

Estudio de Amenaza Sísmica
Puentes sobre el Río Salitral y Ciruelas RN.27
Octubre, 2020



Preparado para:
Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI)

Camacho Y Mora S.A.

INF-PC-20-14-364

Índice

1.1	Antecedentes.....	1-1
1.2	Alcance.....	1-2
1.3	Limitaciones	1-2
2.1	Marco Geológico	2-3
2.1.1	Geología Regional	2-3
2.1.2	Geología Local	2-6
2.2	Marco Tectónico	2-10
2.2.1	Tectónica y Fallamiento Regional	2-10
2.2.2	Tectónica y Fallamiento Local.....	2-19
2.2.3	Sismicidad de la Zona	2-33
2.3	Amenaza Sísmica	2-37
2.4	Recurrencia y actividad de las fuentes sísmicas	2-38
2.5	Relaciones de atenuación.....	2-40
2.6	Estudios de Amenaza Sísmica en Costa Rica.....	2-41

Índice de Cuadros

Cuadro 2-1. Estratigrafía del puente sobre el Río Salitral	2-8
Cuadro 2-2. Estratigrafía del puente sobre el Río Ciruelas.....	2-9
Cuadro 2-3. Resumen de sismos en Costa Rica.....	2-12
Cuadro 2-4. Fallas con cercanía de 5 km a los sitios de puentes.....	2-33
Cuadro 2-5. Sismos con $MW \geq 5.0$, en los 100 km alrededor del área de estudio.	2-34
Cuadro 3-1. Valores tabulados de los espectros de diseño obtenidos en el Estudio de Amenaza Sísmica.....	3-6

Índice de Figuras

Figura 1-1. Ubicación del Puente sobre el Río Ciruelas.....	1-1
Figura 1-2. Ubicación del Puente sobre el Río Salitral.....	1-2
Figura 2-1. Placas y estructuras tectónicas principales en América Central.....	2-2
Figura 2-2. Mapa geológico de Costa Rica.....	2-4
Figura 2-3. Leyenda y simbología del mapa geológico de Costa Rica.....	2-4
Figura 2-4. Geología de la hoja Río Grande.....	2-5
Figura 2-5. Leyenda y simbología de la geología de la hoja Río Grande.....	2-5
Figura 2-6. Mapa Geomorfológico.....	2-6
Figura 2-7. Perfil estratigráfico del puente sobre el Río Salitral.....	2-8
Figura 2-8. Perfil estratigráfico del puente sobre el Río Ciruelas.....	2-9
Figura 2-9. Marco Tectónico de Costa Rica.....	2-11
Figura 2-10. Fallas neotectónicas que definen el CDCCR.....	2-11
Figura 2-11. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Purires.....	2-20
Figura 2-12. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Picagres.....	2-22
Figura 2-13. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Virilla.....	2-23
Figura 2-14. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Candelaria.....	2-24
Figura 2-15. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Jaris.....	2-25
Figura 2-16. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Tárcoles.....	2-26
Figura 2-17. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Delicias.....	2-27
Figura 2-18. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Tulín.....	2-28
Figura 2-19. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla La Garita.....	2-29
Figura 2-20. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Alajuela.....	2-30
Figura 2-21. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Escazú.....	2-31
Figura 2-22. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Escazú.....	2-32
Figura 2-23. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Frailes-Pirris-Pangolín.....	2-33
Figura 2-24. Ubicación de sismo cerca de la zona de estudio.....	2-37
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, Puente Río Ciruelas.....	3-2

Figura 3-3. Espectro de Amenaza Uniforme para diferentes periodos de retorno, Puente Río Salitral. 3-3

Figura 3-4. Comparación entre espectros de diseño para el puente río Ciruelas 3-5

Figura 3-5. Comparación entre espectros de diseño para el puente río Salitral. 3-5

1. Introducción

1.1 Antecedentes

El Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) contrató a la empresa Camacho y Mora S.A. para el desarrollo del proyecto "Diseño de la rehabilitación de los puentes sobre los ríos Ciruelas y Salitral, Ruta Nacional No.27".

El proyecto consiste en el diagnóstico de la condición actual (inspección detallada), topografía y el diseño y especificaciones de las obras de intervención de los puentes sobre los ríos Ciruelas y Salitral de la RN.27. Como parte de los estudios preliminares se incluye el estudio de amenaza sísmica, el cual es desarrollado en el presente informe.

El puente sobre el Río Ciruelas se ubica sobre la Ruta Nacional 27 en la estación 21+800 aproximadamente, en la provincia de Alajuela, cantón de Alajuela y distrito Guácima (ver Figura 1-1). Las coordenadas del puente corresponden a 84°16'23.50445" Longitud y 9°57'53.50399" Latitud.

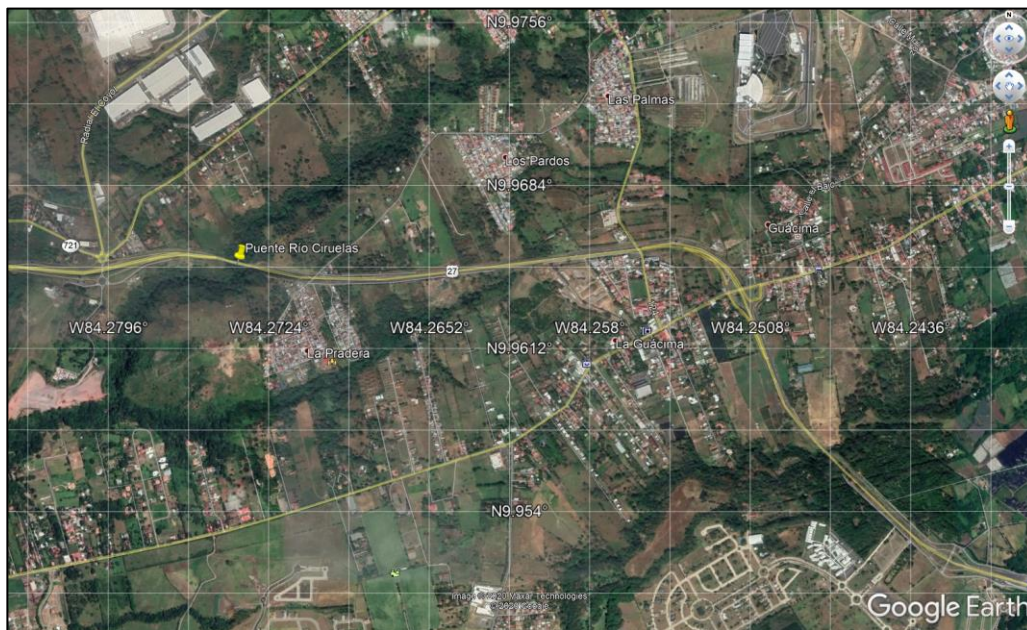


Figura 1-1. Ubicación del Puente sobre el Río Ciruelas.

Fuente: Google Earth, 2020.

El puente sobre el Río Salitral se ubica sobre la Ruta Nacional 27 en la estación 48+040 aproximadamente, en la provincia de Alajuela, cantón de Orotina y distrito Hacienda Vieja (ver Figura 1-2). Las coordenadas del puente corresponden a 84°28'51.9" Longitud y 9°55'08.2" Latitud.



Figura 1-2. Ubicación del Puente sobre el Río Salitral.

Fuente: Google Earth, 2020.

1.2 Alcance

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.

1.3 Limitaciones

El proyecto "Diseño de la rehabilitación de los puentes sobre los ríos Ciruelas y Salitral, Ruta Nacional No.27", no contempla la ejecución de un estudio de suelos o geofísica, por lo que las características del sitio de cimentación son obtenidas de los planos constructivos.

2. Marco Teorico

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 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. Los estudios 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).

Así mismo existe una serie de estructuras ubicadas hacia el este de Costa Rica y Norte de Panamá, denominada Cinturón del Norte de Panamá (CDNP) y hacia el centro de Costa Rica una estructura de desgarre que se conoce como el Cinturo Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR).

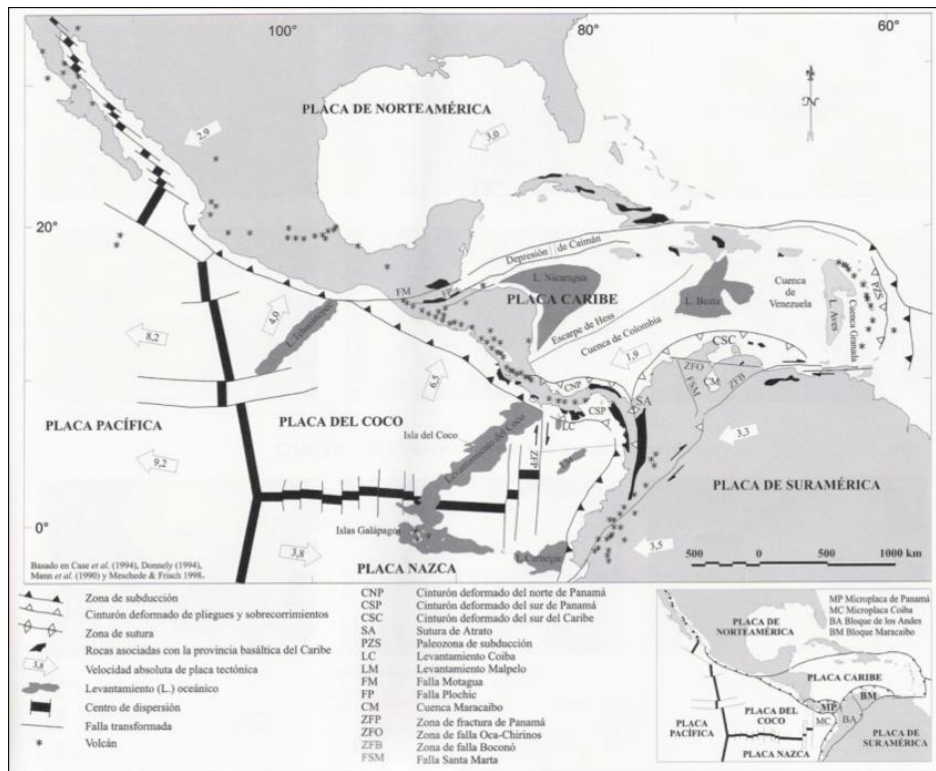


Figura 2-1. Placas y estructuras tectónicas principales en América Central.

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 (CEPREDENAC), en el cual, como parte de los objetivos del trabajo, se hace una caracterización de los sismos mayores ocurridos en Costa Rica desde 1772.

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.

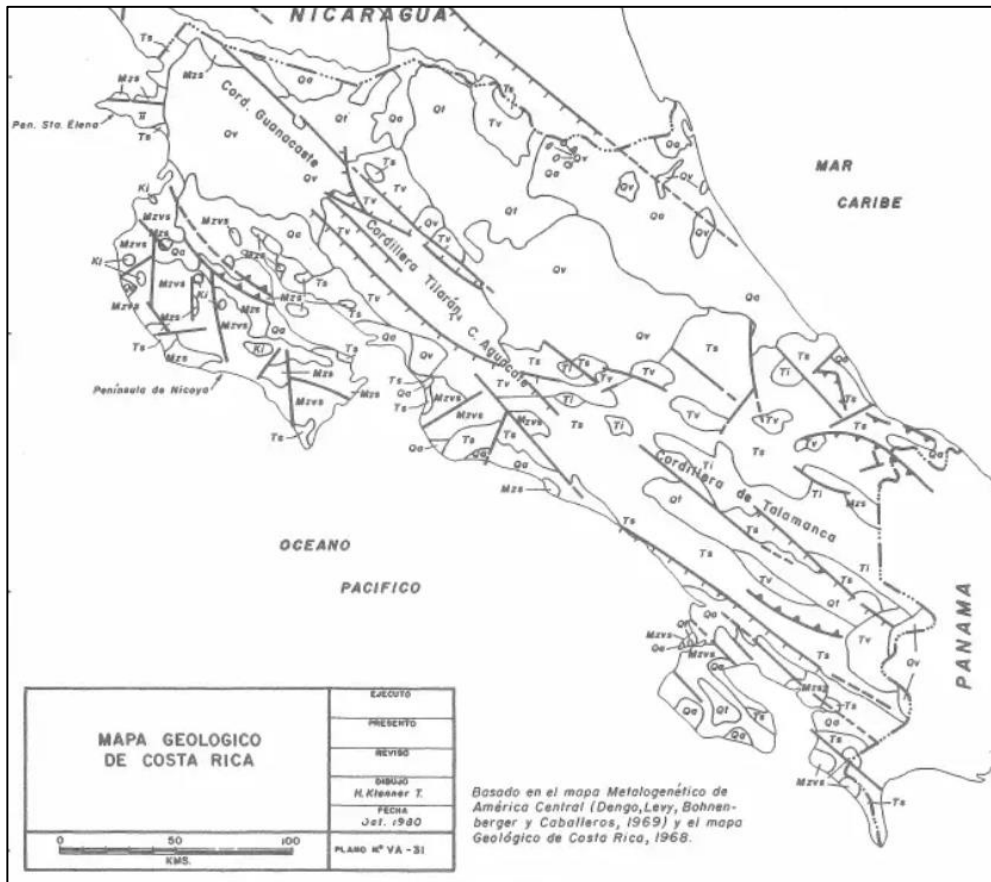


Figura 2-2. Mapa geológico de Costa Rica

Fuente: Castillo, 1993.

