

**Estudio de Amenaza Sísmica**  
**Puente sobre el Río Tárcoles**  
**Setiembre, 2020**



Preparado para:  
**Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI)**

Camacho Y Mora S.A.

**INF-PC-19-13-345**



# Índice

---

1.1	Antecedentes.....	1-1
1.2	Alcance.....	1-1
2.1	Marco Geológico .....	2-10
2.1.1	Geología Regional .....	2-10
2.1.2	Geología Local .....	2-13
2.2	Marco Tectónico .....	2-15
2.2.1	Tectónica y Fallamiento Regional .....	2-15
2.2.2	Tectónica y Fallamiento Local.....	2-17
2.2.3	Sismicidad de la Zona.....	2-19
2.3	Amenaza Sísmica .....	2-24
2.4	Recurrencia y actividad de las fuentes sísmicas .....	2-25
2.5	Relaciones de atenuación.....	2-27
2.6	Estudios de Amenaza Sísmica en Costa Rica.....	2-31

## Índice de Cuadros

---

Cuadro 2-1. Resumen de sismos en Costa Rica.....	2-3
Cuadro 2-2. Sismos de magnitud mayor a 5 ocurridos desde 1964 en el Pacífico Central de Costa Rica .....	2-19

## Índice de Figuras

---

Figura 1-1. Ubicación del Puente sobre el Río Tárcoles. ....	1-1
Figura 2-1. Placas y estructuras tectónicas principales en América Central. ....	2-2
Figura 2-2. Mapa geológico de Costa Rica.....	2-11
Figura 2-3. Leyenda y simbología del mapa geológico de Costa Rica.....	2-11
Figura 2-4. Ubicación del cantón de Garabito, Puntarenas.....	2-12
Figura 2-5. Geomorfología del sector río Barranca-río Tarcoles.....	2-13
Figura 2-6. Mapa metalogenetico de la zona de interés.....	2-15
Figura 2-7. Batimetría del fondo oceánico del lado pacífico de Costa Rica y modelo de elevación digital del país.....	2-17
Figura 2-8. Fallas activas con potencial de generar sismos de magnitud $M_w \geq 6,5$ .....	2-18
Figura 2-9. Sismos de magnitud mayor a 5 ocurridos desde 1964 en el Pacífico Central de Costa Rica.....	2-21
Figura 2-10. Sismo de Papagayo, 1916.....	2-22
Figura 2-11. Sismo de Nicoya, 1950.....	2-23
Figura 2-12. Sismo de Sámara, 2012.....	2-23
Figura 2-13. Sismo de Tilarán, 1973.....	2-24
Figura 2-14. Relación de Atenuación de Dahle et al., 1995.....	2-28
Figura 2-15. Relación de Atenuación de Boore y Atkinson, 2008.....	2-28
Figura 2-16. Relación de Atenuación de Abrahamson y Silva, 2008.....	2-29
Figura 2-17. Relación de Atenuación de Campbells y Bozognia, 2008.....	2-29
Figura 2-18. Relación de Atenuación de Zhao et al., 2005.....	2-30
Figura 2-19. Relación de Atenuación de Youngs et al., 1997.....	2-30
Figura 2-20. Relación de Atkinson y Boore, 2003.....	2-31
Figura 3-1. Probabilidad de excedencia anual de la aceleración pico y pseudoaceleración para distintos periodos.....	3-1
Figura 3-2. Espectro de Amenaza Uniforme para diferentes periodos de retorno.....	3-2
Figura 3-3. Comparación entre estudio de amenaza vs Lineamientos.....	3-5



# 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes

El Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) contrató a la empresa Camacho y Mora S.A. para llevar a cabo el diagnóstico de la condición actual, diseño y especificaciones de posibles intervenciones y propuesta de mejoras del puente sobre el río Tárcoles en la Ruta Nacional N°34. Para este fin es necesario el desarrollo de diferentes estudios, entre los cuales se incluye el estudio de amenaza sísmica, desarrollado en el presente informe.

El puente sobre el Río Tárcoles se ubica sobre la Ruta Nacional N°34 en el kilómetro 11.3, ubicado en el distrito de Tárcoles, del Cantón de Garabito en la Provincia de Puntarenas, en las coordenadas 9°47'59.65"N de latitud y 84°36'19.69"O de longitud.

La Figura 1-1 muestra la ubicación geográfica del puente en la hoja cartográfica Tárcoles 1:50 000.



**Figura 1-1. Ubicación del Puente sobre el Río Tárcoles.**

Fuente: IGN, 2019.

Modificado por: Camacho y Mora S.A.

## 1.2 Alcance

El presente informe corresponde a la sección del Estudio de amenaza Sísmica del informe de avance del proyecto "Diseño de la rehabilitación del puente sobre el río Tárcoles, Ruta Nacional No. 34".

Dentro del contenido del informe se incluyen los valores de aceleración pico para los suelos predominantes con sus respectivas probabilidades de excedencia, para distintos lapsos de tiempo y períodos de retorno, así como los espectros de pseudoaceleración para diseño de la respuesta dinámica de los períodos en cuestión.

Para la elaboración del informe se utilizó un enfoque probabilístico para la evaluación de la amenaza sísmica con el fin de obtener una representación de cómo serían los movimientos sísmicos a futuro en este sitio y con esto lograr una correlación entre la aceleración pico y su probabilidad anual de excedencia.

Adicionalmente, se hace un pequeño repaso del marco sismotéctónico de la región, explicando las principales fuentes sísmicas que afectan a Costa Rica.



## 2. Marco teórico

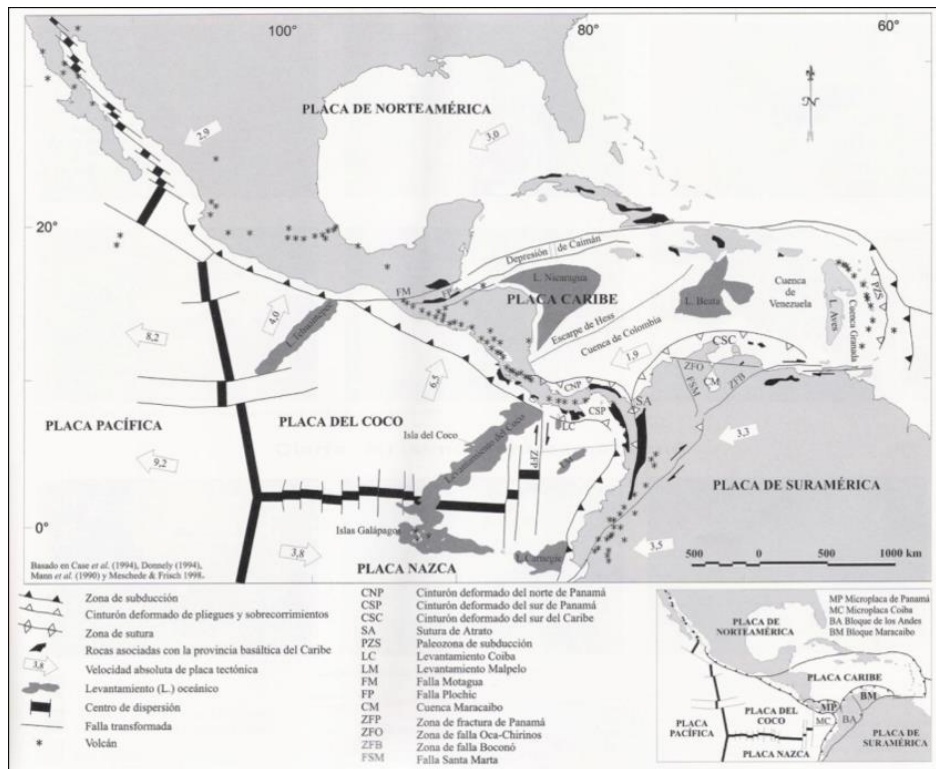
---

La región de Centroamérica, producto de su conformación sismo tectónica y proximidad a límites convergentes de placas, se caracteriza por poseer una alta sismicidad. Por este motivo se han presentado varios sismos destructivos a lo largo de su historia, por ejemplo, en 1972 en Managua, 1976 en Guatemala, 1991 en la Región Caribe de Costa Rica y Panamá, 1992 Costas de Nicaragua o 2001 en El Salvador.

La mayor parte de los sismos en América Central ocurren principalmente a lo largo de la zona de subducción y el arco volcánico. Otras zonas con actividad sísmica corresponden a los sistemas de fallas presentes en la región. Sin embargo, el potencial de daños de los sismos de la cadena volcánica es mayor que los de la zona de subducción por su foco somero y proximidad a centros poblados importantes.

Se han realizado pocos estudios de amenaza sísmica en Centroamérica hasta la fecha. Los estudios que se han realizado en Centroamérica y que han arrojado estimaciones de amenaza sísmica para los países y varias capitales de la región, han utilizado el programa NZ FRISK (Dahle, 1994) que utiliza la metodología planteada por Cornell (1968), e incorpora el algoritmo del árbol lógico para considerar las incertidumbres en los parámetros del modelo.

Los países de América Central están ubicados dentro de los límites de las placas del Caribe, Norteamérica, Cocos y Nazca. Para Costa Rica la zona más relevante corresponde al contacto de las placas Cocos y Caribe, el cual es de convergencia o subducción. Las placas de Nazca y Caribe están limitadas por el Cinturón Deformado del Sur de Panamá (CDSP). Las fallas de rumbo de Polochic-Motagua-Chamelecón (ZFPMCH), Zona de Fractura de Panama (ZFP), y la Zona de Sutura del Atrato (ZSA) forman respectivamente los límites de placas Norteamérica-Caribe, Cocos-Nazca y Caribe-Sudamérica. (Ver Figura 2-1).



**Figura 2-1. Placas y estructuras tectónicas principales en América Central.**

Fuente: Quesada, 2016.

En el caso de las estructuras intraplaca, las de interés corresponden al Escarpe de Hess, a la Depresión de Nicaragua y a la Zona de Falla del Sur de Panamá. Recientemente se considera que la mitad sur de Costa Rica, Panamá y el Noroccidente de Colombia, forman parte de una microplaca a la cual se ha denominado microplaca de Panamá.

En esta región, los movimientos relativos de las placas, que varían de 2 a 9 cm/año, están acompañados por vulcanismo activo y alta sismicidad superficial e intermedia. Durante los últimos 500 años se han registrado numerosos sismos con magnitudes moderadas y grandes ( $5.5 \geq M \geq 8.0$ ), los cuales están asociados a fuentes interplaca e intraplaca.

Los principales elementos estructurales y sismotectónicos de la región de América Central corresponden a:

- La zona de subducción (Fosa Mesoamericana)
- Arco Volcánico
- Límite de placas norteamérica-caribe
- Fallas y deformación interna de la placa caribe (Norte)
  - La depresión de Honduras
  - Sistema de Falla Guayape

- Depresión de Nicaragua
- Escarpe de Hess
- Zona de Fractura de Panamá
- Cinturón deformado del sur de Panamá
- Zona de sutura Atrato-Murindo
- Cinturón deformado del norte de Panamá
- Fallas y deformación interna de la placa Caribe (Sur)
  - Zona de deformación interna del bloque de Panamá
  - Zona de Talamanca
  - Extremo de la fosa del Pacífico colombiano

Para el caso particular de Costa Rica, adicional a la actividad entre placas, se debe sumar la sismicidad por fallamiento local y los sismos de origen volcánico, siendo estos últimos generalmente de intensidades menores.

Esta condición sismológica ha incentivado que se realicen diversos estudios en la región con el fin de caracterizar el marco sismotectónico del territorio. Un ejemplo de esto es el desarrollado dentro del proyecto RESIS II financiado por el Gobierno de Noruega bajo la gestión del Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central y República Dominicana (CEPRENAC), en el cual, como parte de los objetivos del trabajo, se hace una caracterización de los sismos mayores ocurridos en Costa Rica desde 1772.

A continuación, se presenta una tabla con el resumen de los mismos y se completa la información con datos de la Red Sismológica Nacional para actualizar el registro hasta marzo del 2018.

**Cuadro 2-1. Resumen de sismos en Costa Rica.**

ORIGEN	FECHA	IMM	Mw	DESCRIPCIÓN
Subducción	27 de Febrero de 1916	IX	7.3	Terremoto de Papagayo, con epicentro en el Golfo de Papagayo. Causó mucho daño en la zona de Santa Cruz, Guanacaste y en la costa noroeste de la Península de Nicoya. En Santa Cruz se cayeron las torres de la iglesia, y en el Coco se produjeron algunas grietas en el terreno (Tristán, 1916).
Subducción	21 de Diciembre de 1939	VIII	7.3	Éste fue el terremoto intraplaca de mayor tamaño registrado en el siglo XX, que fue sentido con intensidad máxima IMM VIII en la zona suroeste de San José y Los Santos. Produjo dos muertes y muchas edificaciones dañadas y casas destruidas (Rojas, 2004). El epicentro estuvo ubicado en la zona de Puriscal, a unos 60 Km de profundidad.
Subducción	5 de Diciembre de 1941	IX	7.4	Terremoto de Golfito, con epicentro en el Golfo Dulce. Fue sentido en todo el país y causó mucho daño a la zona sur, especialmente en Golfito donde se reportó la ocurrencia de licuefacción. Boschini (1989) señala la muerte de dos personas en Palmar Norte y una en Palmar Sur. Ambraseys y Adams (1996) indican cuatro decesos, más en Golfito. Este evento en Puerto Cortés y alrededores derribó árboles, casas, objetos de establecimientos comerciales y armarios; destruyó la escuela e inhabilitó la iglesia y el atracadero. Hubo licuefacción y daños en el andarivel del transporte de banano y en las líneas del ferrocarril (Arroyo 2001)
Subducción	5 de Octubre de 1950	VIII	7.8	Es conocido como el terremoto de Nicoya, y el sismo de mayor tamaño del margen convergente durante el siglo XX, el cual alcanzó una intensidad VIII en la provincia de Guanacaste y tiene una magnitud de Mw 7,8 estimada a partir del grado de intensidad. Provocó daños en muchas edificaciones, así como gran cantidad de deslizamientos y también causó varios heridos (Montero 1984).
Subducción	9 de Setiembre de 1952	VIII	7	Es conocido como el terremoto de Quepos, asociado al proceso de subducción y localizado en la zona pacífica central del país, al sur de Quepos. Causó daños importantes en los poblados de la costa pacífica central, así como otros del Valle Central como Grecia, Palmares y Atenas (Montero y Climent, 1990).

