto se encuentra asociado a la falla Jama.

En la provincia de Manabí, donde, debido al crecimiento de la población se construyen viviendas sin asesoramiento técnico y sin la adecuada seguridad sísmica, los estudios de microzonificación sísmica desempeñan un papel de gran importancia para la seguridad de la población. Estos estudios permiten determinar el comportamiento de las diferentes zonas y así tomar las precauciones necesarias, e incluso establecer prohibiciones de cierto tipo de edificaciones. Incorporar los



Figura 10. Esquema estructural de la Cuenca Manabí

Fuente: Deniaud (1998).

Temas de Gestión de Riesgo dentro de la Planificación y Gestión de su territorio.

CONCLUSIONES

El mapa de zonificación de la cuenca del Río Jama permite determinar las zonas de más alta peligrosidad sísmica, el cual podrá ser utilizado para el diseño de estructuras sismo-resistentes. Esta metodología permite conocer con anticipación las probables áreas que se encuentran expuestas a mayor amenaza sísmica y el conocimiento de la exposición actual de zonas en peligro.

Este estudio es importante y estratégico e inédito al ser aplicado a nivel de cuencas hidrográficas, donde sus resultados ayudarán a la planeación futura de las construcciones de edificaciones en el cantón Jama. Además, se puede utilizar en la planificación de ordenamiento territorial, generando beneficio y sostenibilidad de las inversiones en los sectores públicos y privados.

Se representó la zona de estudio utilizando el software de sistemas de información geográfico ArcGis para generación de cartografía temática para analizar e identificar las zonas de más alta peligrosidad sísmica y saber dónde se encuentran las áreas más seguras para desarrollo urbano.

Es importante contar con cartografía temática que generen mapas de zonificación sísmica para identificar las condiciones de peligro sísmico de una localidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente artículo desean expresar sus sinceros agradecimientos a las personas e instituciones quienes mediante la Facultad de Ciencias Matemáticas y Física fueron los benefactores de los datos fuentes objeto de análisis de la investigación; así como a la Facultad de Ciencias Matemáticas y Física de la Universidad de Guayaquil quién permitió realizar el presente proyecto de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baldock, J. (1982). *Geología del Ecuador: Boletín de la explicación del Mapa Geológico de la República del Ecuador, Escala 1: 1,000.000*. IGM.
- INEC, I. (2010). Resultados del censo 2010 de población y vivienda en el Ecuador.
- Michaud, F., Collot, J.-Y., Alvarado, A., and López, E. (2006). *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador (Primera Edición)*. Quito, Ecuador: INOCAR.
- NEC (2013). *Peligro sísmico y requisitos de diseño sismo resistente*. Quito, Ecuador.
- of ISSMGE, T. (1993). *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards*. Japanese Society of soil mechanics and Foundation engineering.
- SNI (2013). Memoria técnica del cantón jama proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1:25.000 clima e hidrología.
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., and Mora, H. P. (2002). Wide plate margin deformation, southern central america and northwestern south america, casa gps observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2):157–171.