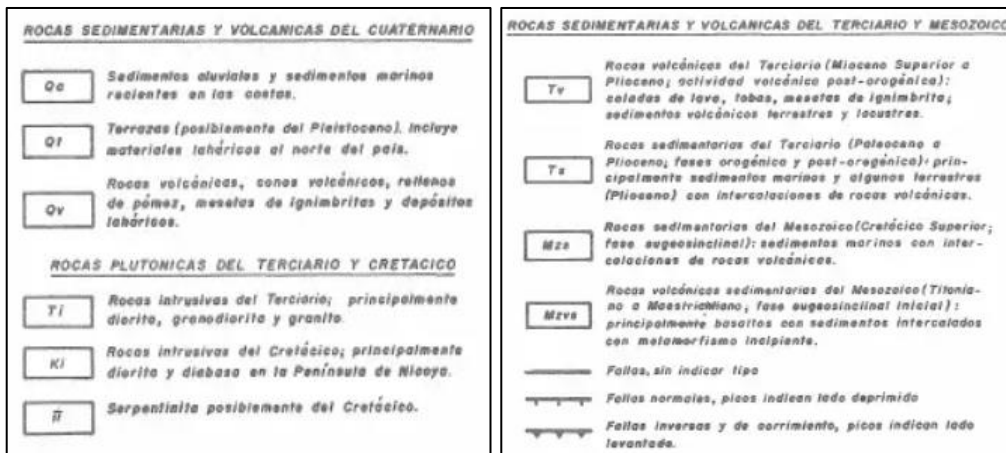


Figura 2-3. Leyenda y simbología del mapa geológico de Costa Rica

Fuente: Castillo, 1993.

Tanto el puente sobre el río Salitral como el Ciruelas se encuentran dentro de la hoja cartográfica río Grande, cuya geología fue caracterizada por Arias (2011). Según esta caracterización el puente sobre el río Salitral se encuentra sobre la formación Orotina y el puente sobre el río Ciruelas sobre la formación Depósitos de Avalancha Ardiente.

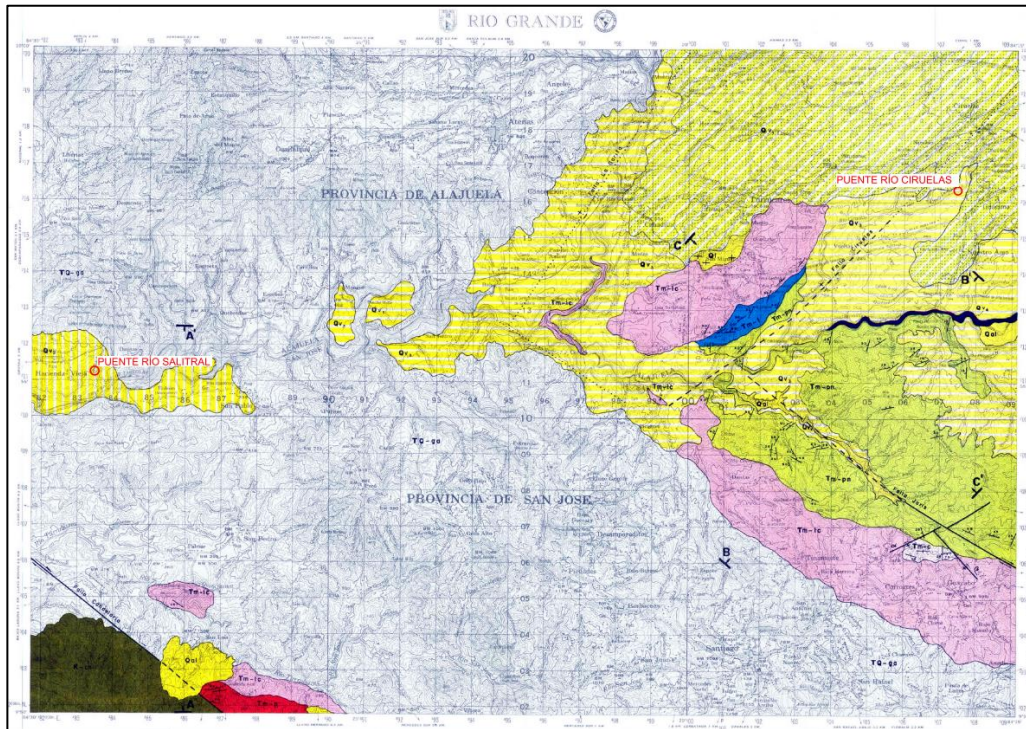


Figura 2-4. Geología de la hoja Río Grande

Fuente: Arias, 2011.

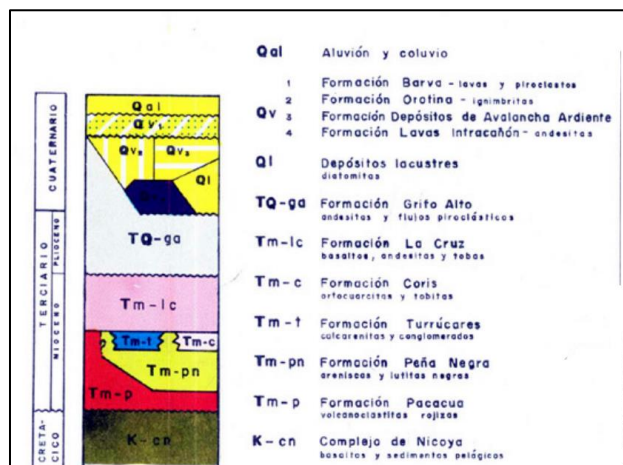


Figura 2-5. Leyenda y simbología de la geología de la hoja Río Grande

Fuente: Arias, 2011.

2.1.2 Geología Local

Según el estudio realizado por Porras (2012) la zona en la que se ubican los proyectos constituye una región tectónica intra-montaña, identificando la ubicación en las cercanías del puentes sobre el río Salitral una unidad litológica montañosa predominante y en las cercanías del puente sobre el río Ciruelas una unidad de planicie intermontaña.

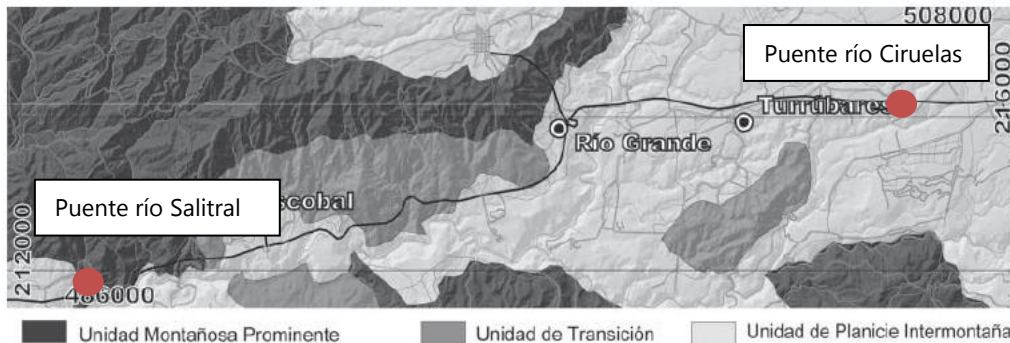


Figura 2-6. Mapa Geomorfológico

Fuente: Porras, 2012.

La unidad litológica montañosa predominante corresponde a los relieves positivos de los Montes del Aguacate, los cuales corresponde a relictos volcánicos constituidos por rocas del Plioceno, identificadas por Pérez (2000) como la formación Grifo Alto. Las morfo-estructuras presentan formas agudas y pendientes abruptas, producto de fuerte tectonismo y de alteración hidrotermal, que favorece deslizamientos.

La Formación Grifo Alto que está definida por Denyer y Arias (1991) como las rocas volcánicas no basculadas y del Plioceno, característicamente expuesta en los montes del Aguacate. En la zona de la quebrada Salitral se logra entrever la estructura interna de un antiguo estratovolcán, observándose, además, gran cantidad de mesobrechas volcánicas, coladas de lava y diques.

En el la zona del Puente sobre el río Salitral La formación Grifo Alto la sobryace la formación Orotina, cuyo origen se daría en el cuaternario y es descrita por Pérez (2000) como ignimbritas de color gris celeste, con *fiammes* de obsidiana, bombas escoriáceas negras de tamaño centimétrico, pómez amarillentas alargadas, con una matriz tobácea fina, que contiene plagioclasa y piroxenos.

Según Denyer y Arias (1991), en las cercanías del kilómetro 47 de la Ruta Nacional 27, se observa una zona de profusa alteración hidrotermal con fuerte olor sulfurado, con rocas color café, anaranjados y grises con tonos azulados, en donde se logra reconocer la roca

madre, lavas algo basculadas y quizás rocas piroclásticas. Esta zona, pudo haber sido parte de un acuífero geotermal fósil en ebullición o de fase vapor.

La unidad de planicie intermontaña es una zona donde se origina la acumulación de materiales de deposición rápida. Los depósitos son cuaternarios y destacan los depósitos epivolcánicos del tipo debris Flow/debris avalance, con un considerable desarrollo areal y las ignimbritas con un área reducida y limitada al occidente del cañon del río Grande de Tarcoles.

En la zona del puente sobre el río Ciruelas, estos depósitos dan paso a la formación Depósitos de Avalancha Ardiente, conocida también como formación Tiribí, que corresponde a ignimbritas con disyunción columnar. Según Pérez (2000), presentan textura eutaxítica y están conformadas por gran cantidad de *fiammes* de obsidiana y líticos lávicos en una matriz vidriosa color gris claro a negro, rica en cristales de plagioclasa.

Esta formación sobreyace a la mayoría de las formaciones previas, existiendo sectores en la que se presentan unidades de depósito de flujos piroclásticos, separadas por tobas y por depósitos de retrabajo, que corresponden a arenas guijarrosas no consolidadas, compuestas por vidrios, pómez negra y clastos de lava.

En las cercanías del puente sobre el río Cirualeas, también se presenta la formación Barva, la cual está constituida por lavas andesíticas fracturadas, con un potencial de acuífero de medio a alto. Dicha formación origina acuíferos libres fracturados en rocas volcánicas y estas están cubiertas por depósitos de lahares, tobas y cenizas meteorizadas.

Según Arias (2011), las formaciones anteriormente descritas están subyacidas por las siguientes formaciones:

- Formación La Cruz: Formación del mioceno, conformado por basaltos, andesitas y tobas
- Formación Coris: Formación del mioceno, conformado por ortocuarcitas y tobitas
- Formación Turrucare Formation del mioceno, conformado por calcarenitas y conglomerados
- Formación Peña Negra Formación del mioceno, conformado areniscas y lutitas negras
- Formación Pacacua: Formación del mioceno, conformado volcanociastitas rojizas
- Formación Nicoya: Formación del Cuaternario, conformado por basaltos.

Con base en la información disponible en los planos constructivos existentes de ambos puentes, se puede realizar una descripción estratigráfica de cada uno. En la figura 2-7 y 2-8 se presenta la estratigrafía del puente sobre el Río Salitral y el Río Ciruelas respectivamente, que consta de perforaciones por estructura.

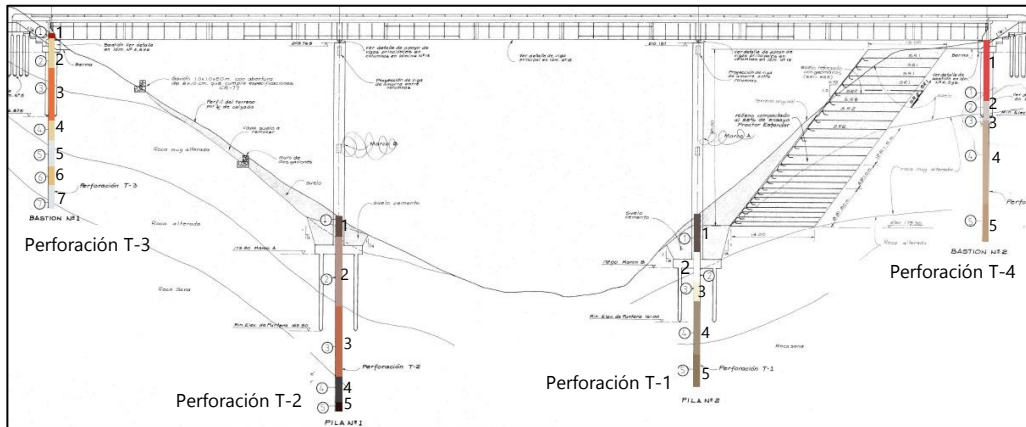


Figura 2-7. Perfil estratigráfico del puente sobre el Río Salitral

Cuadro 2-1. Estratigrafía del puente sobre el Río Salitral

Perforación T-3			Perforación T-1		
Estrato	Prof.	Descripción	Estrato	Prof.	Descripción
1	0.00-0.50	Fragmentos de lava basáltica	1	0.00-5.50	Limo arenoso color café y gris
2	0.50-5.50	Fragmentos de lava basáltica color crema	2	5.50-11.5	Toba color blanco
3	5.50-14.5	Toba muy alterada color naranja-morado.	3	11.5-14.5	Toba ignimbríta blancuzca
4	14.5-18.0	Fragmentos de lava basáltica color crema	4	14.5-23.5	Lava muy alterado color café claro
5	18.0-22.5	Toba ignimbríta color gris blancuzco	5	23.5-30	Lava andesítica alterada de color café claro
6	22.5-25.5	Fragmentos de lava basáltica color cremosa			
7	25.5-30.0	Toba ignimbríta color gris blancuzco			
Perforación T-2			Perforación T-4		
Estrato	Prof.	Descripción	Estrato	Prof.	Descripción
1	0.00-3.50	Limo arenoso color café	1	0.00-10.0	Arcilla color rojiza, con trazas de arena
2	3.50-15.0	Toba muy alterada color café claro y blancuzca	2	10.0-13.5	Arcilla color café grisáceo
3	15.0-27.0	Toba ignimbríta color café claro	3	13.5-14.0	Arcilla color café grisáceo, con trazas de arena
4	27.0-31.5	Toba ignimbríta color gris oscuro	4	14.0-27.5	Arenisca calcárea color café claro con vestillas de calcita, con patinas de óxido de hierro.
5	31.5-33.0	Toba ignimbríta	5	23.5-30	Arenisca calcárea color café claro con vestillas de calcita