ORIGEN	FECHA	IMM	Mw	DESCRIPCIÓN
Subducción	3 de Abril de 1983	VIII	7.3	Es conocido como el terremoto del Sábado Santo o de Golfito. Su epicentro se localizó en el Golfo Dulce y fue clasificado como de tipo interfase por subducción de la Placa del Coco bajo la Microplaca de Panamá. Se sintió en todo el país, generó intensidades IMM de VII y VIII en Golfito y alrededores y causó graves daños en la zona sur del país, donde se presentaron colapsos totales y parciales de algunas construcciones. En éstas, por lo general, no se habían respetado las mínimas normas de seguridad o bien se asentaban sobre rellenos insuficientemente compactados. En la región cercana al epicentro causó gran cantidad de deslizamientos y licuefacción y se reportaron cerca de 300 heridos en la zona sur, el Pacífico Central y el Valle Central (Montero y Mora, 1985).
Subducción	25 de Marzo de 1990	VIII	7.1	El terremoto del Golfo de Nicoya o de Cóbano fue una parte de una serie sísmica caracterizada por la ocurrencia de dos eventos gemelos asociados a una misma ruptura en la parte superior de la zona de subducción y localizados en la entrada del Golfo de Nicoya. Se registraron daños importantes en Cóbano, Puntarenas Centro y Mata de Limón, dos personas murieron y hubo varios heridos. En las zonas costeras cercanas al epicentro se presentó el fenómeno de licuefacción y un pequeño tsunami en Tambor y Montezuma (Barquero y Boschini, 1991)
Subducción	20 de Agosto de 1999	VIII	6.9	Es conocido como el terremoto de Dominical. Tuvo origen en la zona de subducción, al sur de la costa de Dominical. Se reportaron deslizamientos en Dominical y Tinamaste y el sismo se sintió en todo el país. Fue sentido por el personal de un barco que se encontraba en la zona oeste de la isla del Caño (Rojas y Redondo, 2002; Bilek y Lithgow-Bertelloni, 2005)
Fallamiento transcurrente entre las placas del Coco y Nazca	25 de Diciembre de 2003	VIII	6.5	Fue el último terremoto asociado a esta fuente sísmica y ocurrió en el Puerto Armuelles con Mw 6,5. Dejó importantes daños, efectos secundarios como asentamientos diferenciales y licuefacción, así como varios heridos y el colapso de algunas construcciones en mal estado (Barquero, 2004).

ORIGEN	FECHA	IMM	Mw	DESCRIPCIÓN
Fallamiento local (cortical)	15 de Febrero de 1772	VIII	6	En el siglo XVI se reportó en esta fecha el primer terremoto superficial en Costa Rica asociado a un fallamiento local, con una magnitud estimada de Mw 6,0 (Peralto y Montero, 1994), conocido como el terremoto de Barva de Heredia. Este evento documentado en los archivos de la Curia Metropolitana, ya que causó el colapso del convento y la iglesia de Barva. Además, hubo varias casas dañadas y personas heridas y posiblemente esté relacionado con el Sistema de Falla de Alajuela (Peralto y Montero, 1999).
Fallamiento local (cortical)	7 de Mayo de 1882	IX	7.6	En el siglo XIX se recuerda este evento, conocido como terremoto de San Estanislao. Provocó deformaciones permanentes a lo largo de la costa atlántica de Costa Rica, Nicaragua y Panamá. Se reporta en Matina que ningún vecino había sentido un sismo más fuerte que éste y que se produjeron grietas profundas, licuefacción e inundaciones por tsunamis. Se registró destrucción en los alrededores de Cartago y hubo muertos y heridos. Se cree que está relacionado con la fuente sísmica del sector oeste del Cinturón Deformado del Norte de Panamá y Costa Rica (Rojas, 1993).
Fallamiento local (cortical)	2 de Septiembre de 1841	IX	6.4	Fue el terremoto que produjo mayor cantidad de muertes y pérdidas en el siglo XIX, ya que causó una enorme destrucción entre Cartago y San José. Fallecieron 36 personas y hubo muchos heridos. Este sismo, conocido como terremoto de Cartago, sirvió de base para que se desarrollaran las primeras normas constructivas de Costa Rica, pues el presidente en ese momento Lic. Braulio Carrillo, decretó fortalecer las construcciones y aumentar el ancho de las calles para reducir el riesgo. El origen de este sismo puede estar relacionado con el sistema de la Falla Lara, al norte de Cartago (Peraldo y Montero, 1999)
Fallamiento local (cortical)	24 de Agosto de 1853	VIII	6	Conocido como temblor de Cañas, este evento afectó a la población de Cañas en el noroeste de Costa Rica. Se menciona que los estragos en la Villa de Cañas fueron de bastante consideración, destechándose enteramente todas las casas, cayendo algunas y quedando desplomadas las demás. También se presenciaron la destrucción de gran parte de la montaña, grandes oquedades en la tierra y aperturas de grietas (Peraldo y Montero, 1999).

ORIGEN	FECHA	IMM	Mw	DESCRIPCIÓN
Fallamiento local (cortical)	30 de Diciembre de 1888	VIII	6	Fue uno de los terremotos del siglo XIX más recordados en el Valle Central del país, conocido como el terremoto de Fraijanes. Registró una intensidad IMM VIII en la zona norte de Alajuela y causó muchos daños en las construcciones del Valle Central. Además, hubo varios heridos y una víctima mortal, y fue acompañado de un importante deslizamiento que dio origen a la actual laguna de Fraijanes. El epicentro se asocia al Sistema de Falla de Alajuela (Alvarado et al., 1998).
Fallamiento local (cortical)	5 de Mayo de 1910	VIII	6.4	Uno de los terremotos más recordados a inicio del siglo XX fue el destruyó la ciudad de Cartago, conocido como el terremoto de Santa Mónica. Fue desastroso, provocó la destrucción del 90 % de la infraestructura de la ciudad de Cartago y se registraron 800 víctimas, entre muertos y desaparecidos, y unos 5000 heridos. Fue sentido en todo el país y también generó daños en otras ciudades del Valle Central. Se originó en la Falla Agua Caliente que pasa junto al sur de Cartago (Montero, 1983)
Fallamiento local (cortical)	29 de Agosto de 1911	IX	6.2	En este sismo se reportó caídas de casas y formación de múltiples grietas y grandes deslizamientos en Toro Amarillo y alrededores. Varias casas resultaron dañadas en Sarapiquí, Naranjo, Grecia y San Ramón. Alvarado et al (1988) localizan el epicentro en el área de Toro Amarillo, donde obtuvo una densidad máxima IMM de IX.
Fallamiento local (cortical)	10 de Octubre de 1911	VIII	6.5	Conocido como el terremoto de Guatuso, en la zona epicentral, produjo según los reportes, árboles arrancados de raíz, derrumbes en el camino y muchas grietas. En las hornillas del Miravalles, se registró una sacudida muy fuerte en dirección NE-SW (Tristán, 1912).
Fallamiento local (cortical)	4 de Marzo de 1924	X	7	En el siglo XX, éste fue uno de los terremotos más destructivos ocurridos en Costa Rica. Alcanzó intensidades máximas de IMM IX grados en el occidente del Valle Central, provocó mucho daño en la infraestructura, cambios en el relieve, gran cantidad de deslizamientos y varios heridos. Se generaron muchas réplicas, que se mantuvieron por más de dos meses y algunas de ellas de moderada magnitud, que contribuyeron al incremento de daños y al pánico de la población de aquel entonces. Este evento se ha asociado con la Falla Tárcoles (Montero, 1999)
Fallamiento local (cortical)	30 de Diciembre de 1952	VIII	6.2	Conocido como terremoto de Patillos, fue originado por una falla local, muy superficial, con epicentro en el flanco noroeste del Macizo del Volcán Irazú. Causó múltiples deslizamientos, dejando un saldo de 23 fallecidos (Montero, 1983)

ORIGEN	FECHA	IMM	Mw	DESCRIPCIÓN
Fallamiento local (cortical)	1 de Septiembre de 1955	VIII	6.1	Terremoto de los Bajos del Toro. Hay reporte de destrucción de casas en Río Segundo. La ermita de Toro Amarillo colapsó junto con otras edificaciones en alrededores. Se reportaron daños de consideración en San Juanillo y Grecia y en los comercios de Naranjo. Fue sentido en Ciudad Quesada, Zarcero, Río Cuarto y San José. (Alvarado et al., 1988).
Fallamiento local (cortical)	14 de Abril de 1973	IX	6.5	Fue un terremoto importante de fallamiento superficial en la cadena volcánica de Costa Rica, que causó importantes daños en la zona de Tilarán: más de 500 viviendas afectadas, 84 totalmente destruidas, 1537 personas evacuadas y provocó la muerte de 23 personas. Fue originado en la Falla Chiripa, con movimiento predominante de desplazamiento horizontal derecho (Montero, 1984).
Fallamiento local (cortical)	3 de Julio de 1983	VIII	6.2	Conocido como terremoto de Buena Vista. Este evento causó daños en pequeñas edificaciones, caminos y en la carretera Interamericana, así como deslizamientos y la pérdida de una vida humana, afectando un área de unos 400 km <sup>2</sup> . Este evento fue atribuido a la Falla Buena Vista con rumbo N12°, de tipo dextral con componente vertical y una longitud mínima de 30 km (Boschini et al., 1988).
Fallamiento local (cortical)	22 de Diciembre de 1990	VIII	6	Éste fue el terremoto de Piedras Negras, asociados también al fallamiento local. Tanto ese sismo como dos anteriores dejaron muchos daños en la infraestructura y en el ambiente, e importantes pérdidas económicas, además de varias personas fallecidas y decenas de heridos (Barquero y Boschini, 1991).
Fallamiento local (cortical)	22 de Abril de 1991	X	7.7	Fue otro sismo importante ocurrido en esta región, conocido como el terremoto de Limón, sumamente destructivo, que provocó grandes pérdidas, pues dejó 585 heridos y 102 muertes entre Costa Rica y Panamá. Generó intensidades máximas de X en la zona mesosísmica y provocó un levantamiento vertical de 0,5 y 1,5 m, a lo largo del sector Caribe, desde Puerto Limón hasta una zona próxima a la frontera de Panamá. La ruptura se inició a una profundidad cercana a 20 km y se propagó hacia arriba, alcanzando el piso oceánico y generando un tsunami pequeño. La zona donde se localizaron las réplicas indica una falla que tuvo una longitud de 85 km por unos 45 km de ancho, medidos a lo largo de la inclinación de la falla, que pertenece al sector oeste de la zona sísmica del Cinturón Deformado del Norte de Panamá-Costa Rica (Ponce et al., 1994).



ORIGEN	FECHA	IMM	Mw	DESCRIPCIÓN
Fallamiento local (cortical)	10 de Julio de 1993	VIII	6	Terremoto de Pejibaye. Su epicentro coincide prácticamente con las trazas de las Fallas Atirro-Tucurique y Turrialba. Este evento dejó daños en Pejibaye, El Humo, Tuís y Turrialba y en la zona mesosísmica se generaron deslizamientos (Barquero y Peraldo, 1993).
Fallamiento local (cortical)	20 de Noviembre de 2004	VIII	6.4	Este sismo tuvo lugar en Damas y fue asociado a un fallamiento de tipo normal profundo, con inicio de ruptura a 25 km de profundidad. Provocó licuefacción como uno de sus principales efectos secundarios. En la zona de Parrita, Quepos y en poblaciones de la zona de León Cortés, hubo caída de objetos y daños importantes en estructuras con bajo nivel de ingeniería. En San José también se sintió con fuerza y se reportó la caída de objetos y ventanas quebradas (Barquero, 2009).
Fallamiento local (cortical)	8 de Enero de 2009	IX	6.2	Este sismo, ocurrió recientemente en Cinchona, fue el último terremoto de cadena volcánica, que provocó la muerte de 25 personas y 15 desaparecidos, cerca de 300 heridos y gran destrucción de infraestructura y carreteras en la zona de Vara Blanca, Poasito y Cinchona, además de provocar prácticamente la desaparición de este último poblado, que será reubicado en otro sector de la región (Barquero, 2009).
Subducción	5 de setiembre del 2012	VII	7.6	"La mayor parte de los daños reportados fueron en la zona de la Península de Nicoya, específicamente en Nicoya, Santa Cruz, Nandayure y Sámará. En la provincia de Puntarenas se reportaron daños en algunas construcciones, que incluyen el hospital y la Municipalidad de Puntarenas. En los cantones de Grecia, Naranjo y Valverde Vega se presentaron daños importantes en viviendas y algunos edificios. En el Valle Central, aunque el sismo provocó alarma general en la población, sólo se reportaron algunos vidrios quebrados, caída de objetos y láminas de cielorraso en edificios. (Red Sismológica Nacional, 2018)
Fallamiento local (cortical)	2 de julio del 2016	VI	5.4	Enjambre sísmico con epicentro 6 km al norte de Bijagua de Upala. Las magnitudes van desde 2.6 a 5.4 con profundidades menores a 18 km. Reportado sentido en Upala, La Fortuna, Tilaran, Bagaces, Liberia, San Carlos, Esparza, y en las provincias de Heredia y Alajuela. También fue reportado sentido en Nicaragua. Se reporta caída de objetos en Bijagua de Upala. (Red Sismológica Nacional, 2018)

ORIGEN	FECHA	IMM	Mw	DESCRIPCIÓN
Fallamiento local (cortical)	30 de noviembre del 2016	VI	5.5	Este sismo de magnitud 5,5 Mw se originó en la parte intermedia entre los macizos volcánicos del Irazú y Turrialba. Ha sido el sismo de mayor magnitud en este sector oriental de la Cordillera Volcánica Central desde el Terremoto de Patillos de 1952 (Mw 6,0). La secuencia sísmica se prolongó hasta el día 6 de diciembre. El sismo fue sentido en una parte importante del territorio nacional, con una intensidad máxima de VI+ en Pacayas y Capellades. A pesar de la cercanía del punto del hipocentro con el volcán Turrialba, no ha habido consecuencias eruptivas inmediatas. (Red Sismológica Nacional, 2018)

Fuentes: Amenaza Sísmica en América Central, 2009

Sismos Históricos, Red Sismológica Nacional, [www.rsn.ac.cr/actividad-sismica](http://www.rsn.ac.cr/actividad-sismica)

## 2.1 Marco Geológico

### 2.1.1 Geología Regional

Las principales unidades geológicas que constituyen el territorio de Costa Rica se pueden observar en el mapa geológico de la Figura 2-2, las cuales oscilan en edad desde el período Jurásico hasta el Cuaternario y se pueden incluir, según Castillo (1993), dentro de los siguientes grupos, de acuerdo con la litología y edad, a saber:

- 1) Rocas volcánicas y sedimentarias del Mesozoico (Jurásico-Cretácico).
- 2) Rocas sedimentarias y volcánicas del Terciario.
- 3) Rocas plutónicas del Cretácico y Terciario.
- 4) Rocas sedimentarias y volcánicas del Cuaternario.