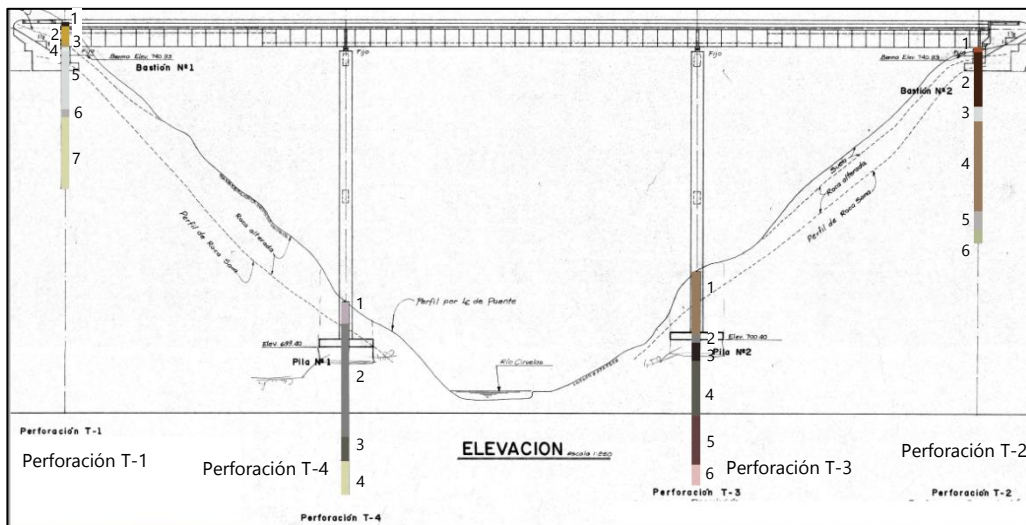


Figura 2-8. Perfil estratigráfico del puente sobre el Río Ciruelas

Cuadro 2-2. Estratigrafía del puente sobre el Río Ciruelas

Perforación T-1			Perforación T-4		
Estrato	Prof.	Descripción	Estrato	Prof.	Descripción
1	0.00-0.50	Suelo orgánico	1	0.00-3.25	Lava basáltica color gris y toba lapilíca
2	0.50-3.00	Limo color amarillento	2	3.25-19.5	Toba brechosa grisácea
3	3.00-4.00	Fragmentos de roca ignimbríta muy alterada de color café claro, con gran cantidad de suelo	3	19.5-22.5	Tobas lapilícas gris oscuro, con algunos bloques lávicos
4	4.00-5.50	Fragmentos de roca ignimbríta alterada de color gris claro	4	22.5-30.5	Lava basáltica con estructura brechosa color gris
5	5.50-12.5	Roca ignimbríta de color gris claro con fragmentos de vidrio volcánico			
6	12.5-13.5	Lava basáltica color gris claro			
7	13.5-23.5	Lava basáltica con estructura brechosa color gris claro, con matriz amarillenta			
Perforación T-3			Perforación T-2		
Estrato	Prof.	Descripción	Estrato	Prof.	Descripción
1	0.00-10.0	Toba brechosa café claro	1	0.00-0.5	Limo color café
2	10.0-11.5	Toba brechosa grisácea	2	0.5-8.0	Roca ignimbríta color gris oscuro
3	13.25-21.75	Toba brechosa gris oscuro	3	8.0-10.0	Roca ignimbríta color gris claro
4	21.45-28.5	Roca gris oscuro muy fragmentada hasta tamaño arenoso	4	10.0-24.0	Toba brechosa liroclástica color café claro
5	28.5-31.5	Fragmentos de lava gris claro y toba lapilítica gris oscuro	5	24.0-27.0	Lava basáltica escoriacea color gris claro con cristales de plagioclasa de hasta 2.5 cm
			6	27-28.5	Toba listoclástica gris clara, muy sana

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).

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).

En el centro de Costa Rica se define una región de deformación ancha denominada Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR), la cual se encuentra entre la placa del Coco y el Bloque de Panamá. En esta zona predomina las fallas de rumbo tipo dextral con rumbo NW a N-S (Montero, 2014). En costado Noreste de la Cordillera de Talamanca y el Caribe de Costa Rica, se localiza el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) que se caracteriza por fallas inversas y pliegues con rumbo NW (Montero, 2016).

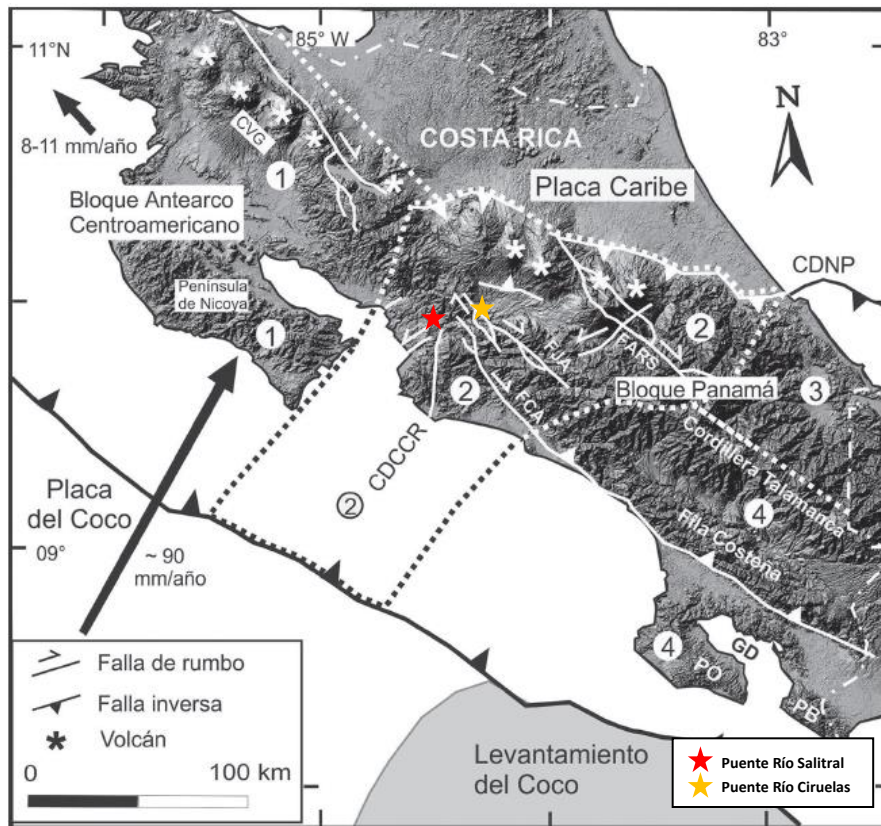


Figura 2-9. Marco Tectónico de Costa Rica.

Fuente: Montero, 2014

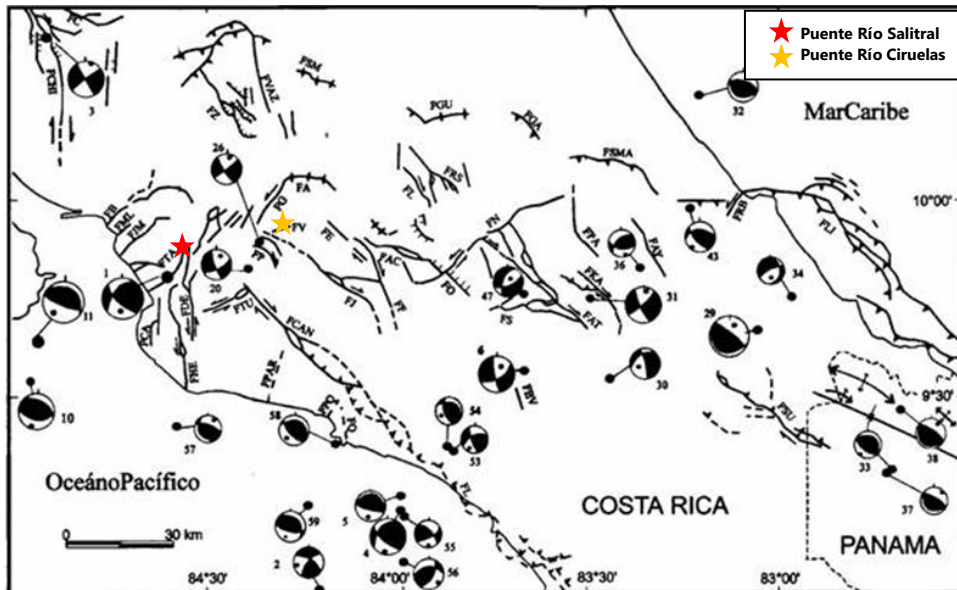


Figura 2-10. Fallas neotectónicas que definen el CDCCR.

Fuente: Montero, 2001

A continuación, se presenta un cuadro con el resumen de los principales sismos en Costa Rica, según el estudio desarrollado dentro del proyecto RESIS II y los datos de los sismos históricos de la Red Sismológica Nacional actualizado hasta setiembre del 2020.

Cuadro 2-3. 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 1822	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 que 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 ² . 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	6.0	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	6.0	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)
Subducción	12 de noviembre del 2017	VI	6.3	El sismo fue originado en el proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe, 22 km al sur de Jacó de Garabito. Frente al Pacífico Central costarricense el relieve de la placa del Coco se caracteriza por numerosos montes submarinos. La solución del mecanismo focal realizado por la RSN indica que este sismo fue ocasionado por fallamiento inverso. (Red Sismológica Nacional, 2020)
Subducción	17 de agosto de 2018	VI	6.2	El origen del sismo es el proceso de subducción de la placa del Coco, donde esta placa se hunde por debajo de la placa Caribe. El mecanismo focal sugiere que el sismo fue ocasionado por fallamiento inverso. El sismo fue percibido en gran parte del territorio nacional, además de las provincias de Chiriquí y Bocas del Toro en Panamá. Además, se detectaron 409 réplicas en Golfito. (Red Sismológica Nacional, 2020)
Fallamiento Cortical	12 de mayo de 2019	VII	6.0	El evento se generó a una profundidad estimada de 24km, en una zona donde el tope de la placa del Coco se encuentra probablemente a unos 30km de profundidad. El mecanismo focal indica un fallamiento de rumbo dextral. El sismo fue sentido en la gran parte del territorio nacional y en parte del territorio panameño, donde generó daños en viviendas y dejó personas heridas. (Red Sismológica Nacional, 2020)

Fuentes: Amenaza Sísmica en América Central, 2009

Sismos Históricos, Red Sismológica Nacional, www.rsn.ac.cr/actividad-sismica

2.2.2 Tectónica y Fallamiento Local

Entre las fallas que se encuentra en la zona de los puentes sobre el río Salitral y Ciruelas sobre la Ruta Nacional 27, se puede mencionar:

- Falla Purires
- Falla Zapote
- Falla Candelaria
- Falla Jaris
- Falla Picares
- Falla Tárcoles
- Falla Delicias
- Falla Tulín
- Falla Virilla
- Falla Garita
- Falla Alajuela
- Falla Escazú
- Falla Bajos de Jorco

A continuación, se describe cada una de las Fallas

2.2.2.1 Falla Purires

La falla está ubicada al suroeste del valle central principalmente en los cantones de Turrubares y Puriscal. Su longitud podrían alcanzar hasta 5 km de longitud según describen Montero y Rojas (2014).

En cuanto a su tipificación y geometría consiste en una falla de desplazamiento de rumbo con movimiento dextral, que a su vez se considera como una ramificación de la falla Candelaria. Montero y Rojas (2014), indican que su rumbo predominantes es N15°-30°W. En relación con su morfología, esta falla está asociada con un sistema de fallas importante, por lo que comparte características morfológicas con las fallas de Candelaria y Picagres. Sus trazas se extienden en ramificaciones que han generado distintas expresiones en el relieve del terreno. Una expresión clara se encuentra al sureste de la localidad de Purires donde se divide en dos trazas. Al oeste, sobre la traza se encuentra un escarpe facetado al noreste. Al sur de Grifo Alto, a lo largo de la divisoria de aguas, existen varios desvíos, escarpes de falla facetado hacia el este, quebradas descabezadas, bermas de falla y valles lineales. En los alrededores de Guatuso de Puriscal, existen cerca de dos o tres trazas con un ancho de 75 m, sobre éstas, existen desvíos y rupturas en el perfil de equilibrio de las quebradas. En el cañón del río San José, este se desvía entre

ambas trazas y es paralelo a la traza oeste. Al suroeste de Santa Marte de Puriscal, se unen formando una estructura transitiva, y al sur, se puede observar un lomo de falla al margen izquierdo del río Quivel.

En 1990 el terremoto de Cóbano desencadenó una serie de sismos que activaron otras fallas entre ellas, la falla Purires. A lo largo de dos décadas se ha registrado actividad importante que inició a finales de marzo de 1990, se destaca el terremoto de Cortezal el 30 de junio de 1990 con magnitud de 5.1 Mw. Debido a esto, y que el registro de su actividad es reciente, se puede suponer que su potencial puede ser similar al sismo mencionado. Sin embargo, cálculos teóricos indican que podrían alcanzar hasta 6.6 Mw (fórmula de Ambrasey, 1986) y 7.0 Mw (fórmula de Bonilla, 1984).

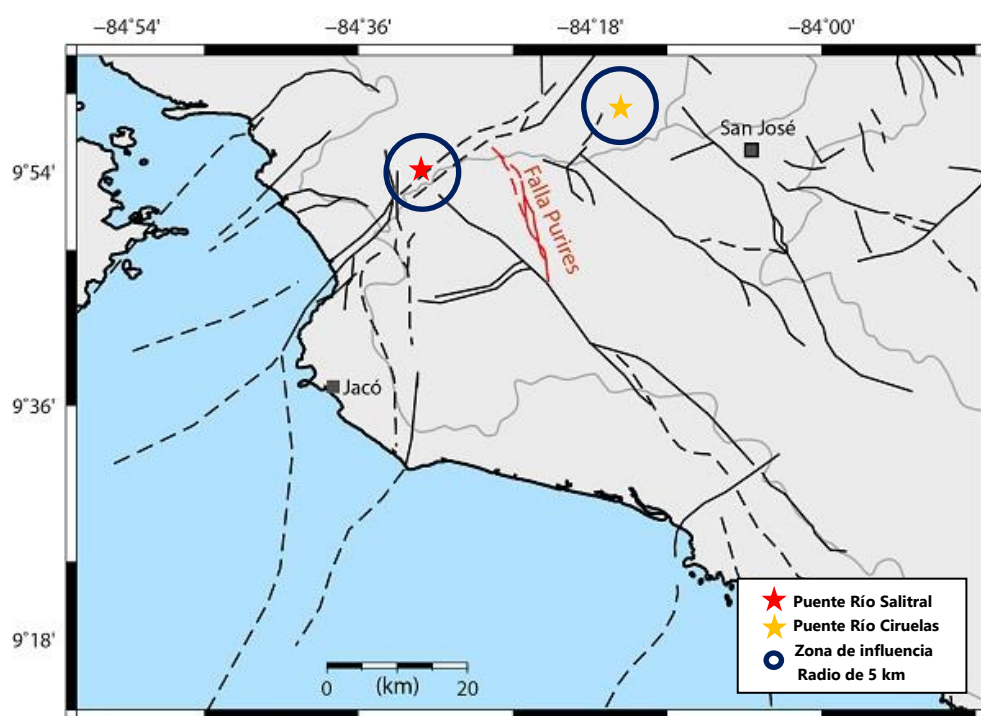


Figura 2-11. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Purires.

Fuente: RSN-ICE, 2020.

2.2.2.2 Falla Picagres

Se localiza al suroeste del Valle Central, dentro de los cantones de Puriscal y Mora, además es cercana a otras localidades como Picagres, Santiago, Charcón y Junquillo Abajo. Consiste en una falla en dirección noroeste con una extensión aproximada a los 30 km, que recorre desde el sur del poblado de Floralia de Puriscal hasta la zona de Piedra Negras de Mora.

En cuanto a su geometría y tipología consisten en un sistema de falla de rumbo noroeste y del tipo transcurrente dextral (Barquero y Boschini, 1991). En la zona norte y noreste de Puriscal la falla presenta dos traza que se extienden hasta el río Virilla y que limitan la estructura tectónica transtensiva de Charcón.

La falla presenta una cantidad considerable de elementos geomorfológicos. Entre ellos se pueden mencionar que las trazas en el río Virilla, al cruzar el río generan vueltas lineales en el cañón, generando un importante desplazamiento acumulado cercano a 1.3 km. En los taludes, de camino a la localidad de Dantas, son visibles fallas con estriaciones y se aprecian evidencias como valles lineales, escarpes facetados y causes de riachuelos desviados. Al este, la falla cruza el río Jaris, por lo que es visible una cascada y además cruza con la fila Bedoya donde son visibles los valles lineales. Hacia el margen del río Picagres se encuentra un escarpe facetado al suroeste de hasta 200 m de altura.

La falla ha registrado sismicidad inducida por los dos terremotos de Cóbano del 25 de marzo de 1990 que registraron magnitudes de 7.0 Mw. La falla registró un enjambre sísmico con magnitudes alrededor de 4.0 Mw y se destaca un evento mayor con magnitud de 6.0 Mw con epicentro en el extremo norte de la falla. Esta falla ha presentado actividad importante en las últimas 3 décadas, por lo que su potencial en cuanto a cálculos teórico indican que los sismos podrían alcanzar magnitudes entre 6.7 Mw y 7.0 Mw.

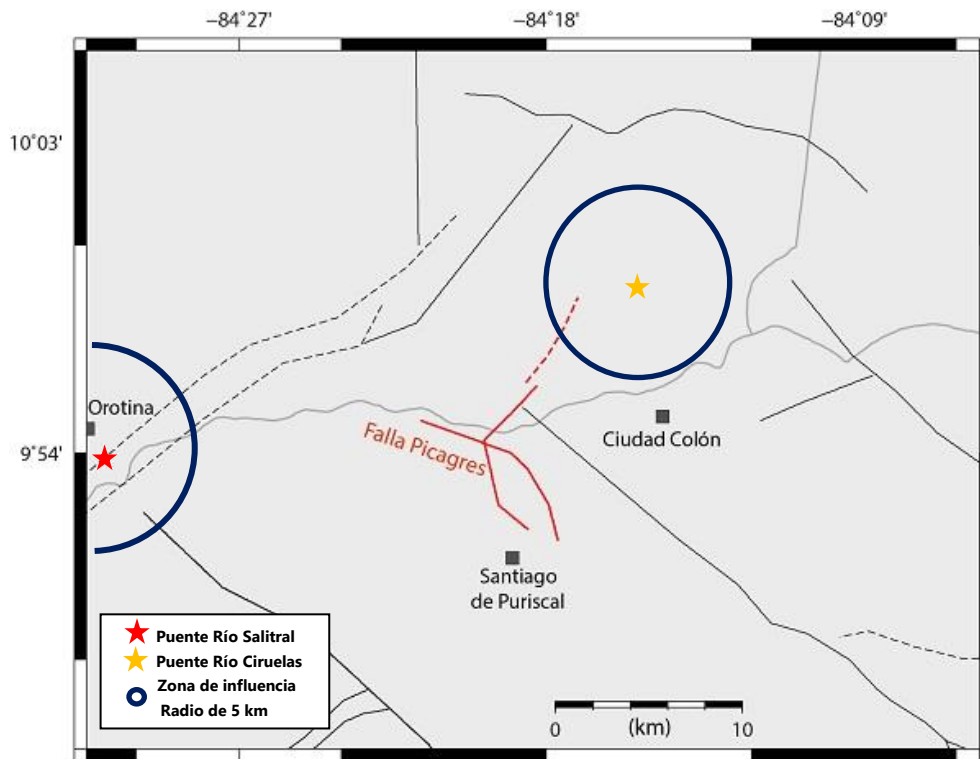


Figura 2-12. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Picagres.

Fuente: RSN-ICE, 2020.

2.2.2.3 Falla Zapote

Se encuentra al noroeste de la ciudad de Santiago de Puriscal, rodeada por las fallas de Purires (oeste) y Picagres (este). Montero y Rojas (2014), la describieron por primera vez afirmando que presenta dos trazas, la primera al oeste de aproximadamente 12 km de longitud y la segunda con una extensión de 4 km.

Montero y Rojas (2014) la consideran como un ramal de la falla Picagres, es de tipo dextral con componente normal y orientación NW. Sobre la morfología Montero y Rojas (2014) destacan que la traza oeste es dextra-normal con un escarpe persistente hacia el este. Esta componente normal genera que el sector oriental se encuentre deprimido. A su vez, la componente dextral es evidenciada por desvíos de quebradas y divisorias.

Se considera como potencialmente activa, e incluso existen indicios de haber tenido actividad menor en la secuencia sísmica de Puriscal en 1990. Su potencial sísmico podría generar terremotos de hasta 6.4 Mw según la relación de Anderson (1996), (Rodríguez, 2017).

2.2.2.4 Falla Virilla

Se localiza al noreste del poblado de Picagres. Al sur colinda con las fallas Jaris y Picagres, y al oeste se ubica la falla La Garita. Distintos autores suponen longitudes que rondan entre 7km y 10 km (Rodríguez, 2017).

La falla Virilla se orienta aproximadamente $N45^{\circ}E$ y es de tipo sinestral, con un plano de falla de fuerte inclinación. Además, sugiere una componente normal para la falla Ciruelas con su bloque noroeste levantado. Se ha considerado que se trata de una falla con expresión morfológica débil (Montero, 2001).

Se considera como una falla neotéctónica, potencialmente activa con fuertes evidencias de movimiento Cuaternario. Además, Montero (1999), infiere que pudo presentar actividad en la secuencia sísmica de Puriscal en 1990. La falla Virilla cuenta con un potencial sísmico para generar terremotos de magnitud 6.0 Mw (Rodríguez, 2017).

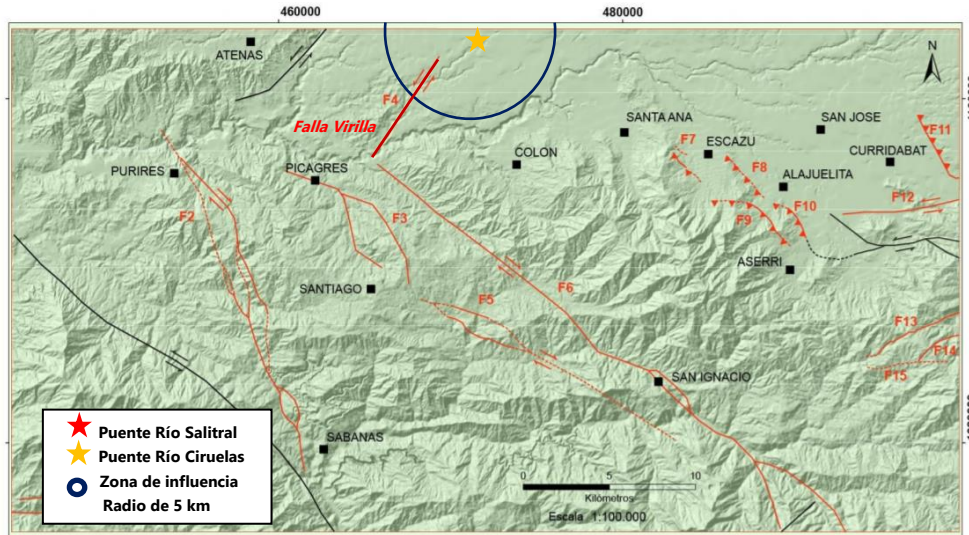


Figura 2-13. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Virilla.

Fuente: Rodríguez, 2017.

2.2.2.5 Falla Candelaria

Se encuentra ubicada entre la costa este del Golfo de Nicoya y el borde suroeste del Valle Central. Está alineada con los Ríos Cajón y Grande de Candelaria. Su longitud alcanza los 85 km.

Es una falla de desplazamiento de rumbo dextral transcompresiva orientada NW-SE y con buzamiento subvertical, según describen Arias y Denyer (1991). En cuanto a su historia no existen registros de sismos destructivos asociables a la falla. Los sismos de mayor importancia en su cercanía corresponden al enjambre sísmico de Puriscal en 1990.

No obstante, se han registrados sismos con epicentros cercanos a la falla y con mecanismos focales que podrían corresponder a esta. La falla zapote tiene el potencial de generar sismos de hasta magnitud 6.4 Mw.

Con respecto a su potencial, en función de su longitud y geometría podría generar terremotos de hasta 7.0 Mw.

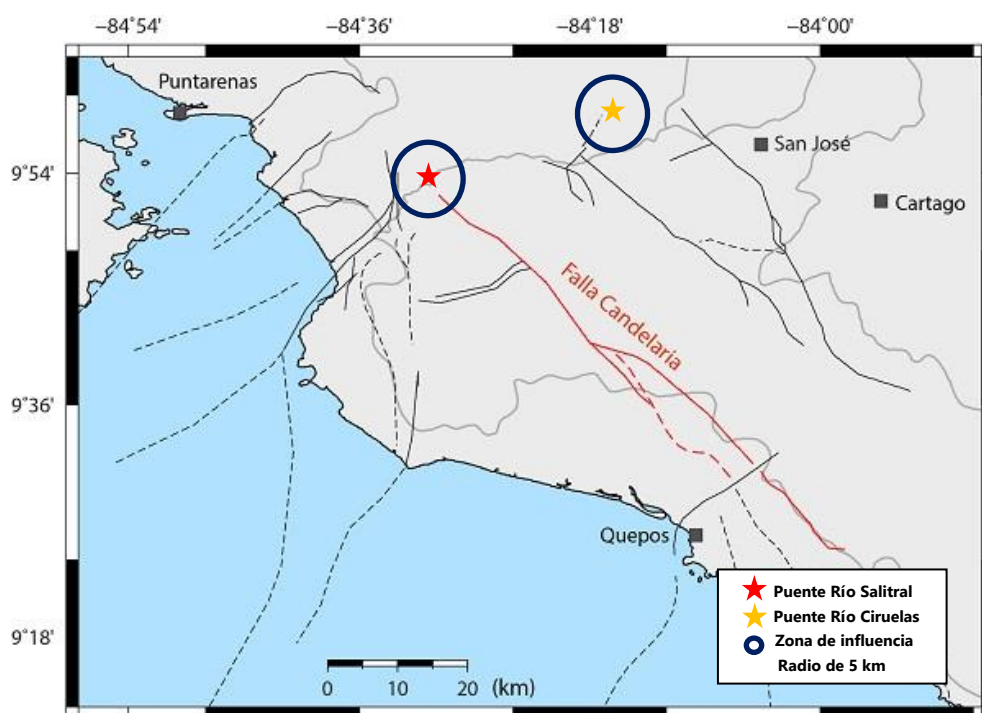


Figura 2-14. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Candelaria.

Fuente: RSN-ICE, 2020.

2.2.2.6 Falla Jaris

Se encuentra ubicada al suroeste del Valle Central. Su rumbo es noroeste y se extiende desde el distrito de Piedras Negras Mora, sigue al suroeste por Palmichal y San Ignacio de Acosta. Su traza continúa por el pueblo Monterrey de Aserrí hasta finalizar al sur de San Pablo de León Cortés. Según lo descrito por Montero y Rojas (2014), la falla se podría extender por unos 45 km.