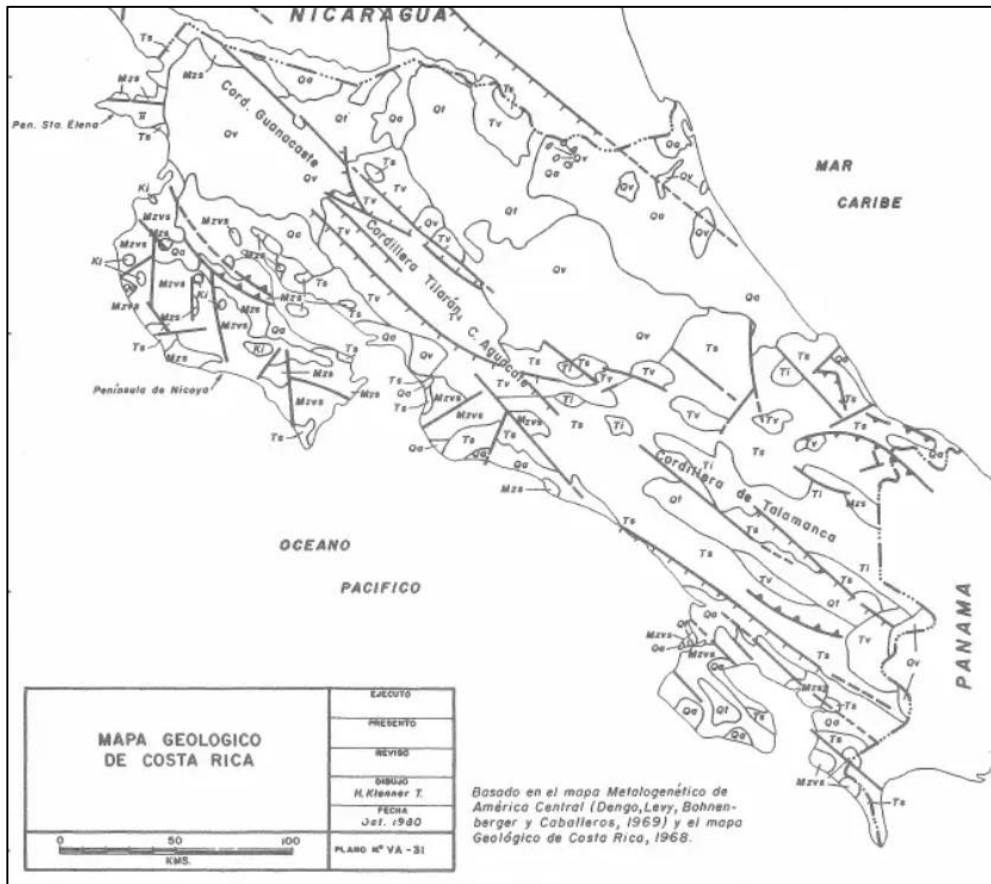


Figura 2-2. Mapa geológico de Costa Rica

Fuente: Castillo, 1993.

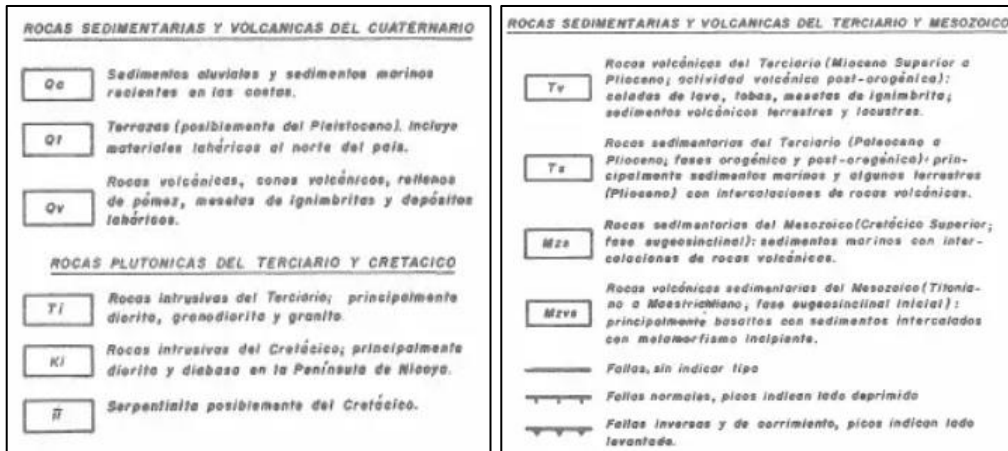
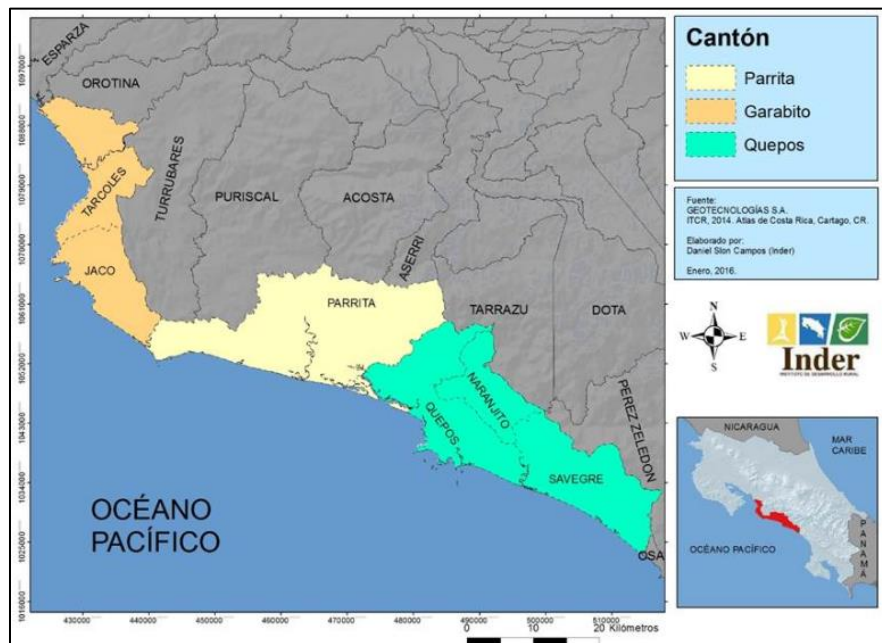


Figura 2-3. Leyenda y simbología del mapa geológico de Costa Rica

Fuente: Castillo, 1993.

Desde el punto de vista de la geología regional, el distrito de Tárcoles pertenece al territorio de Garabito-Parrita-Quepos, el mismo se puede ubicar en el mapa mostrado en la Figura 2-4. Según el estudio de caracterización de la zona, elaborado por el Instituto de Desarrollo Rural (INDER, 2016), este está constituido geológicamente por rocas de origen volcánico y sedimentario del período Cretácico, las cuales se agrupan bajo el nombre del Complejo de Nicoya, el cual está formado por rocas pelágicas carbonatadas de plataforma depositadas sobre basaltos.

También se presentan rocas de origen sedimentario del período Terciario, en el cual se incrementó en volcanismo explosivo y la sedimentación resultó de turbiditas volcanoclásticas carbonatadas, de las épocas Eoceno (a la cual corresponde la Formación Brito), Paleoceno, Mioceno y Plioceno Pleistoceno. Finalmente, se encuentran rocas de origen sedimentario, del período Cuaternario, de la época Holoceno que corresponden a depósitos fluviales, coluviales y costeros recientes, tales como pantanos.

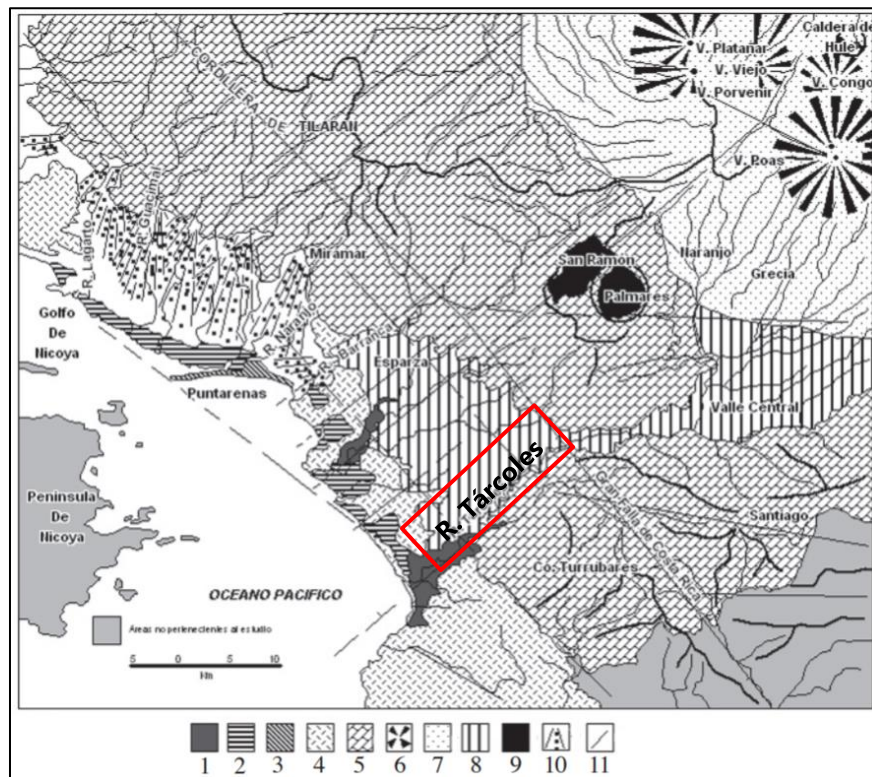


**Figura 2-4. Ubicación del cantón de Garabito, Puntarenas**

Fuente: INDER, 2016.

Un mapa geomorfológico de la zona extraído del documento *El Cuaternario en Costa Rica. Proposición cronológica* (Bergoeing, 2006) se aprecia en la Figura 2-5. Este presenta una leyenda con números y patrones, a continuación, se indica el significado de cada uno:

1-Aluviones recientes. 2-Manglar. 3-Cordones arenosos flandenses. 4-Áreas sedimentarias y en parte volcánicas (Cretácico-Terciario) 5- Áreas volcánicas Mioceno Plioceno (Aguacate). 6- Conos volcánicos cuaternarios (estratovolcanes) de la Cordillera Central. 7-Piedemontes volcánicos cuaternarios de la Cordillera Central. 8- Cañón del río Virilla-Tárcoles erosionado en la meseta volcánica Central y en el piedemonte ignimbrítico de Orotina. 9-Antiguas áreas.



**Figura 2-5. Geomorfología del sector río Barranca-río Tarcoles**

Fuente: Bergoeing, 2006.

De acuerdo con Bergoeing (2006), los niveles inferiores fluviales de 7 a 8 metros del río Tárcoles son depósitos debidos a las crisis de origen climática (deslaves post-glaciación) ocurridas durante el Cuaternario que se tradujeron en fases Resistásicas (más secas) y Biostásicas (más húmedas). Es durante las fases resistásicas que la erosión pluvial construyó el nivel terrazas fluviales observado en la zona (T1), que corresponde al Pleistoceno Superior. Los indicios de la presencia de una terraza fluvial T1 son que el material de los cantos rodados que conforma la terraza fluvial es poco alterado y que la deformación tectónica en el estrato es poca o nula.

### 2.1.2 Geología Local

La geología local de la cuenca Tárcoles presenta las siguientes formaciones sedimentarias:

- *Punta Carballo (Tmpc)*: está constituida por areniscas gris verdosas de grano fino principalmente, también de grano medio a grueso, por lentes de conglomerados y brechas. Se le asigna una edad Mioceno y un espesor de 700 m. Reposa discordantemente sobre el Complejo Nicoya y las unidades suprayacentes son las vulcanitas de las Formaciones Esparza o Tivives (Moreno & Espejo, 2004).
- *Cuaternalio aluvial (Qal)*: Se caracterizan por su morfología horizontal o sub-horizontal, formando llanuras, planos aluviales y valles por donde transcurre el río o ríos que los han depositado. Están constituidos por clastos, cantos, gravas y bloques de diferente material rocoso en matriz-limo arenosa o limo-arcillosa.

También pueden estar constituidos por flujos de lodo y lahares. Estos depósitos provienen de la erosión fluvial de las partes altas montañosas, algunas veces combinados con actividad volcánica. Su edad es Pleistoceno a Reciente. Sus espesores, por estimación directa de campo, podrían estar en el orden de más de 5 m hasta varias decenas de metros (Moreno & Espejo, 2004).

Respecto a la formación ígnea de la zona, se encuentra:

- *Formación Orotina (TpgO)*: Ignimbritas de color gris claro, con fragmentos pequeños de pómez y de lavas. Tienen una matriz limosa que se hace friable por meteorización. Presentan estructura columnar y tobas hacia el techo y base de la secuencia. La edad de esta unidad se considera del Pleistoceno y su espesor, alrededor de 140 m. Su geomorfología es de colinas erosionadas y disceptadas, semiplanas, de origen vulcano – aluvial (Moreno & Espejo, 2004).
- *Ignimbrita Surubres*: Corresponde con un flujo de piroclástico rico en biotita, compuesto de fragmentos de roca y fenocristales, escasas pómez amarillentas y fragmentos líticos angulosos, flotando en una matriz (70 %) gris de aspecto tobáceo, compuesta por vidrio, regular a bien soldada. El espesor observado es de unos 10 m – 15 m y los afloramientos se presentan en el borde del río Tárcoles. Este grupo se considera una unidad informal, por la poca información que se conoce sobre sus relaciones estratigráficas, sin embargo, se diferencia en el mapa geológico debido a sus características litológicas. (Denyer, Aguilar, & Alvarado, 2003)

En la siguiente figura se muestra un extracto del mapa metalogénico de Costa Rica; donde se ejemplifican la ubicación de los materiales descritos anteriormente (Sandoval, 1977). Las zonas achuradas con color rojo corresponden a depósitos de Hierro, mientras que el área café indica presencia de Manganeso y Aluminio. Las iniciales Tv indican presencia de rocas ígneas variadas del Terciario Superior, mientras que Ts2 señala rocas sedimentarias del Paleoceno a Plioceno como sedimentos marinos y terrestres, mientras cerca de la costa Qa (equivalente al Qal mencionado anteriormente) indica yacimientos de sedimentos aluviales y costeros recientes.

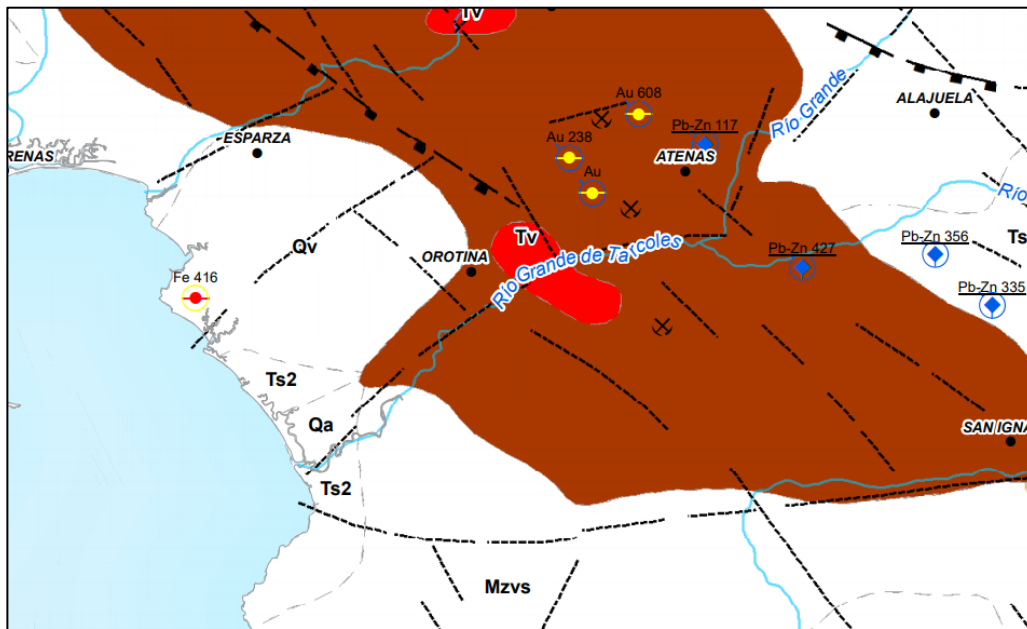


Figura 2-6. Mapa metalogénico de la zona de interés

Fuente: Sandoval, 1977

## 2.2 Marco Tectónico

### 2.2.1 Tectónica y Fallamiento Regional

La actividad sísmica en Costa Rica es causada por 2 fuentes principales: el proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe y el sistema de fallamiento local al interior del continente.

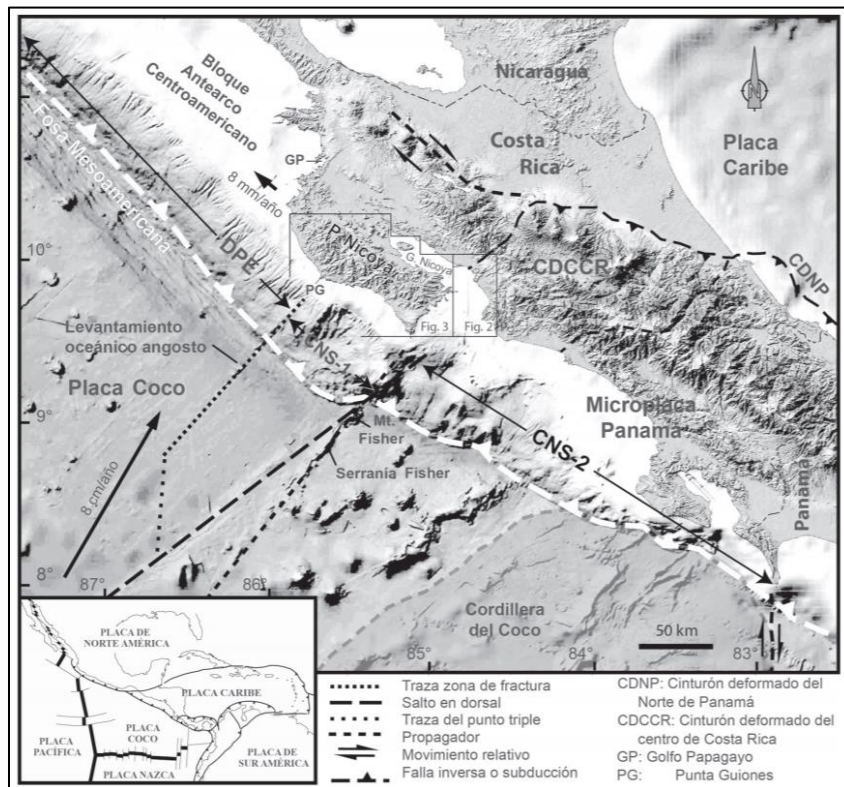
La subducción es uno de los procesos tectónicos más importantes en Costa Rica ya que se caracteriza por la liberación de grandes cantidades de energía en forma de terremotos (magnitudes de hasta 7,9 Mw), con intensidades máximas de grado VII o IX en la zona epicentral; debido a que estas liberaciones de energía suelen darse a grandes

profundidades, los sismos son sentidos en regiones amplias (Alvarado, Climent, Taylor & Vargas, 2014).

Los sismos producto de la subducción entre las placas Cocos y Caribe, tienen su origen (hipocentro) en la "Zona de Benioff", la cual se extiende en profundidad (un máximo de 200 km) desde la Fosa Mesoamericana hacia el interior del país (Climent, Salgado, Slob & van Westen, 2003).

Por otro lado, el proceso de subducción produce esfuerzos compresivos, los cuales a su vez generan sistemas de fallas regionales, predominantemente de tipo inverso y de rumbo a nivel de la corteza continental (Climent et al., 2003). Estos esfuerzos también producen fallas locales más pequeñas al interior del país con la capacidad de generar sismos de magnitudes intermedias ( $5,0 \leq ML \leq 6,5$ ) y focos superficiales ( $5 \leq Z \leq 20$  km) (Climent et al., 2003).

El puente sobre el río Tárcoles se encuentra en el pacífico central, que corresponde a la región más sísmicamente activa del país, ya que en esta zona ocurren sismos con magnitudes moderadas (entre 5,0 y 6,9 Mw) con frecuencias de 5 a 15 años (Protti & Vega, 2014).





**Figura 2-7. Batimetría del fondo oceánico del lado pacífico de Costa Rica y modelo de elevación digital del país.**

Fuente: Aguilar, Denyer y Montero, 2013

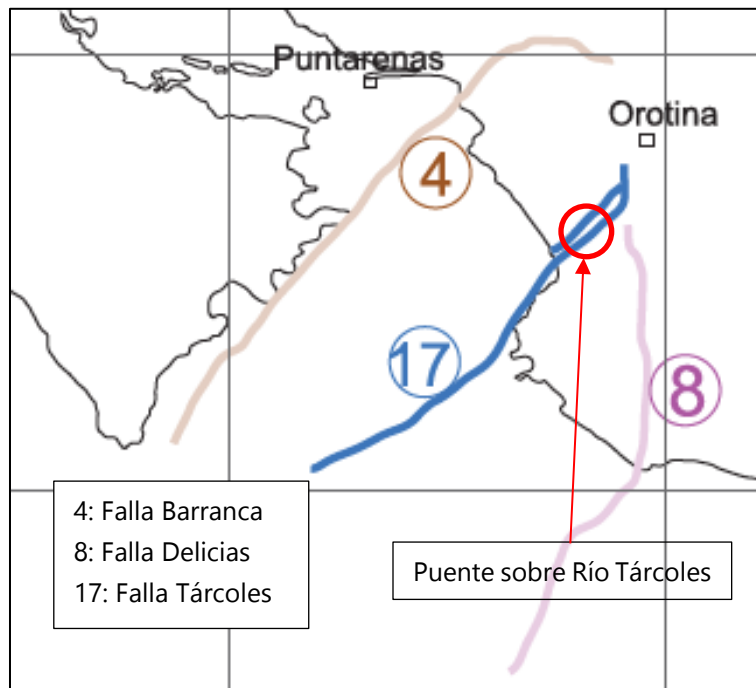
**2.2.2 Tectónica y Fallamiento Local**

En la zona se han presentado tres eventos tectónicos importantes en su formación; uno durante el periodo Santoniano-Campaniano hace alrededor de 85 millones de años que generó el primer levantamiento regional, uno en el Eoceno medio que produjo otro levantamiento de la región (hace más de 40 millones de años) y por último uno a finales del Mioceno, a partir del cual aumenta el vulcanismo en el área (Aguilar, Denyer y Montero, 2013).

Como se mencionó anteriormente, el proceso de subducción genera esfuerzos compresivos hacia el interior del país que resultan en la deformación y la aparición de fallas y fracturas corticales superficiales, las cuales se han caracterizado históricamente por generar temblores de magnitudes intermedias a profundidades menores de 20 km (Alvarado et al., 2014). A causa de la poca profundidad de estos eventos, suelen resultar en intensidades y aceleraciones altas que afectan en mayor magnitud a la infraestructura civil (Alvarado et al., 2014).

Cerca de la zona en donde se ubica el proyecto en estudio (Tárcoles), existen fallas locales que deben ser especialmente estudiadas en cuanto a su potencial sísmico. Seguidamente se presentan las fallas consideradas en el análisis y una descripción de cada una.

De forma general en la Figura 2-8, se observa que las fallas Barranca, Delicias y Tárcoles, se encuentran relativamente cerca del puente sobre el río Tárcoles.



**Figura 2-8. Fallas activas con potencial de generar sismos de magnitud  $M_w \geq 6,5$**

Fuente: Comité de Puentes de la Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica, 2013.

Modificado por: Camacho y Mora S.A., 2020.

#### 2.2.2.1 Falla Barranca

La falla Barranca se ubica mar adentro del golfo de Nicoya en la costa pacífica y luego se interna en el continente siguiendo un rumbo noreste paralelo al río Barranca, según Montero (1999). Además, esta tiene una longitud de 118 km con orientación promedio de N22°E (Montero et al., 1998).

En cuanto a eventos sísmicos asociados a la falla Barranca, Montero (1999) identifica una secuencia sísmica en junio de 1978 en la que el sismo principal presentó una magnitud de 4,5 (Mc), y los eventos tuvieron profundidades entre los 10 y 15 km. Por otro lado, Rojas et al. (2004) estiman que la falla Barranca tiene una tasa de movimiento de 4 mm/año y capacidad de generar sismos de magnitud máxima entre 6,5 y 7,0 (Mw) con un periodo de recurrencia de 740 años.

#### 2.2.2.2 Falla Delicias

Localizada entre los cantones de Turubares y Parrita, la falla Delicias posee una longitud total de aproximadamente 70 km, incluyendo su parte continental y su parte oceánica (Denyer et al., 2003a). Tiene una orientación promedio norte-sur entre el sur de Orotina y Punta de Judas, y posteriormente sigue un rumbo suroeste (Denyer et al., 2003a).

Montero et al. (1998) afirman que un temblor de magnitud 4.7 registrado en febrero de 1989, pudo haber estado relacionado con las fallas Delicias o Pirris. Respecto a su potencial, Denyer & Arias (1991) mencionan que la falla presenta actividad neotectónica, además, tiene la capacidad de generar sismos de magnitud aproximada de 7,0 (Mw) (Red Sismológica Nacional RSN, 2019).

### 2.2.2.3 Falla Tárcoles

Se trata de una falla de la era cuaternaria que inicia en el sector este del Golfo de Nicoya y se extiende por la zona de Tárcoles y Orotina hasta los Montes del Aguacate, con una longitud de 60 km (RSN, 2019). Denyer et al (2003b) mencionan que la falla es de desplazamiento de rumbo con una dirección que varía de noreste a este-noreste.

Algunos eventos sísmicos asociados a esta falla fueron una serie de epicentros ocurridos entre 1990 y 1998 en la zona de intersección entre la falla Tárcoles y el sistema de falla Bijagual y el terremoto de Orotina de marzo de 1924 (Montero, 1999). Por otro lado, la falla podría llegar a producir sismos de magnitud 7,2 (Mw) basándose en la longitud de la falla (RSN, 2019).

### 2.2.3 Sismicidad de la Zona

Güendel y McNally (1981) propusieron que la actividad sísmica de la costa del Pacífico Central presenta un patrón que se caracteriza por periodos de quietud de 2 a 4 años, una fase de reactivación y que finaliza con uno o más eventos con magnitudes  $M_b > 5.2$ . Güendel y Protti (s.f.), consideran poco probable que en el Pacífico Central ocurran eventos sísmicos de magnitud mayor a 7 y corroboran el patrón sísmico anterior con eventos sísmicos ocurridos entre agosto y setiembre de 1996 al suroeste de Quepos. El cuadro muestra un registro de sismos con magnitud mayor a 5 ocurridos en el Pacífico Central desde 1964; posteriormente en la Figura 2-9 se muestra la ubicación de estos sismos respecto al resto del país.