En referencia a su topología y geometría se puede describir como una falla transcurrente con componente dextral, y delimita junto con la falla de Candelaria la zona sísmica de Puriscal. La misma presenta un movimiento predominante dextral, con un rumbo aproximado de 50° a 60° al noroeste.

Con relación a su expresión geomorfológica, la falla Jaris en su traza noroeste, se caracteriza por escarpes facetados principalmente al suroeste. Además, es una zona transitiva que se relaciona con un cambio de rumbo de oeste-noroeste a norte-noroeste, este fenómeno es característicos cerca de las localidades de Tabarcia y Palmichal. La traza esta, localizada al sureste de la comunidad de San Ignacio de Acosta se alinea con el río Candelaria a lo largo de una valle de falla, aquí se observa un facetamiento triangular en la margen izquierda según los descrito por Montero y Rojas (2014).

En las quebradas Mónica y Mina se observaron evidencias de actividad Holócenica. Los datos recopilados por a RSN (UCR-ICE) evidencia un número importante de sismo ocurridos a lo largo de la falla Jaris durante el años 1990. Con base en su longitud de 45 km, podría llegar a producir terremotos con una magnitud de 7.0 Mw.

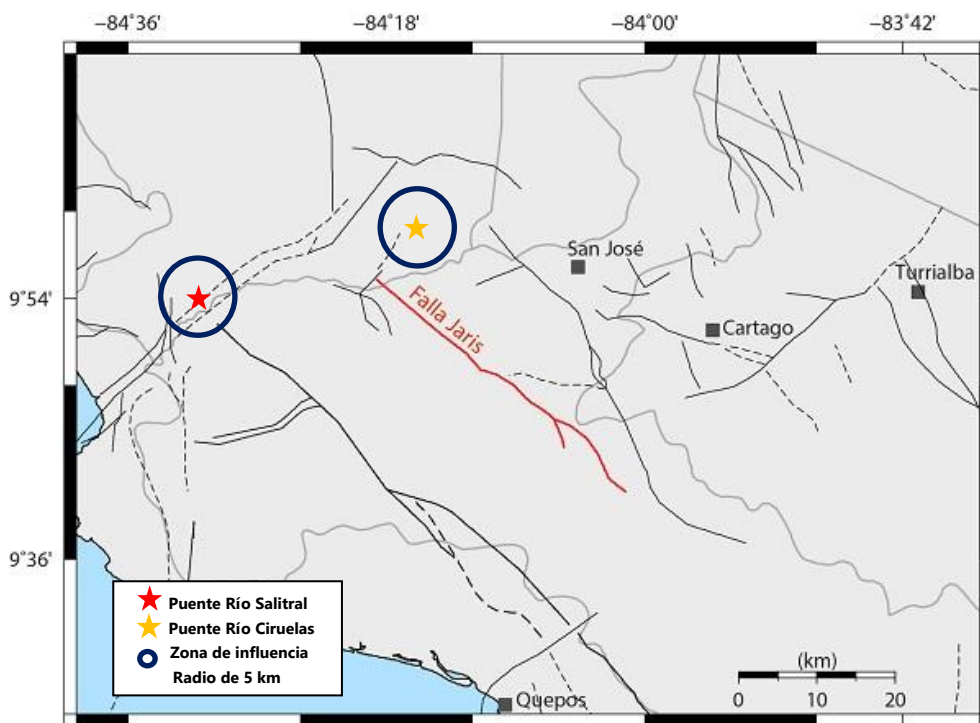


Figura 2-15. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Jaris.

Fuente: RSN-ICE, 2020.

2.2.2.7 Falla Tárcoles

Se localiza, como punto de partida, en el sector este del Golfo de Nicoya y se extiende por la zona de Tárcoles y Orotina hasta los Montes del Aguacate. Su traza recorre paralela al río Tárcoles, con una longitud de 60 km. Se considera una falla de desplazamiento de rumbo, donde su dirección varía de noreste a este-noreste, su movimiento sinestral.

Sobre su expresión morfológica se destacan desplazamientos de aluvión, desvío de drenajes, escarpes y contra escarpes facetados, disectados, cambios de tonalidad en la vegetación, desvío de divisorias, sillas de falla y cambios de pendiente que indican que es una falla reciente.

Según Denyer (1993) la falla tiene una edad cuaternaria. Entre los años 1990 y 1998 se ubicaron epicentros de sismos ubicados entre la falla Tárcoles y el sistema de falla Bijagual. Estudios sugieren como fuente sismogénica a la falla de Tárcoles para el terremoto de Orotina ocurrido el 4 de marzo de 1924, de magnitud 7.0 Mw que causó severos daños al oeste del Valle Central. En cuanto a su potencial se desconoce la tasa de velocidad de esta falla. Con base en su longitud podría causar sismos con una magnitud de hasta 7.2 Mw.

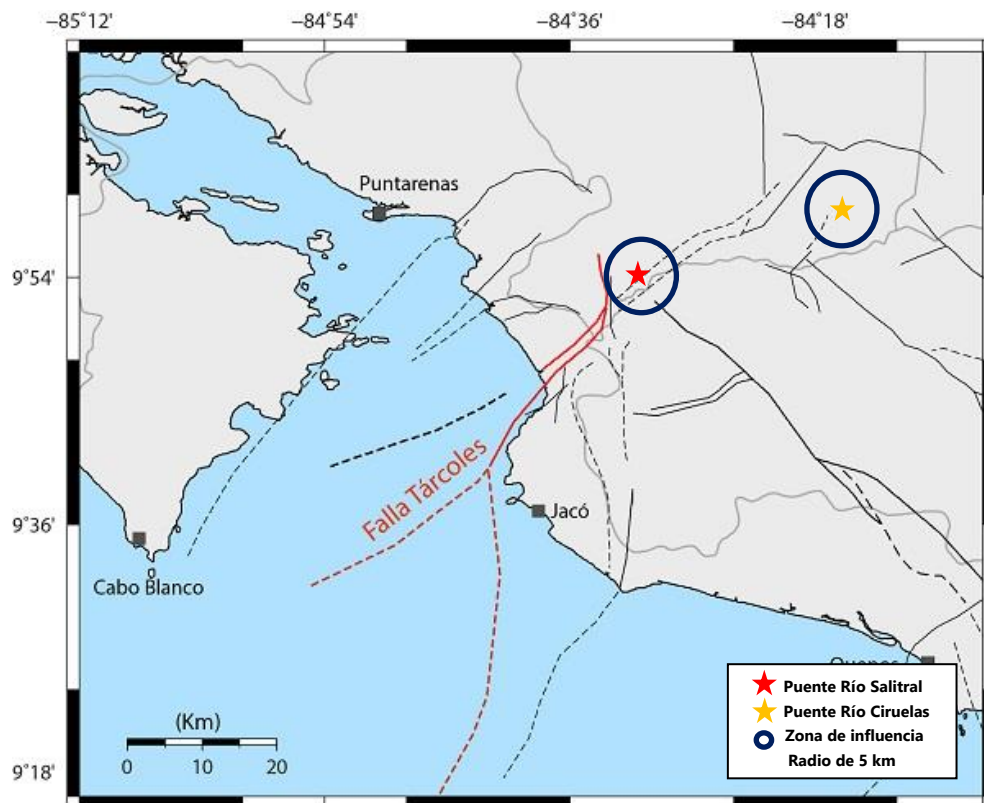


Figura 2-16. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Tárcoles.

Fuente: RSN-ICE, 2020.

2.2.2.8 Falla Delicias

Se encuentra en el Pacífico Central, dentro de los cantones de Turubares y Parrita. La traza se extiende unos 40 km en tierra firme y se prolonga aproximadamente 30 km más hacia el sur oeste del piso oceánico. Presenta una orientación promedio norte-sur entre

el sur de Orotina y Punta Judas, a partir de este punto transcurre bajo el piso oceánico y sigue un rumbo suroeste. Montero (1998) indica que la falla presenta una inclinación subvertical con un movimiento transcurrente de tipo sinistral y transtensional.

En cuanto a su geomorfología, es clara en el valle del río Delicias, además su traza es identificable mediante fotografías área y mapas topográficos. Se podría relacionar el temblor de magnitud 4.7 del 26 de febrero de 1989 con la falla de Delicias o Pirrís. La falla presenta actividad neotectónica, al igual que las fallas de Candelaria y Tulín, en función de su longitud de 70 km y mediante las relaciones empíricas de Wells y Coppersmith (1994), la falla podría generar sismos de magnitud 7.0 en a escala Mw (Denyer y Arias, 1991).

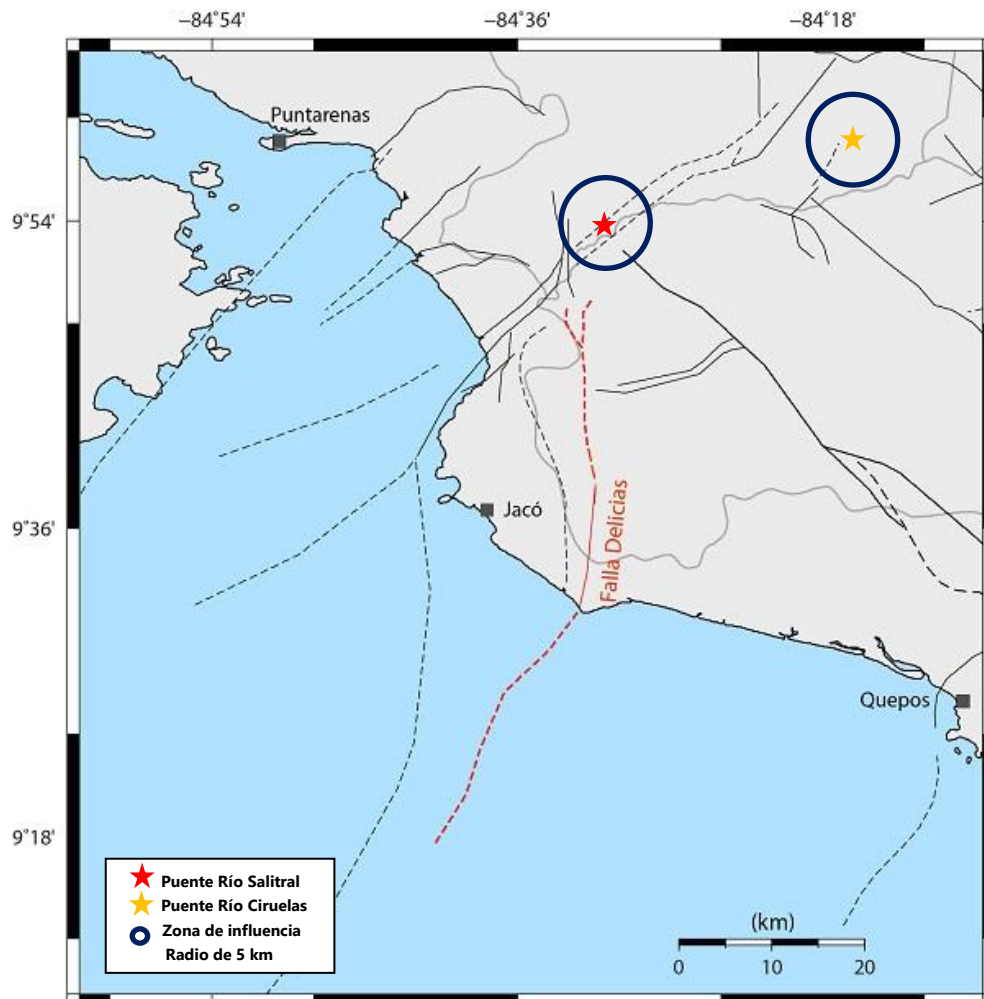


Figura 2-17. Ubicación de puentes ciruelas y Saltral en relación con la falla Delicias.

Fuente: RSN-ICE, 2020.

2.2.2.9 Falla Tulín

La falla se ubica en el cantón de Turrubares, al oeste de San José, iniciando al norte de la comunidad de Delicias, recorriendo hacia el este, pasando por la comunidad de Carmona y terminando cerca de la comunidad de Túfares. Su longitud es de 13 km aproximadamente.

En cuanto a su tipología y geometría, consiste en dos dallas paralelas que se extienden en dirección este-norte, limitada por la falla Delicias y la falla Candelaria. La falla Tulín consiste en una falla de rumbo sinestral con una componente de levantamiento al lado noroeste. Su morfología se expresa claramente en el valle del río Tulín, donde se alinea en una distancia de 5 km con el cauce del río.

Existe evidencia de actividad Cuaternaria, históricamente se ha mostrado pasividad sísmica, prácticamente si terremotos relevantes, sin embargo, se ha registrado microsismicidad en la zona cercana a esta falla. En función de su longitud, se estima que tiene el potencial para genera sismos de magnitudes entre 6 y 6.3 Mw.