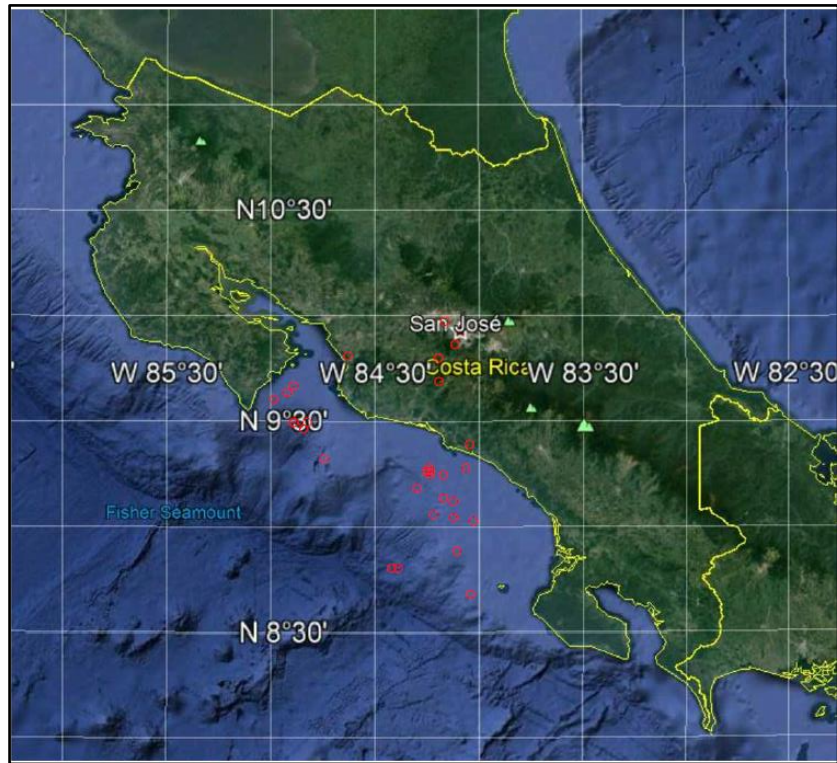
#### **Cuadro 2-2. Sismos de magnitud mayor a 5 ocurridos desde 1964 en el Pacífico Central de Costa Rica**

FECHA	TIEMPO	LATITUD N	LONGITUD O	PROF	mb	Ms	Mw	FUENTE
66/04/09	2:34	9°11.9'	84°14.1'	30.9	5.3			GÜE
66/04/09	2:42	9°11.1'	84°10.1'	28.2	5.7			GÜE
71/06/05	14:20	8°59.8'	84°13.1'	23.9	5.4			GÜE
71/08/05	22:58	9°12.5'	84°15.2'	32.5	5.1			GUE
73/08/04	0:44	9°27.5'	84°51.4'	38.1	5.3			GÜE
73/10/18	1:09	8°50.7'	84°06.7'	22.2	5.3			GÜE
74/02/28	20:15	8°46.7'	84°11.9'	37.5	5.2			GÜE
74/02/28	20:20	8°57.8'	84°09.9'	33.6	5.8			GÜE
76/11/25	6:45	9°25.7'	84°52.8'	34.6	5.2			GÜE
76/12/01	14:15	9°27.3'	84°55.9'	31.1	5.3			GÜE
76/12/20	10:18	8°57.4'	83°59.1'	48.9	5.5			GÜE
81/05/01	6:17	9°34.4'	85°01.3'	40.3	5.1			GÜE
82/08/17	18:23	9°12.5'	84°14.2'	25.7	5.4	5.5	5.9	GÜE
83/04/03	14:46	8°48.5'	84°06.8'	5.2	5.2	5.2	5.7	GÜE
83/04/04	13:11	8°35.2'	84°02.0'	19.3	4.9	5.1	5.7	GÜE
84/01/28	22:52	8°58.7'	83°53.6'	19.3	5.0	4.3		GÜE
85/09/25	12:09	9°04.3'	84°10.2'	27.1	5.2	4.9	5.5	GÜE
87/03/21	12:08	8°43.5'	83°34.9	35.1	5.3	5.2	5.9	OVSI
87/06/02	3:11	9°03.4'	83°53.1'	33.8	4.9	4.9	5.6	OVSI
88/03/02	7:13	9°27.7'	84°55.1'	30.5	5.0	5.2	5.6	OVSI
89/02/26	12:21	9°39.4'	84°11.5'	28.3	4.7	4.8	5.4	OVSI
90/03/25	13:16	9°36.4'	84°57.1	22.4			6.0*	PRO
90/03/25	13:22	9°38.5'	84°55.6'	20.0	6.3	7.0	7.0*	PRO
90/04/28	1:23	8°43.5'	83°36.5	28.7	5.9	6.4	6.4	OVSI
90/07/23	5:27	9°16.4'	84°46.2'	27.4	5.2	5.1	5.5	OVSI
96/08/28	17:16	9°13.3'	84°14.9'	35.7	5.4	5.4	5.9	OVSI
96/09/04	19:06	9°07.3'	84°18.2	33.2	5.8	5.9	6.1	OVSI
99/0810	14:55	9°20.8	83°58.02	33.0	5.1	4.9		PDE
99/0820	10:02	9°13.02	84°02.70	24.0	6.1	6.9	7.0	PDE

GÜE: Güendel, 1986. OVSI: Boletines sismológicos del OVSICORI-UNA. PRO: Protti et al., 1995.

PDE USGS Preliminary Determination of Epicenters.

Fuente: Güendel & Protti, s.f.

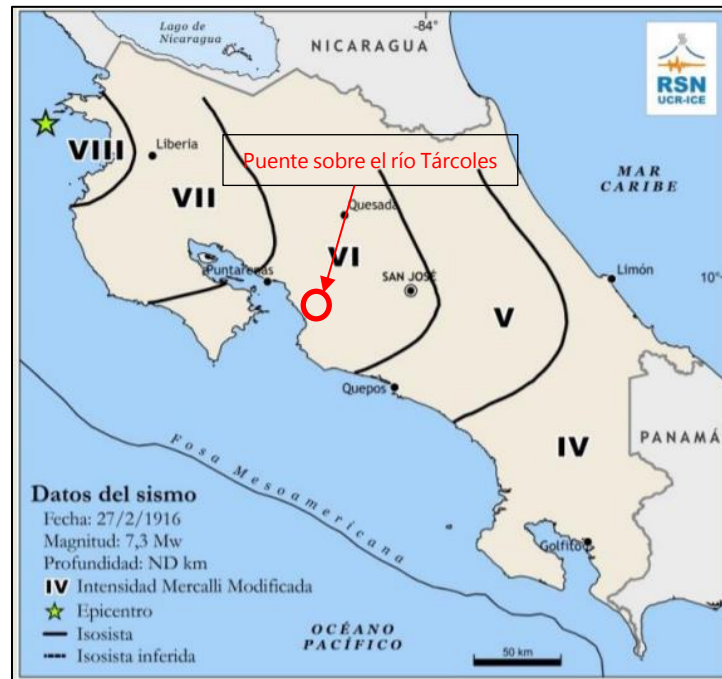


**Figura 2-9. Sismos de magnitud mayor a 5 ocurridos desde 1964 en el Pacífico Central de Costa Rica**

Fuente: Google Earth

Modificado por: Camacho y Mora S.A., 2020.

También son de interés algunos sismos ocurridos en la zona noroeste del país que han provocado intensidades mayores a 5 en la zona aledaña al puente sobre el río Tárcoles. A continuación, se muestran en orden cronológico los mapas de las intensidades en las áreas afectadas. Primero, se muestra el sismo de Papagayo (subducción) ocurrido en 1916 con una magnitud de 7.3 Mw y una intensidad en la zona de interés de VI (Figura 2-10) (Alvarado et al., 2014). Este sismo tuvo una duración de dos minutos y 36 segundos y generó grietas en el suelo.



**Figura 2-10. Sismo de Papagayo, 1916**

Fuente: Alvarado et al., 2014

El sismo de Nicoya de 1950 (Figura 2-11) es uno de los sismos de mayor magnitud en el país, con una magnitud de 7.7 Mw y la intensidad en la zona de estudio fue de VII (Alvarado et al., 2014). Causó daños debido a deslizamientos, licuefacción y una elevación cosísmica de más de 1.0m a lo largo de la costa.

Por último, el sismo reciente de mayor magnitud causado por subducción es el sismo de Sámara del 2012 (Figura 2-12), el cual se sintió en la zona de estudio con una intensidad de VI en la escala Mercalli y tuvo una magnitud de 7.6 Mw (Alvarado et al., 2014). El deslizamiento máximo en el sismo de Sámara fue mayor a 2 metros, además se presentaron levantamientos costeros de 45 cm en Carrillo y 75 cm en Playa Pelada (Alvarado et al., 2014). Se resalta también que en el centro; la ruptura se extendió a lo largo de la interfaz por más de 3.000 km<sup>2</sup> de la zona sismogénica.

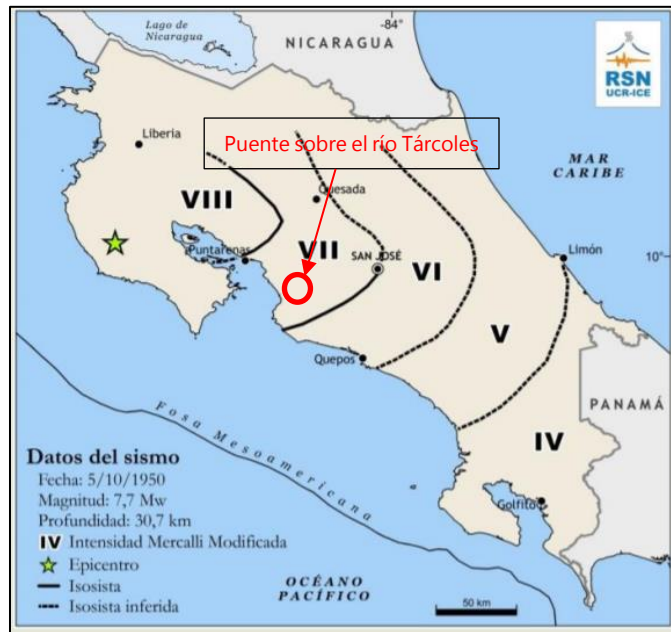


Figura 2-11. Sismo de Nicoya, 1950

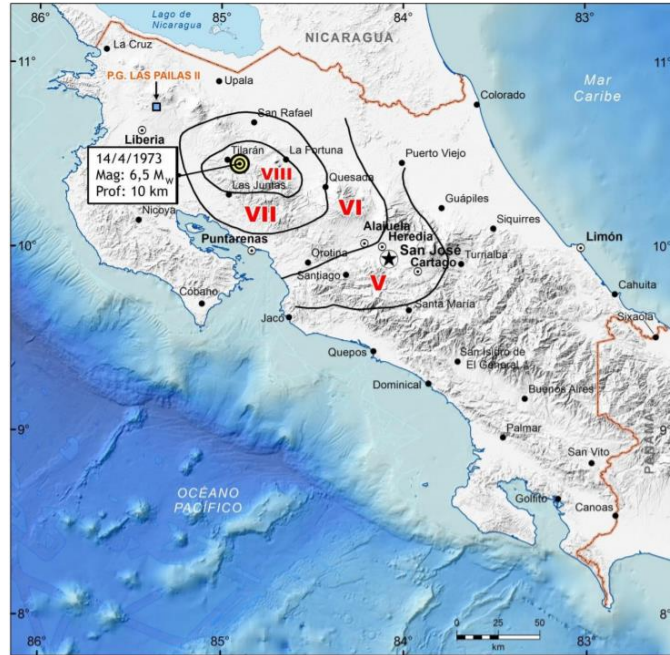
Fuente: Alvarado et al., 2014



Figura 2-12. Sismo de Sámara, 2012

Fuente: Alvarado et al., 2014

El sismo de 1973, en Tilarán (Figura 2-13) tuvo una magnitud de 6.5 Mw a una profundidad de 10 km. En la zona de estudio tuvo una intensidad de VI a V. Su origen fue asociado a la falla la Chiripa (Alvarado, Climent, Taylor y Vargas, 2014).



**Figura 2-13. Sismo de Tilarán, 1973**

Fuente: Alvarado, Climent, Taylor y Vargas, 2014

### 2.3 Amenaza Sísmica

La Amenaza Sísmica de un emplazamiento se define como la probabilidad de excedencia de un determinado nivel de movimiento del terreno, como resultado de la acción de terremotos en el área de influencia, durante un periodo de tiempo especificado (Schenk, 1989). Para caracterizar estos movimientos, se deben considerar parámetros cinemáticos como la aceleración, velocidad o desplazamiento, bien sean los valores máximos de las correspondientes historias temporales o los valores espectrales. De esta forma, se puede definir la amenaza como:

$$H = P [y \geq Y; \text{ en } t \text{ años, en el emplazamiento } E]$$

Donde  $H$  corresponde a la amenaza,  $Y$  corresponde al nivel de movimiento,  $t$  al tiempo en años durante el cual se analiza la amenaza,  $E$  corresponde al emplazamiento y  $P$  corresponde a la probabilidad de excedencia del valor del parámetro de movimiento.



Existen diversos métodos de cálculo para la Amenaza Sísmica, los métodos determinísticos (década 60's) y los probabilísticos (década 70's en adelante). Los métodos determinísticos proporcionan el sismo de diseño, pero no permiten determinar la probabilidad de excedencia de este movimiento. Los métodos probabilísticos logran obtener la probabilidad anual de excedencia considerando un espectro de diseño, construido con una familia de acelerogramas representativos del movimiento y escalado al valor de aceleración máximo correspondiente al periodo de retorno. Posteriormente, los métodos probabilistas lograron construir espectros de diseño que consideran la probabilidad de excedencia de todas las ordenadas espectrales para los períodos de interés. Sin embargo, este método, no proporciona directamente un sismo de diseño, motivo por el cual se han desarrollado métodos de segregación de la amenaza.