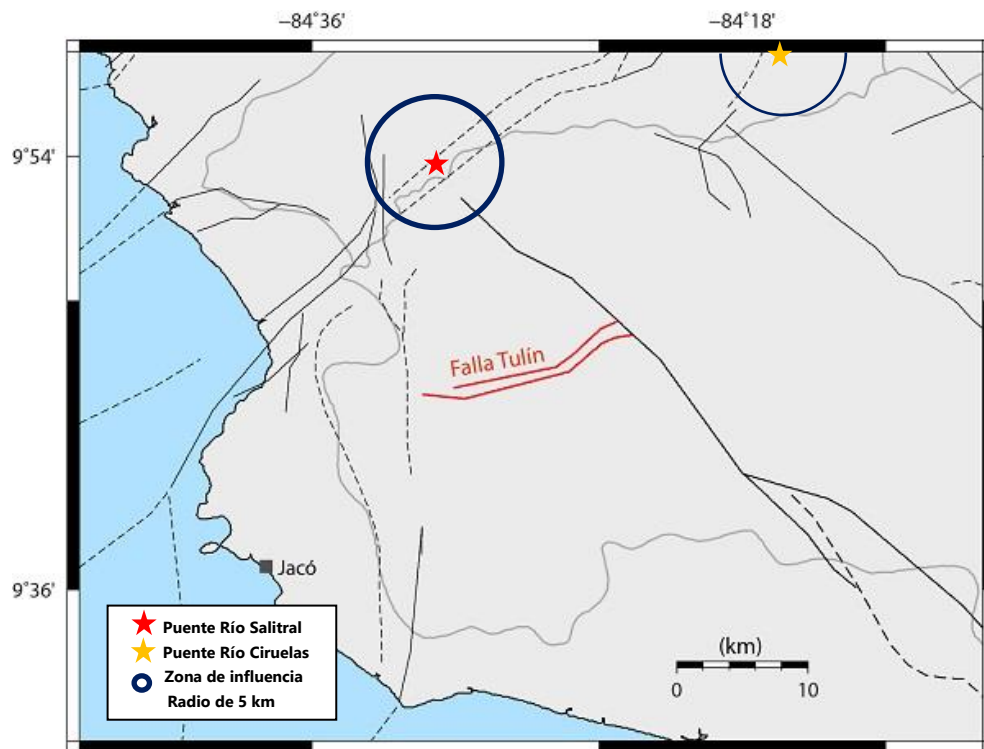


Figura 2-18. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Tulín.

Fuente: RSN-ICE, 2020.

2.2.2.10 Falla La Garita

Se ubica al oeste del Valle Central, se extiende del poblado de la comunidad de Río Grande de Atenas hasta la traza de la falla de Alajuela, en el sector sureste de Tacares de Grecia. Su longitud es de 16 km aproximadamente.

Consiste en una falla de desplazamiento lateral izquierdo de rumbo noreste, además se han observado desplazamientos sinestrales predominantes con desplazamientos normales e inversos subsidiarios (Montero, 1999). En cuanto a su geomorfología, se resalta que el cañón del río Grande tiene un trazo de valle línea y presenta una zona de falla ancha, fácil de observar en fotografías aéreas y mapas topográficos. Otras posibles evidencias geológicas de la falla consisten en una serie de cerros aislados con afloramientos de lavas de edades anteriores a la ignimbrita de 330 000 años.

Su traza afecta roca piroplásticas del Cuaternario con evidencia de que la falla ha estado actividad en los últimos 10 000 años, no se ha asociado ningún terremoto con esta falla. Su potencial sísmico podría alcanzar terremotos de magnitud de 6.4 Mw.

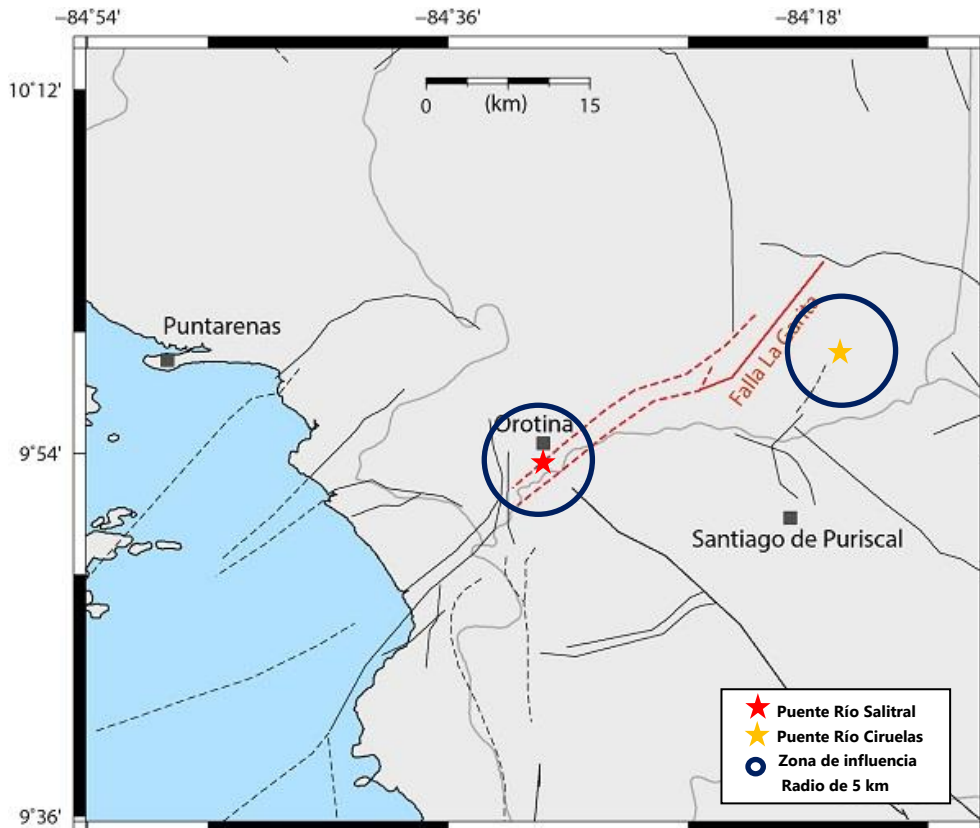


Figura 2-19. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla La Garita.

Fuente: RSN-ICE, 2020.

2.2.2.11 Falla Alajuela

Se extiende por las provincias de Heredia y Alajuela, recorriendo San Joaquín, Carillos de Poás y Grecia. Su longitud es de aproximadamente 20 km. Se considera como una falla inversa de bajo ángulo. Se expresa claramente en la morfología del terreno al originar un escarpe pronunciado, con altura entre 150 m y 200 m.

Se han asociado con esta falla dos sismos destructivos, el terremoto de Barba el 15 de febrero de 1772 y el de Fraijanes el 30 de octubre de 1888, además se han registrado enjambres de sismos con magnitudes inferiores a 4.0 Mw. Consiste en una falla activa, pues las rocas deformadas tienen edades del Pleistoceno Tardío y del Holoceno. Según sus condiciones geométricas, extensión y sismos históricos, esta podría generar terremotos de foco superficial con magnitudes de hasta 6.2 Mw.

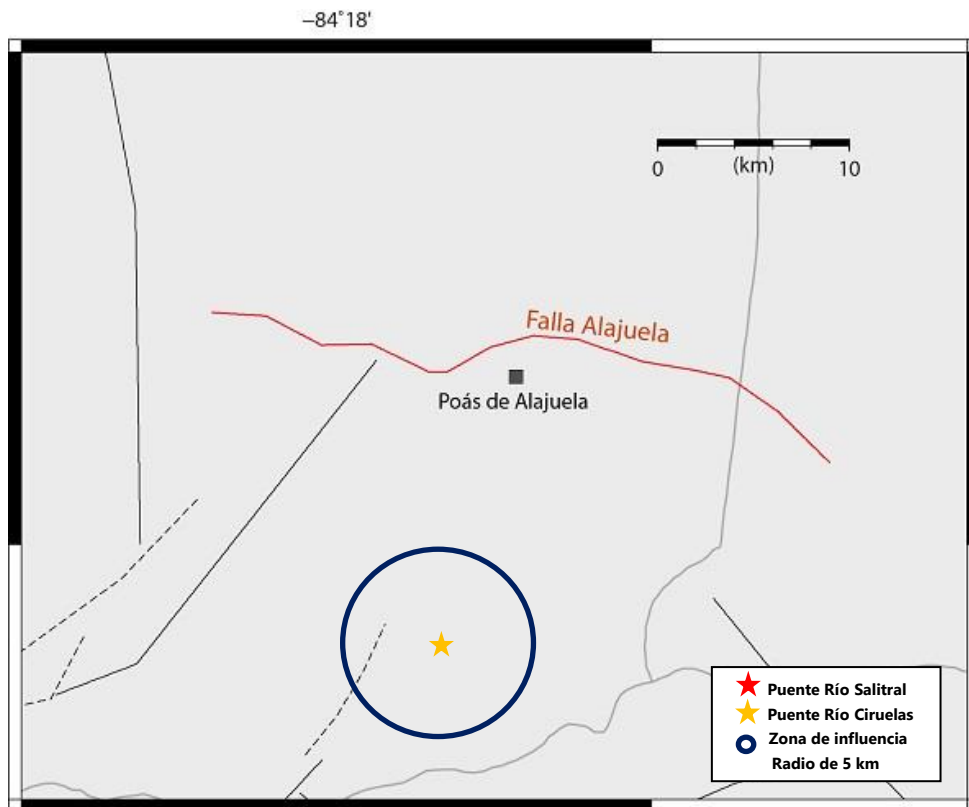


Figura 2-20. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Alajuela.

Fuente: RSN-ICE, 2020.

2.2.2.12 Falla Escazú

La falla Escazú con rumbo noroeste, se considera parte del sistema de falla predominante inversa, entre 5 y 6 km de longitud. El trazo se divide en dos sectores, el primero se

ubica al oeste y suroeste de Escazú se considera como activo, mientras que el que se localiza a noroeste de Escazú se estima como sugestivo de ser activos.

Algunas evidencias geomorfológicas del sector activo destacan, como: un prominente escarpe con rumbo entre norte-noroeste y noroeste. Además, hay varios niveles subhorizontales en la topografía del lado buzante de la falla. También, se ubica un cerro aislado que está separado de la morfología del escarpe por una posible silla de falla.

La sismicidad registrada al oeste del sector de la falla se ha atribuido al sector activo de esta, aunque no se le pueda relacionar con algún evento de forma directa. En cuanto a potencial sísmico, la Falla Escazú, tomando en cuenta su longitud puede generar un sismo de hasta magnitud de 5.5 Mw (LIS-UCR, 2019).

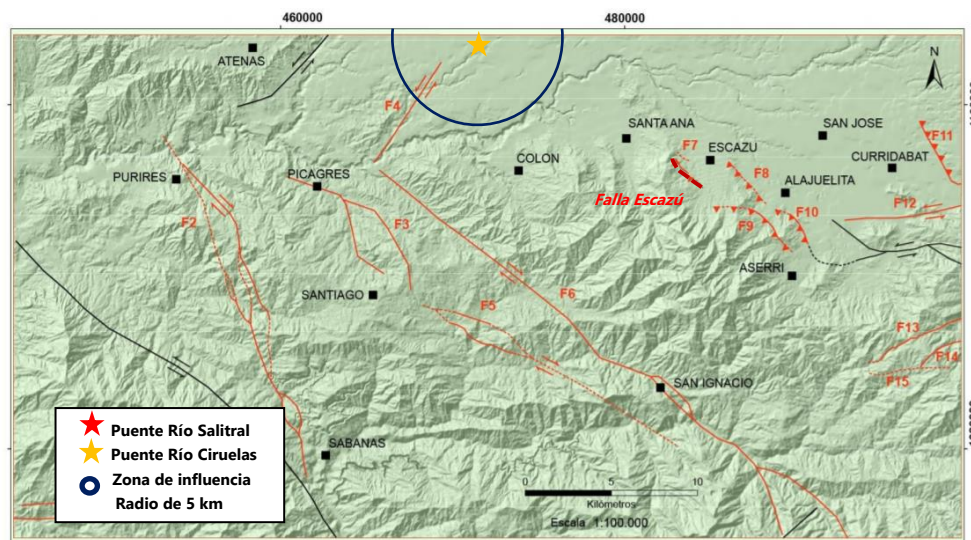


Figura 2-21. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Escazú.

Fuente: Rodríguez, 2017.

2.2.2.13 Falla Bajos de Jorco

Se localiza al este de la ciudad de Santiago de Puriscal, limitada por las fallas Picagres (noroeste) y Jaris (al noreste). Se ha descrito con una extensión de 16 km, recorriendo desde Santiago de Puriscal hasta el noreste de la comunidad de Bajos de Jorco.

Montero y Rojas (2014), la consideran de tipo dextral con orientación promedio N50°W e indican que poseen dos ramales localizados en el sector sureste de Santiago de Puriscal. Referente a su morfología, el sector donde la falla presenta dos ramales, su segmento norte cruza el río Tabarcia generando un aluvión represado, al cortar el río Viejo genera un desvío dextral de aproximadamente 100 m.

La falla de bajos de Jorco es considerada como potencialmente activa, además, se le atribuye alguna actividad sísmica menor durante la secuencia sísmica de Puriscal en 1990. Esta falla tiene el potencial para general terremotos de magnitud 6.5 Mw (Rodríguez, 2017).

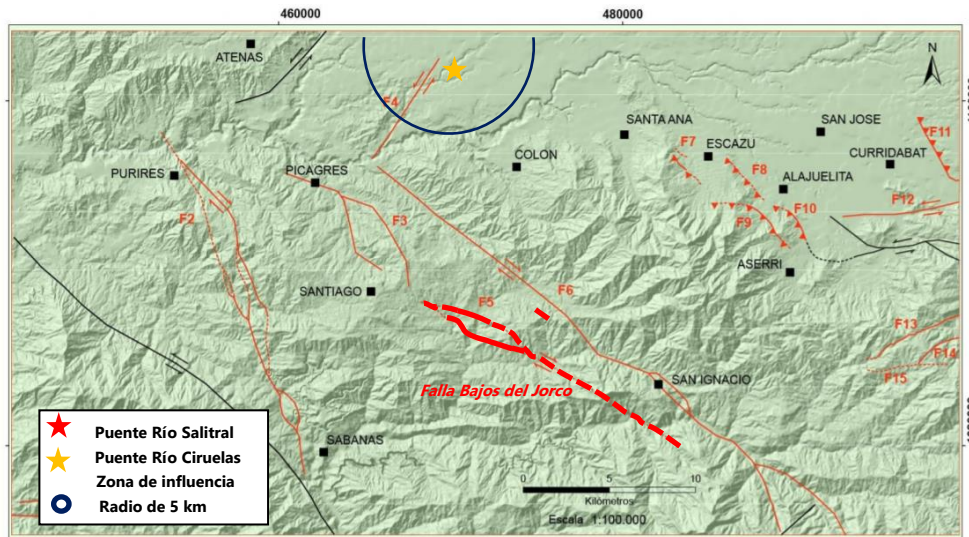


Figura 2-22. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Escazú.