Recientemente existen métodos de evaluación de la amenaza, combinando aspectos probabilísticos (estimación de probabilidad anuales y las correspondientes incertidumbres) con aspectos determinísticos (escenario de diseño). En esta es que se ha ido creando la metodología conocida como PSHA, la cual surge al considerar que el cálculo de la amenaza requiere asumir ciertas hipótesis para cuantificar la influencia de la fuente y de la propagación de ondas en la evaluación de la amenaza, por lo que el proceso global de cálculo conlleva numerosas incertidumbres, que hacen que los resultados se puedan ver afectados de un alto grado de dispersión.

#### 2.4 Recurrencia y actividad de las fuentes sísmicas

El modelo estocástico de Poisson para ocurrencia de eventos está incorporado en el programa EZFRISK (Mc Guire, 1995, Risk Engineering, 2015). El modelo de recurrencia de magnitud es el propuesto por Richter:

$$\log Nm = a - b * m$$

El catálogo que se usó para para evaluar los parámetros sísmicos de las fuentes sísmicas de este estudio se compiló especialmente para este propósito. Como se explicó previamente, se basa en el Catálogo Sísmico para América Central actualizado al 26 de junio del 2017, usando los boletines de la Red Sismológica Nacional de Costa Rica (RSN) y el de International Seismic Center del Reino Unido (ISC), que compila las magnitudes y localizaciones para eventos reportados por otras agencias internacionales, así como el catálogo de la Universidad de Panamá (UPA).

En el catálogo se realizaron ejercicios estadísticos para evaluar la homogeneidad y completitud para las diferentes zonas para diferentes ventanas de tiempo. Se generaron

relaciones empíricas para la conversión de las diferentes magnitudes. Todos los eventos han sido recalculados para ser expresados en magnitud momento. La base de datos actual para la zona centroamericana está ajustada a partir del siglo XVI (1541) y hasta el 26 de junio del 2017, consta de 115 455 sismos a partir del siglo XVI (1541), entre las coordenadas  $7.0^{\circ}$  N -  $13.0^{\circ}$  N y  $88.5^{\circ}$  W -  $81.5^{\circ}$  W, de los que 77 832 tienen profundidades menores o iguales a 25 km y 37 623 son de más de 25 km de profundidad.

Este catálogo, que comprende todo Costa Rica, márgenes marinas y zonas aledañas, fue mejorado buscando e incorporando todos los tipos de magnitud reportadas para la mayor cantidad de eventos posible. De esta manera un mismo evento se reporta con una, dos o tres magnitudes diferentes que pueden ser: magnitud coda o magnitud duración (MC), magnitud local (ML), magnitud B o de onda de cuerpo (Mb), magnitud superficial u onda superficial (MS) y magnitud momento (MW). Por esa razón, uno de los primeros pasos a realizar fue realizar la homogenización del catálogo. Se verificó la completitud del catálogo para las diferentes ventanas de tiempo, determinándose que se encuentra completo a partir del año 1960, para sismos MW= 4.0.

Para la evaluación de los parámetros sísmicos, el catálogo se ha dividido en eventos someros y profundos, con el límite establecido en 25 km de profundidad para fuentes corticales someras. Para las fuentes corticales adyacentes de las fuentes de subducción cerca de la Trinchera Mesoamericana, donde la sismicidad de ambos procesos puede traslaparse, se respetó la geometría de la loza buzante para seleccionar los sismos de la subducción somera y el resto se le adjudicó a las fuentes corticales. En el extremo SW de las fuentes regionales corticales esta sismicidad osciló entre 0-10 km y en el extremo NW hasta aproximadamente 25-30 km, dependiendo del buzamiento de la loza. En la fuente Caribe el rango de profundidad se amplió a 40 km.

La determinación de los parámetros 'a' y 'b' es el resultado de la regresión estadística usando la máxima verosimilitud para la relación de recurrencia arriba citada para los eventos registrados en la correspondiente fuente en la correspondiente ventana de profundidad. El intervalo de magnitud para el cálculo es de 0.2 M.

Para la integración de la amenaza sísmica, se calcularon para las fuentes locales someras dos conjuntos de parámetros 'N' y 'b' (2 casos de "actividad"). El primer conjunto de valores se calculó con la sismicidad que se ubica dentro de las respectivas fuentes, dentro de una profundidad de 0-25 km, al igual que las fuentes regionales someras. Para el segundo caso de 'actividad' de las fuentes locales someras, se adoptaron directamente los valores 'b' de las fuentes regionales donde se ubican. Luego, el valor de 'N' se calculó como una proporción del valor del 'N' de la fuente regional somera donde se ubican.

## 2.5 Relaciones de atenuación

Se estudiaron varias fórmulas de atenuación para su aplicación en este estudio. Por la riqueza de las bases de datos y la alta vulnerabilidad de las estructuras del oeste de los EEUU, se han derivado muchas relaciones de atenuación para los sismos corticales, como las de Boore, Joyner y Fumal de 1993 y 1997, las de Sadigh de 1993 y 1997, las de Idriss de 1993, las de Campbell de 1993, 1997, 2003 y 2007. También se estudiaron fórmulas de atenuación para bases de datos a nivel mundial como las de Ambraseys & Douglas 2003 y las de Abrahamson & Silva, 1997. Los Japoneses también poseen una de las bases de datos más extensas del mundo y han generado varias fórmulas de atenuación (Zhao et al. 2006, Fukushima et al, 1988). En este estudio se seleccionaron y aplicaron diferentes fórmulas de atenuación para las fuentes corticales y de subducción.

Se consideraron las fórmulas de zonas de subducción como las de Youngs et al. (1997) y la de Atkinson y Boore (2003) para todo el mundo, la de Zhao et al. (2006) para Japón y la de Dahle et al. (1995) que incluyen registros de sismos de subducción y corticales someros para la región Centroamericana y México. De acuerdo a Arango et al (2012), el 75 % de la liberación del momento sísmico en una escala global se produce en las zonas de subducción, pero solo pocos modelos de atenuación se han desarrollado para estas zonas sísmicas. Estos investigadores estudiaron las fórmulas de atenuación para las zonas de subducción existentes a nivel mundial y evaluaron su idoneidad para modelar las bases de datos de sismos de subducción obtenidos en América del Sur y América Central. Utilizaron un criterio de máxima verosimilitud para tazar a las fórmulas de atenuación al compararlas con las respectivas bases de datos. Concluyeron que para la base de datos de Centroamérica que analizaron, la fórmula de atenuación de Zhao es la que mejor se aplica. Entre las fórmulas que también recomendaron para Centroamérica, está la de Youngs et al. (1997).

Las fórmulas de atenuación utilizadas para las fuentes corticales fueron las de Dahle et al. 1995, Boore, y Atkinson 2008, Abrahamson y Silva 2008, Campbell y Bozorgnia 2008 y Zhao et al. 2006. Para las fuentes de subducción se utilizaron las fórmulas de Atkinson y Boore 2003, Dahle et al. 1995, Zhao et al. 2006 y Youngs et al 1997. Se consideró que el conjunto de estas siete fórmulas proporcionaba un buen balance entre condiciones tectónicas de fallamiento somero y de subducción que a su vez también incluyen sismos someros de empuje y sismos profundos intraplaca. A la hora de integrar la amenaza sísmica, se consideraron 20 diferentes casos de atenuación al aplicar 5 fórmulas para las fuentes corticales someras y 4 para las de subducción. Todas las fórmulas se utilizaron para el caso en que las condiciones geotécnicas de sitio sean compatibles con roca (S1 según CSCR 2010).