Fuente: Rodríguez, 2017.

2.2.2.14 Falla Frailes-Pirris-Pangolín

Consiste en un sistema de falla que se ubica en la provincia de San José, inicia al suroeste de la ciudad de San José y finaliza en la comunidad de San Carlos de Dota. Su extensión es de aproximadamente 55 km. En cuanto a su tipología, corresponde a una falla dextral con componente normal y rumbo general noroeste-sureste (Denyer et al. 1998).

Respecto a su expresión geomorfológica, su traza es clara con fotografías aéreas y mapas topográficos, el bloque noroeste se presenta levantado con presencia de leves escarpamientos hacia al oeste y desvíos derechos de varias quebradas.

Según indica Montero (1998), corta depósitos Cuaternarios que rellenan el sur del Valle Central y han identificado varios microsismos que se alinean con esta falla. No se tiene registro de terremotos destructivos con esta falla y se considera una falla neotectónica. No obstante, en función de su longitud, mediante las relaciones empíricas de Wells y Coppersmith (1994), tendría la capacidad de generar un sismo de magnitud 7.0 Mw.

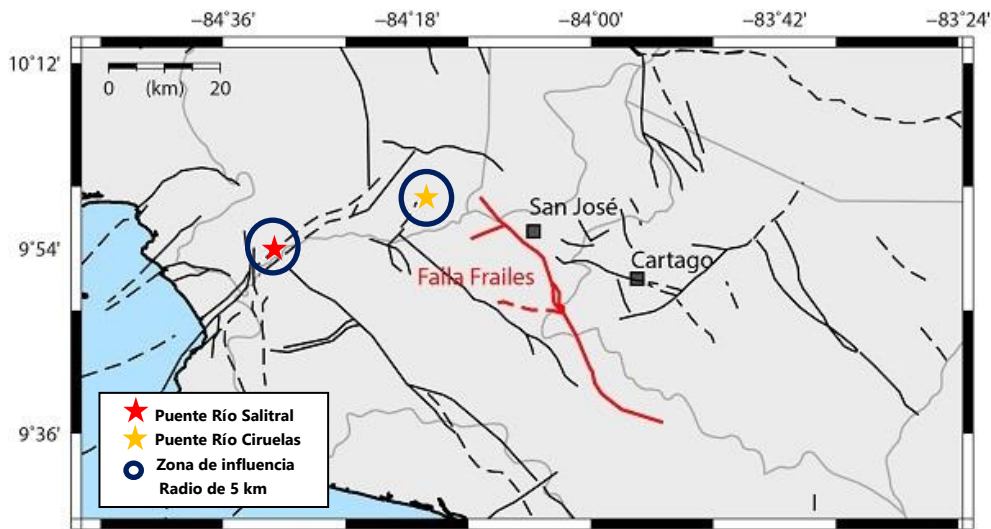


Figura 2-23. Ubicación de puentes ciruelas y Salitral en relación con la falla Frailes-Pirris-Pangolín.

Fuente: RSN-ICE, 2020.

Según los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes, se deben considerar los efectos de fallas cercanas cuando el sitio de puente se ubique a menos de 5 km de una falla activa, y que esta tenga potencial de generar un sismo con magnitud $M_w = 6.5$ o mayor, en el siguiente cuadro se resumen las fallas con cercanía de 5km de los puentes.

Cuadro 2-4. Fallas con cercanía de 5 km a los sitios de puentes.

Nombre del puente	Falla	Potencial sísmico (M_w)
Puente sobre Río Ciruelas	-	-
Puente sobre Río Salitral	Candelaria	7.0
	Tárcoles**	7.2

**Se considera cercana al puente Río Salitral, pues la ubicación del puente en los mapas no es exacta.

2.2.3 Sismicidad de la Zona

En el cuadro 2-4 se enlistan los principales sismos registrados con M_w mayor o igual a 5.0 en un radio aproximado de 100km alrededor de la zona de estudio, desde 1800.

Cuadro 2-5. Sismos con MW \geq 5.0, en los 100 km alrededor del área de estudio.

Año	Mes	Día	Hora (UTC)	Minuto	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Magnitud (M _w)
1821	4	10	0	0	9.830	-84.080	10	5.5
1827	4	3	0	0	10.000	-85.500	50	7.4
1834	6	0	0	0	9.840	-83.950	10	5.0
1835	6	10	0	0	10.130	-84.190	5	5.4
1841	9	2	12	30	9.840	-83.950	10	6.3
1842	3	21	0	0	9.867	-84.102	10	5.8
1853	08	24	00	00	10.420	-84.900	10	5.5
1853	9	8	0	0	10.000	-85.500	50	7.4
1863	12	9	0	0	10.000	-85.500	40	7.3
1881	6	9	0	0	11.000	-84.000	130	6.4
1888	12	30	10	12	10.138	-84.183	10	5.8
1888	12	30	10	20	10.130	-84.175	10	6.0
1896	4	20	13	16	9.880	-83.920	10	5.2
1900	6	21	20	52	10.000	-85.500	50	7.2
1905	1	20	18	23	9.850	-84.680	45	7.0
1910	3	10	21	9	9.600	-84.000	45	5.2
1910	4	13	6	37	9.830	-84.030	10	5.9
1910	4	13	7	5	9.835	-84.027	12	6.1
1910	5	5	0	47	9.840	-83.910	9	6.4
1911	8	29	4	6	10.210	-84.280	8	6.1
1911	10	10	13	37	10.600	-84.916	10	6.3
1912	2	21	8	15	9.950	-83.967	5	5.7
1912	6	6	6	12	10.167	-84.283	10	5.6
1916	4	24	8	2	10.100	-84.750	50	7.0
1924	3	4	10	7	9.833	-84.558	15	7.0
1933	3	22	16	15	9.920	-83.730	10	5.2
1936	11	26	2	12	10.700	-84.100	130	6.0
1939	6	18	16	46	10.000	-84.900	70	6.5
1939	12	21	20	54	10.140	-84.630	75	7.3
1939	12	22	4	43	9.800	-84.550	70	6.8
1939	12	23	17	11	9.700	-83.700	45	5.2
1939	12	26	21	49	9.990	-84.510	85	6.0
1940	10	5	14	38	9.500	-84.250	33	6.2
1940	10	27	5	35	9.750	-84.500	33	6.8

Año	Mes	Día	Hora (UTC)	Minuto	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Magnitud (M_w)
1941	12	6	1	25	10.500	-85.250	5	6.0
1944	8	22	12	28	9.500	-84.000	40	5.2
1947	12	30	1	55	9.800	-84.300	40	5.8
1948	11	19	1	4	9.917	-83.833	80	6.8
1950	10	5	16	9	10.100	-85.400	50	7.7
1950	10	5	16	48	10.410	-84.690	125	5.0
1951	6	18	17	44	11.000	-84.000	96	6.0
1951	8	22	5	41	9.833	-83.867	3	5.2
1952	5	13	19	31	10.300	-85.300	32	7.0
1952	9	9	12	54	9.200	-84.200	33	7.2
1952	12	30	12	7	10.016	-83.950	5	6.0
1954	3	27	18	41	9.550	-83.770	90	5.0
1955	9	1	17	33	10.228	-84.308	3	5.8
1956	7	19	23	38	9.520	-83.980	81	6.2
1957	2	4	9	1	9.460	-83.840	67	5.7
1959	1	13	8	34	9.460	-84.030	58	5.9
1959	6	4	1	57	9.550	-84.220	62	5.3
1959	7	4	1	57	9.540	-84.250	20	5.7
1961	2	27	15	44	9.940	-83.870	68	5.3
1961	5	23	3	40	9.800	-84.060	100	5.9
1961	5	23	3	43	9.750	-84.250	112	5.0
1965	11	12	08	59	10.680	-84.330	40	5.0
1971	8	5	22	58	9.574	-84.087	50	5.0
1973	4	14	8	34	10.460	-84.900	10	6.5
1973	8	4	0	44	9.836	-84.644	69	5.1
1974	2	28	20	20	9.510	-83.950	34	5.9
1974	09	27	04	12	10.350	-84.730	45	5.6
1976	07	17	02	06	10.129	-84.744	20	5.5
1976	11	25	6	45	9.799	-84.720	53	5.1
1976	12	1	14	15	9.978	-84.622	51	5.3
1978	1	4	22	52	9.527	-84.098	67	5.0
1978	8	23	0	50	9.670	-85.480	10	7.0
1982	8	17	18	24	9.558	-84.073	49	5.5
1983	7	3	17	13	9.490	-83.670	14	6.3
1983	8	26	0	8	10.140	-84.000	132	5.4
1988	3	2	7	13	9.774	-84.674	49	5.2

Año	Mes	Día	Hora (UTC)	Minuto	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Magnitud (M_w)
1990	03	25	13	16	9.540	-84.940	23	5.3
1990	03	25	13	16	9.540	-84.940	25	5.5
1990	3	25	13	22	9.590	-84.940	29	7.3
1990	3	25	21	35	9.552	-84.693	38	5.7
1990	03	27	14	52	9.538	-84.763	36	5.4
1990	6	30	14	51	9.867	-84.381	7	5.1
1990	7	23	5	27	9.473	-84.568	26	5.1
1990	8	30	22	20	9.764	-84.522	44	5.0
1990	12	22	17	27	9.892	-84.320	4	6.0
1991	3	16	6	2	10.130	-85.238	59	6.3
1991	4	22	20	6	9.700	-83.740	10	5.6
1991	4	22	20	7	9.770	-83.640	10	5.5
1991	04	22	22	08	9.794	-83.505	43	5.3
1991	04	24	19	12	9.440	-83.520	3	5.5
1992	3	7	1	53	10.100	-84.410	85	6.3
1993	7	10	20	40	9.806	-83.602	19	5.7
1994	12	28	21	22	9.561	-84.419	17	5.1
1996	9	4	19	6	9.384	-84.254	35	6.0
1998	05	29	11	30	10.053	-83.549	8	5.2
1998	11	29	14	30	9.972	-83.551	39	5.1
1999	8	20	10	2	9.258	-84.056	45	6.9
1999	12	10	18	46	9.617	-84.194	0	5.3
2000	7	21	1	53	9.418	-85.324	10	6.2
2003	10	17	0	8	9.773	-83.834	6	5.1
2004	11	20	8	7	9.469	-84.254	11	6.2
2005	12	28	15	27	9.741	-84.280	69	5.1
2009	1	8	19	21	10.202	-84.146	6	6.2
2009	11	13	21	20	9.627	-84.217	11	5.1
2010	05	20	22	19	9.400	-84.210	38	5.1
2010	6	1	3	26	9.426	-84.212	53	6.0
2010	10	9	1	54	10.319	-84.103	88	5.9
2011	5	13	22	47	9.914	-84.316	71	6.0
2015	3	31	9	9	10.163	-84.149	5	5.0
2015	4	3	18	42	9.523	-83.739	9	3.0
2016	12	1	0	25	9.943	-83.789	1	5.5

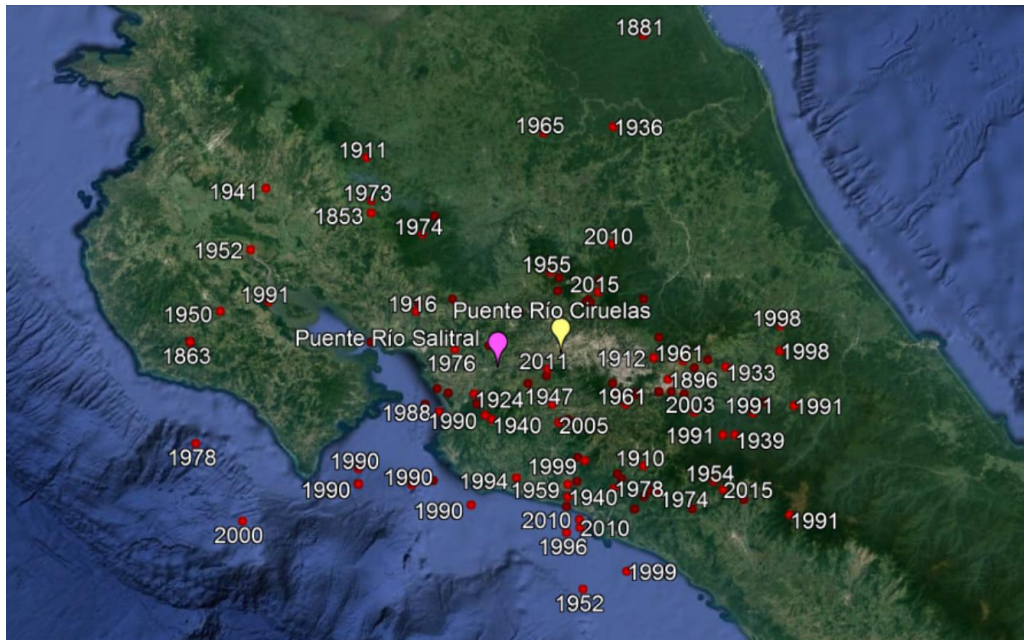


Figura 2-24. Ubicación de sismo cerca de la zona de estudio.

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

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 periodos 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° N - 13.0° N y 88.5° W - 81.5° 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 marinos y zonas adyacentes, 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 o 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).

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 los puentes sobre el Río Ciruelas y Salitral 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 8.0, 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 4s. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura.