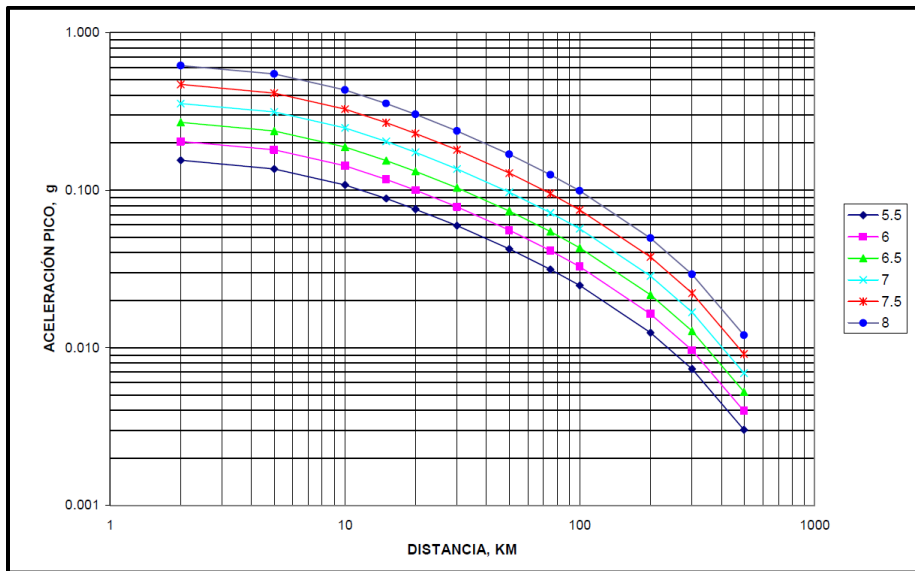


Figura 2-14. Relación de Atenuación de Dahle et al., 1995

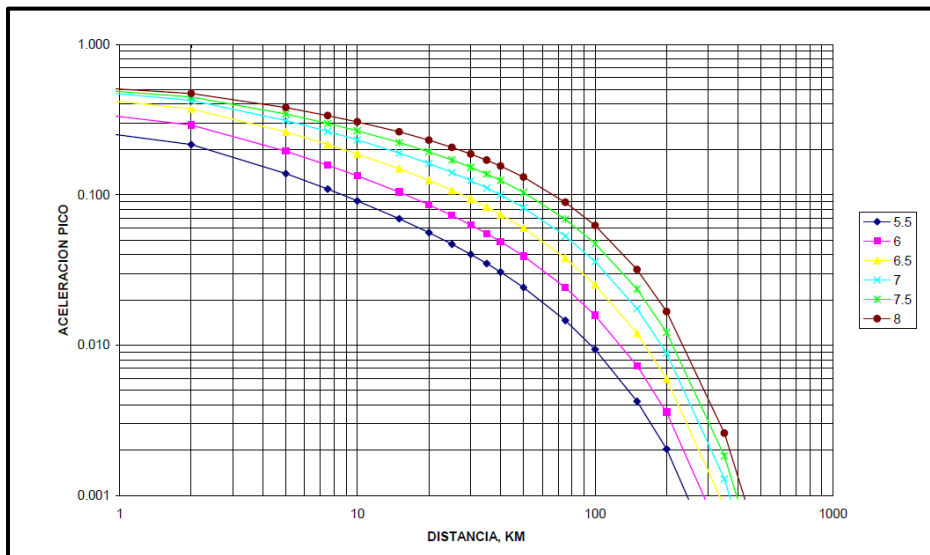


Figura 2-15. Relación de Atenuación de Boore y Atkinson, 2008

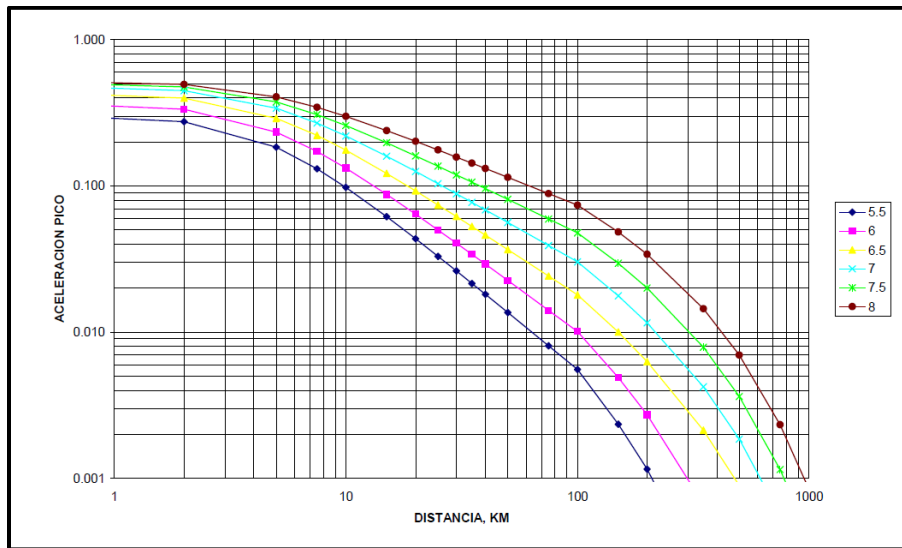


Figura 2-16. Relación de Atenuación de Abrahamson y Silva, 2008

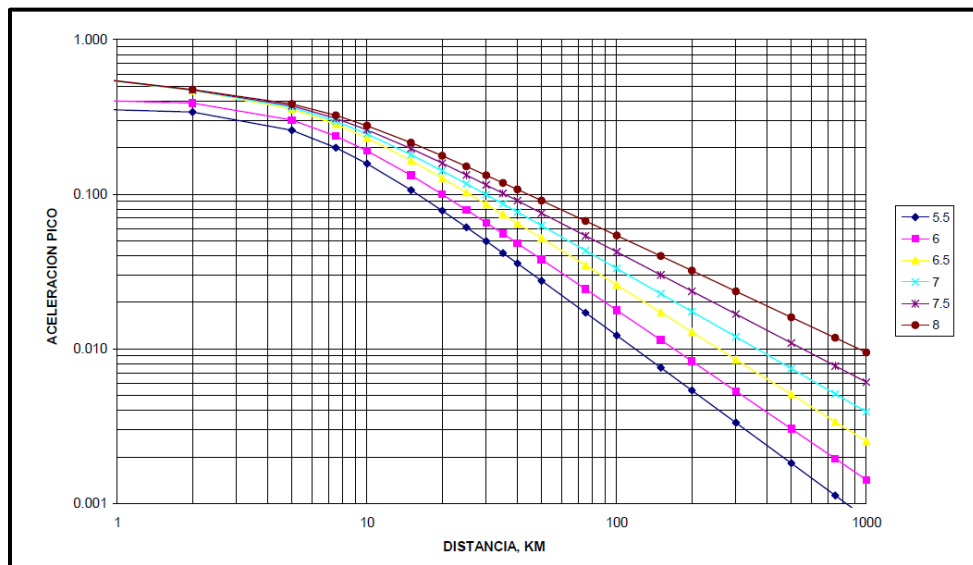


Figura 2-17. Relación de Atenuación de Campbells y Bozognia, 2008

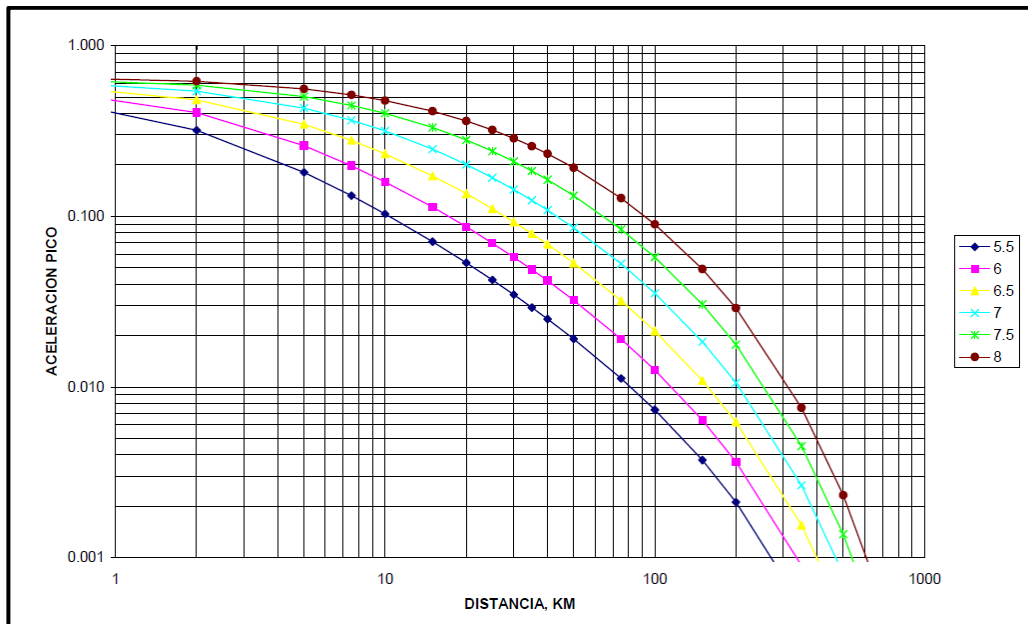


Figura 2-18. Relación de Atenuación de Zhao et al., 2005

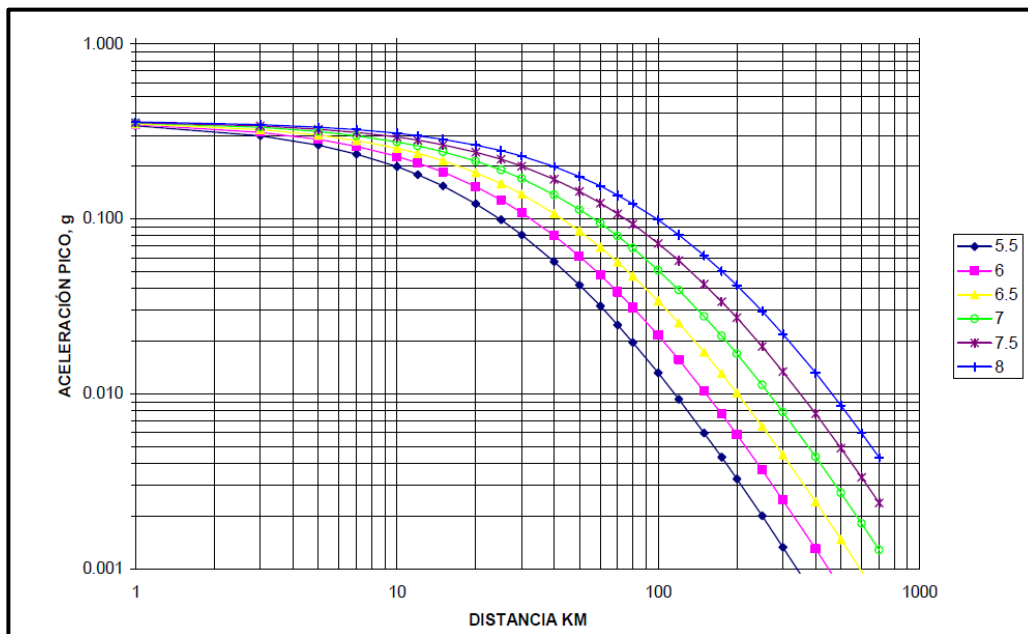


Figura 2-19. Relación de Atenuación de Youngs et al., 1997

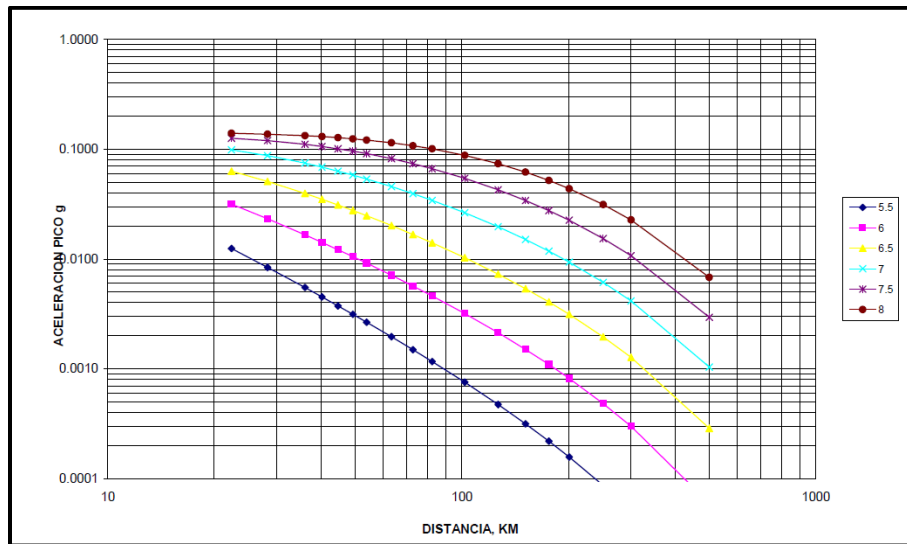


Figura 2-20. Relación de Atkinson y Boore, 2003.

## 2.6 Estudios de Amenaza Sísmica en Costa Rica

En Costa Rica, los primeros estudios de amenaza sísmica utilizaron la metodología probabilística y obtuvieron como resultado mapas, a nivel nacional, de iso-aceleración e iso-duración para periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años, los cuales se incluyeron en el Código Sísmico de Costa Rica publicado en el año 86 (CFIA, 1986).

A partir de estos se realizaron diversos estudios bajo el método probabilístico que han generado iso-aceleración, espectros de pseudo velocidad de amenaza uniforme para periodos de 50, 100, 500 y 1000 años. Además, se realizó un estudio basado en una zonificación de 21 áreas sísmicas corticales y 2 de interplaca, aplicando las leyes de atenuación de Schmidt et al. 1997.

Más recientemente, los "Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes" especifican para estructuras de ciertas características la necesidad de elaborar un espectro de diseño específico para el sitio en estudio. Lo anterior, para asegurar una consideración de las características especiales de cada proyecto en la obtención de la demanda sísmica.

A continuación, se describen los resultados obtenidos para el Estudio de Amenaza Sísmica solicitado para el puente sobre el río Tárcoles y a partir de estos resultados se construyen los espectros de diseño específicos siguiendo los "Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes".

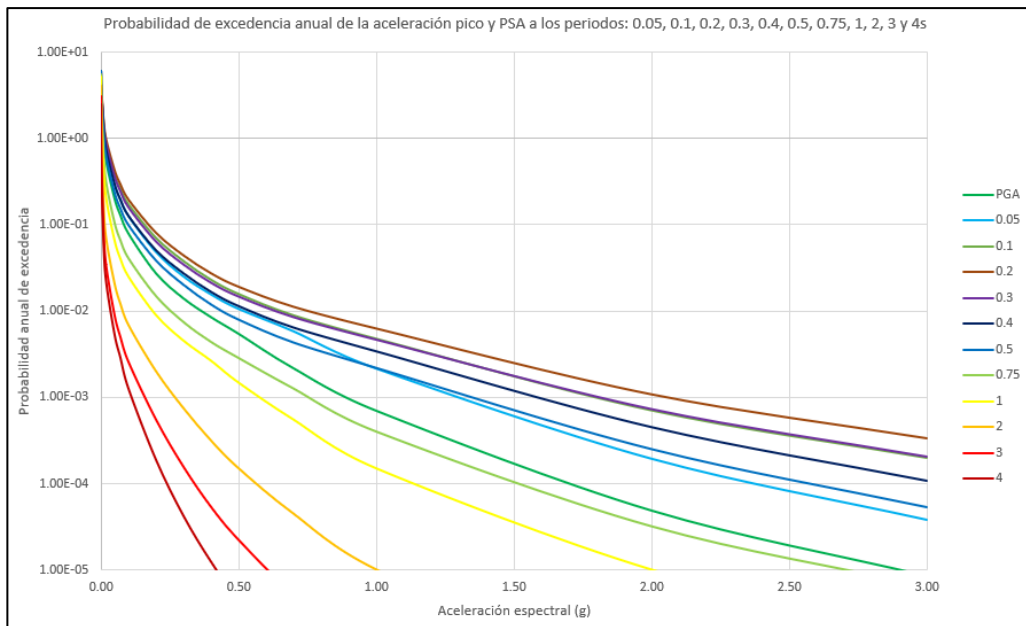




### 3. Resultados del estudio

Para el presente Estudio de Amenaza Sísmica se determinó, utilizando el programa EZ FRISK versión 8.06, la probabilidad de excedencia anual de que una aceleración pico sea excedida en un sitio particular.

Esta probabilidad de excedencia se analizó utilizando los siguientes periodos espectrales: 0.05 s, 0.1 s, 0.2 s, 0.3s, 0.4 s, 0.5 s, 0.75 s, 1 s, 2 s, 3 s y 4 s. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura.

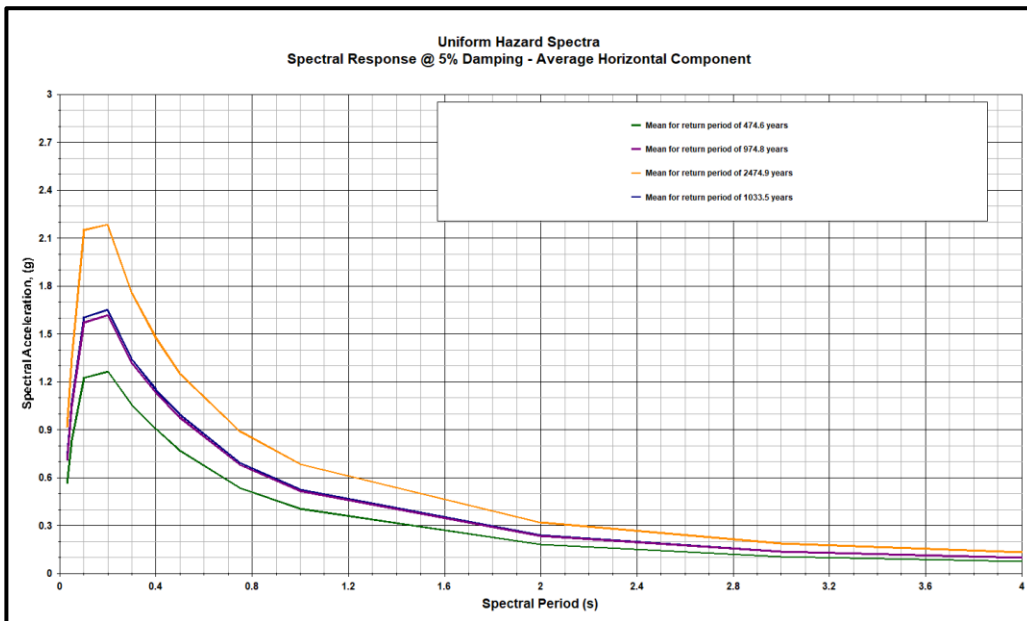


**Figura 3-1. Probabilidad de excedencia anual de la aceleración pico y pseudoaceleración para distintos periodos.**

Fuente: Camacho y Mora S.A., 2020.

Adicional a la información anterior, se generaron espectros de amenaza uniforme. Estos espectros se construyen a partir de periodos de retorno definidos y lo que se realiza es una evaluación probabilística de la amenaza sísmica una vez que se han definido modelos de atenuación espectrales.

En la Figura 3-2 se presenta un espectro de amenaza uniforme para distintos periodos de retorno adicionales a los 1033.5 años mencionados anteriormente, específicamente para 475 años, 975 años y 2475 años, esto con el fin de hacer una comparación entre ellos. Como es lógico suponer, entre mayor es la aceleración espectral, menor es su probabilidad de excedencia. En diseño estructural, se debe hacer un análisis costo-beneficio a la hora de determinar el periodo de retorno a utilizar para el análisis de estructuras



**Figura 3-2. Espectro de Amenaza Uniforme para diferentes periodos de retorno.**

Fuente: Camacho y Mora S.A., 2020.

Una vez que se obtiene del análisis los resultados anteriores, es posible construir los espectros de diseño con respecto al periodo de retorno de interés.

Los "Lineamientos para diseño sismorresistente de Puentes" especifican, para estructuras normales, un periodo de retorno de 1033.5 años, es decir, una probabilidad de excedencia de 7% en 75 años.

A partir de los datos de los espectros de amenaza uniforme UHS, se obtiene la aceleración pico del sitio de interés. Con el fin de ser congruentes en lo expuesto en los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes (LDSP-2013), en donde los

espectros son construidos con base a la aceleración pico (la cual corresponde a un 80% de la aceleración pico), se ha procedido a calcular la aceleración pico efectiva para el sitio del puente.

Tabla 1. Aceleración pico para el sitio del puente

Periodo de retorno	Puente sobre el río Tárcoles
	Aceleración pico en roca (g)
1033.5 años	0.660

Tabla 2. Aceleración pico efectiva para el sitio del puente

Periodo de retorno	Puente sobre el río Tárcoles
	Aceleración pico efectiva en roca (g)
1033.5 años	0.528

Es importante indicar que los resultados mostrados consideran el efecto de fallas cercanas activas a menos de 5km y que tengan potencial de generar un sismo de magnitud  $M_w=6,50$  o superior.

Basándose en lo estipulado en los "Lineamientos para el diseño sismorresistente de Puentes" es que se determinan los parámetros  $C_a$  y  $C_v$  para un periodo de retorno de 1033.5 años, tal como lo indica el apartado 2.4 del documento mencionado. Estos parámetros corresponden a coeficientes sísmicos espectrales para los periodos cortos y largos y es a partir de ellos que se pueden construir los espectros de diseño.

Según los estudios de suelos realizados para este proyecto, se tiene un tipo de cimentación S2. Para poder tomar en cuenta los efectos del sitio de cimentación, se utiliza la siguiente tabla propuesta por Dobry (ver figura siguiente).

Sitio geotécnico	APE $\leq 0.1$ g	APE = 0.2g	APE = 0.3g	APE = 0.4g	APE $\geq 0.5$ g
<b>C<sub>a</sub></b>					
<b>S<sub>1</sub></b>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>S<sub>2</sub></b>	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
<b>S<sub>3</sub></b>	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
<b>S<sub>4</sub></b>	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
<b>C<sub>v</sub></b>					
<b>S<sub>1</sub></b>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>S<sub>2</sub></b>	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
<b>S<sub>3</sub></b>	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
<b>S<sub>4</sub></b>	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4

**Figura 3-3. Coeficientes normalizados de Periodos corto y largo.**

**Fuente: Camacho y Mora S.A., 2020.**

A partir de lo anterior, se pueden obtener los coeficientes espectrales a utilizar en la construcción del espectro.

*Tabla 3. Coeficientes espectrales de los puentes según el estudio de amenaza*

Rubro	Puente sobre el río Tárcoles
Sitio de cimentación (g)	S2
Coeficiente espectral Ca (g)	0.528
Coeficiente espectral Cv (g)	0.687

Utilizando la metodología incluida en LDSP 2013, se pueden construir los espectros de diseño para cada uno de los sitios de cimentación. Los espectros construidos mediante este procedimiento corresponden a un amortiguamiento del 5% y como fue mencionado anteriormente, ya incluyen los efectos de presencia de una falla cercana activa.

Para considerar posibles efectos por fallas cercanas, los "Lineamientos para el diseño sismorresistente de Puentes" proponen factores para amplificar el espectro de diseño. Estos se aplican si el sitio en estudio se encuentra a menos de 5 km de una falla activa con el potencial de generar un sismo magnitud MW = 6.5 o mayor. Al revisar el mapa

de fallas activas de la figura 2.4 de los "Lineamientos para el diseño sismorresistente de Puentes" se concluye que en este proyecto en particular si podría ser afectado por la presencia de fallas cercanas activas.

Cada espectro construido a partir de los valores del estudio de amenaza sísmica se compara con los resultados obtenidos al utilizar los parámetros ya establecidos en la tabla 2.4-1 de los "Lineamientos para el diseño sismorresistente de Puentes". En las siguientes figuras se muestran los resultados.

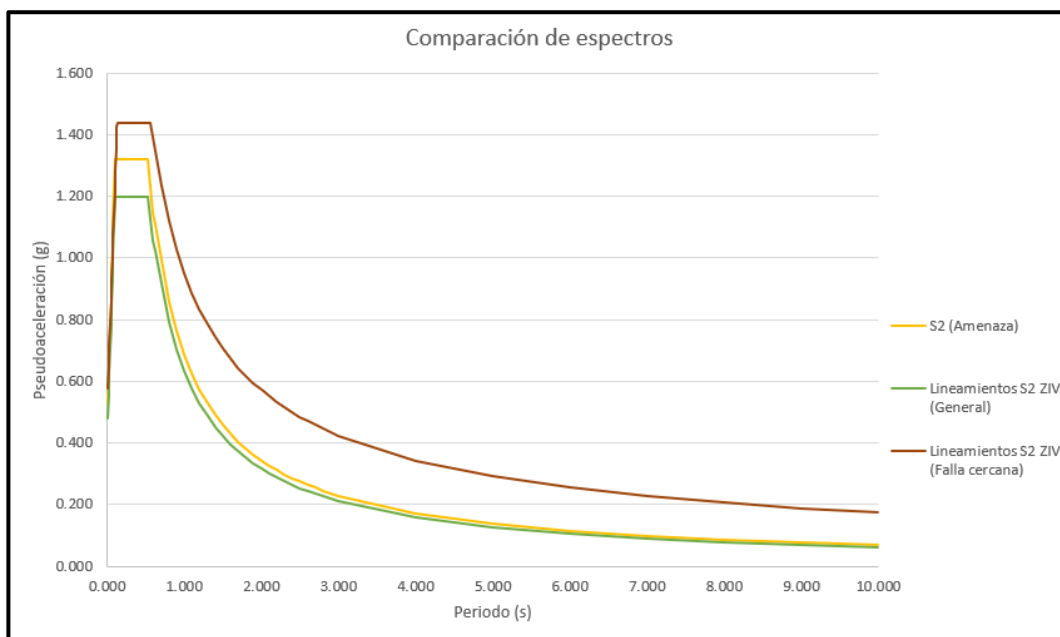


Figura 3-4. Comparación entre estudio de amenaza vs Lineamientos.

Fuente: Camacho y Mora S.A., 2020.

Si se realiza una comparación de los valores de coeficientes espectrales "Ca", para cada uno de los espectros anteriores, se puede ver numéricamente la diferencia entre cada uno.

Tabla 4. Comparación coeficientes espectrales Ca

Periodo de retorno	Coeficiente espectral Ca		
	Estudio de amenaza	LDSDP (Condición normal)	LDSDP (Falla cercana)
1033.5 años	0.528	0.480	0.576

A partir de la figura anterior, se observa que el espectro obtenido a partir del estudio de amenaza específica para el sitio, arroja valores de pseudoaceleración mayores a los obtenidos mediante el método general incluido en los Lineamientos. No obstante, cuando se realiza la comparación con el espectro obtenido siguiendo el procedimiento que incluye el efecto de falla cercana, es claro que dicho espectro arroja los valores de pseudoaceleración mayores.

## 4. Conclusiones y recomendaciones

---

Las probabilidades de excedencia anual para aceleraciones espectrales calculado para varios periodos espectrales se obtuvieron por medio del programa EZ FRISK versión 8.06. Esto se muestra en la figura 3-1.

Se elaboraron además espectros de amenaza uniforme para varios periodos de retorno. Estos espectros demuestran que entre menor sea el porcentaje de excedencia requerido mayor será la aceleración pico asociada. De forma que se debe obtener un equilibrio entre costo-beneficio en una estructura para así definir el periodo de retorno del análisis.

En este caso particular, al tratarse de una estructura tipo puente, y siguiendo las recomendaciones de diseño de los "Lineamientos para el diseño sismorresistente de Puentes" para puentes normales, se recomienda utilizar un periodo de retorno de 1033.5 años que corresponde a un porcentaje de excedencia de 7% en 75 años.

Los espectros de diseño obtenidos a partir del presente estudio de amenaza sísmica muestran un valor de aceleración pico efectiva y un valor en el plató ligeramente superiores a los alcanzados cuando se construyen los espectros con los parámetros establecidos en los "Lineamientos para el diseño sismorresistente de Puentes". Sin embargo, cuando se utiliza el procedimiento de construcción del espectro que considera el efecto de falla cercana, los valores de aceleración de los "Lineamientos para el diseño sismorresistente de Puentes" tienden a sobrepasar a los obtenidos en este estudio.

Tomando en cuenta lo anterior, se concluye que se debe utilizar el método y valores propuestos por los "Lineamientos para el diseño sismorresistente de Puentes", considerando el efecto de falla cercana. Es importante indicar que la aceleración pico efectiva utilizada como coeficiente espectral "Ca" para este proyecto, será 0.576g.





## 5. Bibliografía

---

- Alvarado, G., Climent, A., Taylor, W., Vargas, A. (2014) Estudio Amenaza Sísmica P.G. las Pailas III: Área de Amenazas y Auscultación Sismológica y Volcánica. Instituto Costarricense de Electricidad. Costa Rica.
- Alvarado, G., Benito, B., Climent, A., Rojas, W. (2008) Evaluación Sísmica en Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad. Costa Rica.
- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Sixth Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2012.
- Benito, B. (2009). Amenaza Sísmica en América Central. Entimema.
- Bergoeing, J. P. (2006). El Cuaternario en Costa Rica. Proposición cronológica. Obtenido de Reflexiones:  
<https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=72920817015>
- Castillo, R. (1993). Geología de Costa Rica: una sinopsis. San José: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Climent, A., Salgado, D., Slob, S., van Westen, C.J. (2003). Amenaza Sísmica y Vulnerabilidad Física en la ciudad de Cañas, Guanacaste, Costa Rica. Obtenido de CNE: <https://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/CEDO-CRID%20v2.0/CEDO/pdf/spa/doc15075/doc15075-a.pdf>
- Comisión Nacional de Prevención de Riesgos. (2013). Mapa de amenazas naturales potenciales: Hoja Tárcoles. Obtenido de UNA:  
<https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/7720?show=full>

- Comisión Permanente del Código Sísmico de Costa Rica - Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. 2011. Código Sísmico de Costa Rica 2010. Editorial Tecnológica, Cartago, Costa Rica.
- Comité de Puentes de la Comisión Permanente del Código Sísmico de Costa Rica - Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. 2013: Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes de Costa Rica. Publicado en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Comité de Puentes de la Comisión Permanente del Código Sísmico de Costa Rica - Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. 2014: Comentarios a "Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes de Costa Rica". Publicado en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
- Cornell, C.A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 58, No. 5, pp.1583-1606.
- Denyer, P., Arias, O. (1991). Estructura geológica de la región comprendida en las hojas topográficas Abra, Carraigres, Candelaria y Río Grande, Costa Rica. - Rev. Geol. Amér. Central, 12:61- 74.
- Denyer, P., Montero, W., Alvarado, G. (2003a). Atlas tectónico de Costa Rica. - 79 págs. Ed. Univ. Costa Rica, San José.
- Denyer, P., Aguilar, T., Alvarado, G. (2003b). Geología y estratigrafía de la hoja Barranca, Costa Rica.-Rev. Geol. Amér. Central, 29:105-125.

- Dhale, A. (1994). NPRISK logic tree probabilistic hazard computation program. User Guide's version 1.1.
- Frankel, A. (1995). Mapping Seismic Hazard in the Central and Eastern United States. *Seism. Res. Lett.*, Vol. 66, pp. 8-21.
- Güendel F., K. C. McNally. (1981). Application of the seismic gap method to the seismicity of Costa Rica, Central America, American Geophysical Union, EOS, EUA, Vol. 62, No.45, p. 948.
- Güendel F., Protti, M. (s.f.). Actividad sísmica frente a las costas de Quepos Pacífico Central, Costa Rica. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional.
- Instituto de Desarrollo Rural. (2016). Caracterización del terrotirio Garabito-Parrita-Quepos. Obtenido de INDER: <https://www.inder.go.cr/quepos-garabito-parrita/Caracterizacion-Quepos-Garabito-Parrita.pdf>
- Montero, W., Denyer, P., Barquero, R., Alvarado, G., Cowan, H., Machette, M., Hallerm, K., Dart, R. (1998). Map a database of Quaternary faults and folds in Costa Rica and its offshore regions. - 63 págs. Reporte preliminar de USGS.
- Montero, W. (1999). El terremoto del 4 de marzo de 1924 (ms 7,0): ¿Un gran temblor intraplaca relacionado al límite incipiente entre la Placa Caribe y la Microplaca Panamá? - *Rev. Geol. Amér. Central*, 22: 25 – 62.
- Moreno, L., & Espejo, J. A. (2004). Estudio geotécnico y clasificación de suelos en la línea de transmisión SIEPAC. Obtenido de [http://www.eprsiepac.com/pdf/InfFinal\\_Costa%20Rica.pdf](http://www.eprsiepac.com/pdf/InfFinal_Costa%20Rica.pdf)

- Protti, M., Vega, F. (2014). Sismicidad de la zona sur de Costa Rica. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional.
- Quesada Roman, A. (2016). Peligros geomorfológicos: inundaciones y procesos de ladera en la cuenca alta del río General, Pérez Zeledón, Costa Rica. Mexico D.F.
- Red Sismológica Nacional. (2019). Falla Barranca. San José, Costa Rica: Red Sismológica Nacional. Obtenido de <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/57-sismologia/fallas-activas2/3096-falla-barranca?Itemid=225>
- Red Sismológica Nacional. (2019). Falla Delicias. San José, Costa Rica: Red Sismológica Nacional. Obtenido de <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/57-sismologia/fallas-activas2/2924-falla-delicias?Itemid=225>
- Red Sismológica Nacional. (2019). Falla Tárcoles. San José, Costa Rica: Red Sismológica Nacional. Obtenido de <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/103-actividad-sismica/fallas-activas-iii/3317-falla-tarcoles?Itemid=225>
- Rojas, W., Montero, W., Schmidt, V., Moya C. (2004). Estudio de amenaza sísmica de Costa Rica y respuesta del suelo para las 10 ciudades con mayor índice de población del país. - 137 págs, FUNDEVI, San José [Inf. Interno INS]
- Sandoval, L. (1977) Mapa Metalogenético de Costa Rica. Ministerio de Economía, Industria y Comercio: Dirección de Geología, Minas y Petróleo.. San José, Costa Rica.

- Schenk, V. (1989). Achievements and Probable Trends in Seismic Hazard Assessment. *Tectonophysics*, Vol. 167, pp. 157-169.
- United States Geological Survey USGS (1998) Mapa de Fallas y Pligues Cuaternarios de Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología y U.S. Geological Survey. San José, Costa Rica.