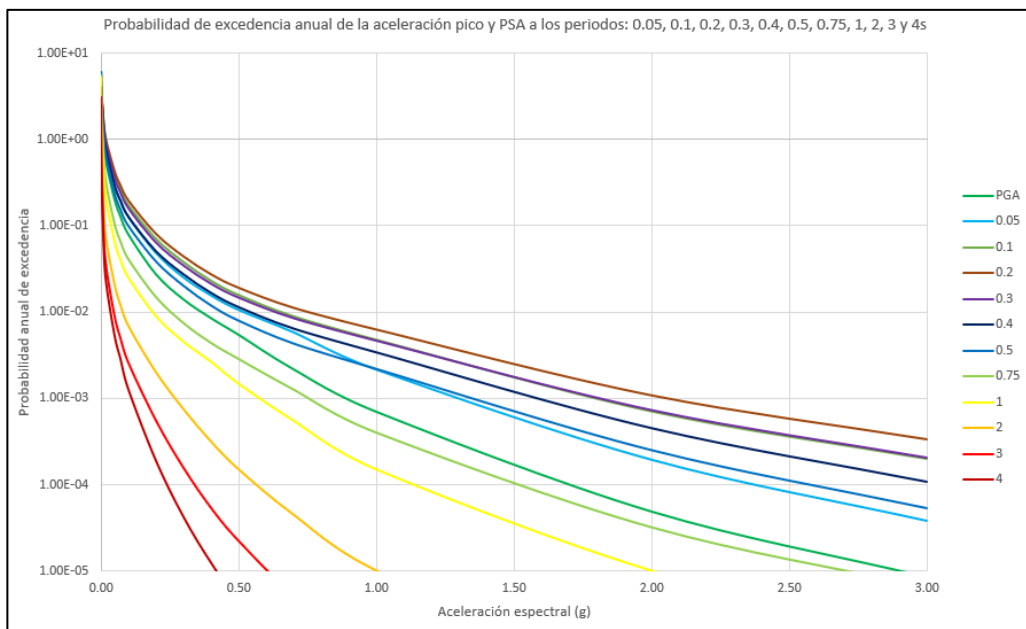


Figura 3-1. Probabilidad de excedencia anual de la aceleración pico y pseudoaceleración para distintos periodos.

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.

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.

En la Figura 3-2 y Figura 3-3 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

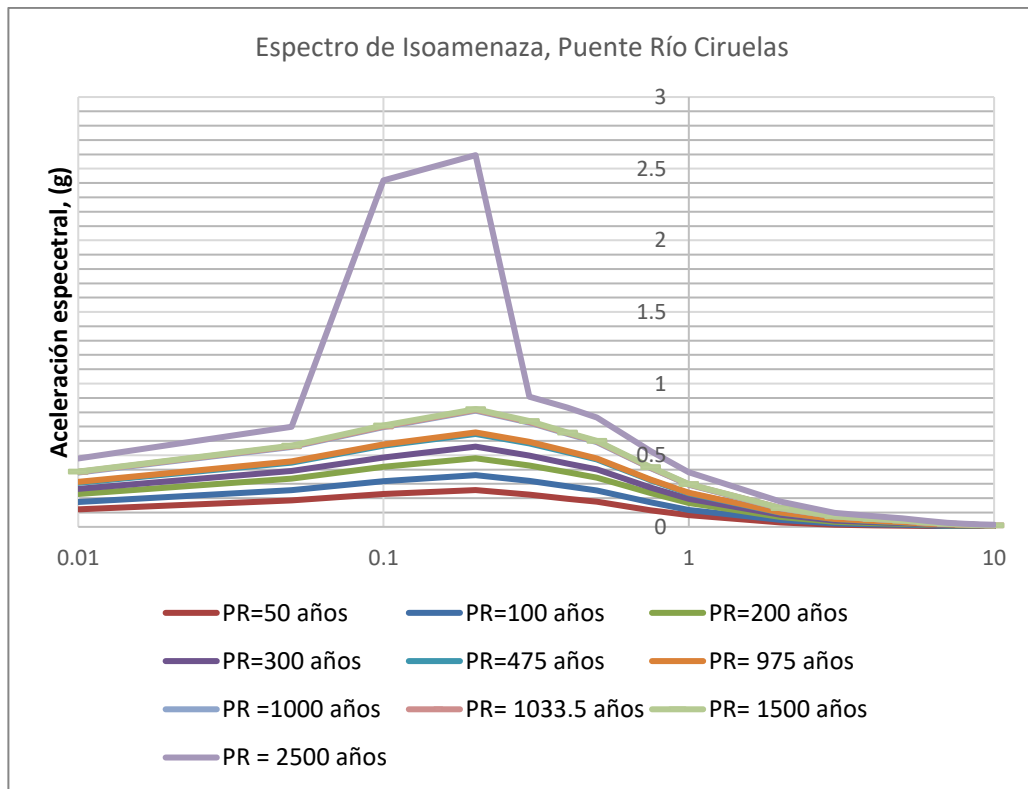


Figura 3-2. Espectro de Amenaza Uniforme para diferentes periodos de retorno, Puente Río Ciruelas.

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

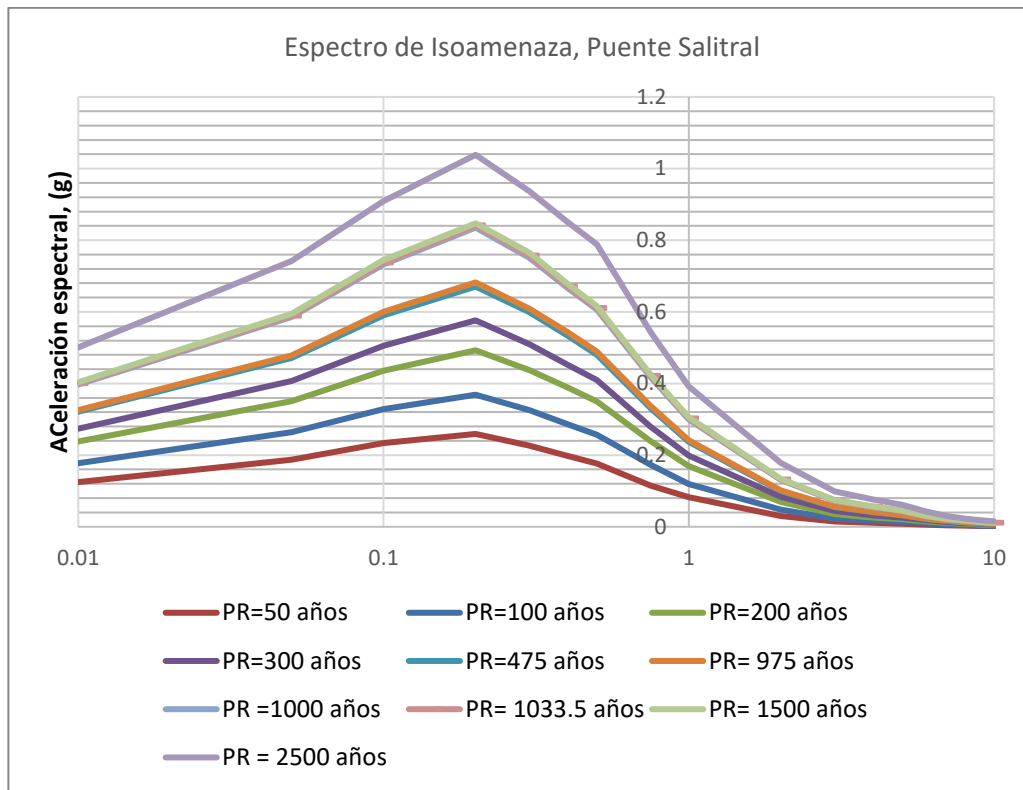


Figura 3-3. Espectro de Amenaza Uniforme para diferentes periodos de retorno, Puente Río Salitral.

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.

Con este fin, y 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.

Es importante tomar en consideración que los valores obtenidos en el estudio de amenaza sísmica son aceleraciones pico, es decir, no son efectivas. Es por esto que los valores pico se deben corregir por 0.8.

Otro parámetro que afecta los espectros de diseño es el tipo de suelo que se considera. Para este proyecto no se realizaron estudio de suelos, sin embargo, según los planos constructivos de los puentes, Figura 2-7 y Figura 2-8, en ambos puentes se tienen rocas que según los "Lineamientos para el Diseño Sismoresistente de Puentes", se pueden caracterizar como un tipo de suelo S2.

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. Según el Cuadro 2-3, para el puente sobre el río Ciruelas no se consideraría amplificación por falla cercana, mientras que en el puente sobre el río Salitral sí.

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.

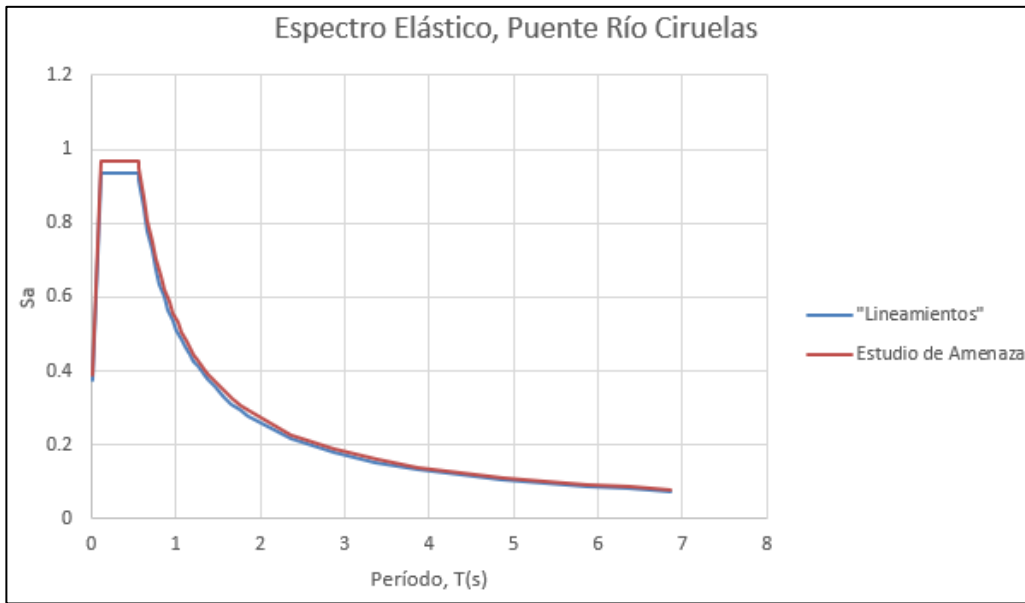


Figura 3-4. Comparación entre espectros de diseño para el puente río Ciruelas

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

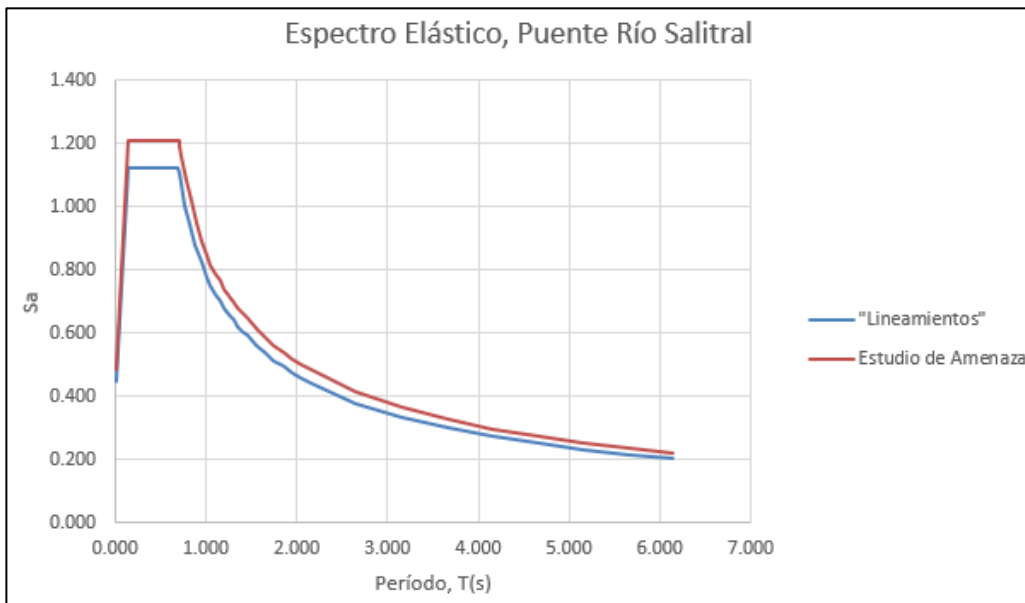


Figura 3-5. Comparación entre espectros de diseño para el puente río Salitral.

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

Cuadro 3-1. Valores tabulados de los espectros de diseño obtenidos en el Estudio de Amenaza Sísmica.

Río Ciruelas		Río Salitral	
Periodo t (s)	Sa (g)	Periodo t (s)	Sa (g)
0.010	0.386	0.010	0.485
0.112	0.966	0.140	1.211
0.560	0.966	0.700	1.211
0.570	0.949	0.710	1.194
0.620	0.872	0.730	1.162
0.670	0.807	0.780	1.087
0.720	0.751	0.830	1.022
0.770	0.702	0.890	0.953
0.820	0.660	0.950	0.893
0.870	0.622	1.000	0.848
0.920	0.588	1.050	0.818
0.970	0.558	1.100	0.791
1.020	0.530	1.150	0.765
1.070	0.505	1.200	0.742
1.120	0.483	1.250	0.720
1.170	0.462	1.300	0.699
1.220	0.443	1.350	0.680
1.270	0.426	1.400	0.662
1.370	0.395	1.450	0.645
1.470	0.368	1.550	0.614
1.570	0.344	1.650	0.587
1.670	0.324	1.750	0.562
1.770	0.306	1.850	0.539
1.870	0.289	1.950	0.519
2.370	0.228	2.050	0.500
2.870	0.188	2.150	0.483
3.370	0.160	2.650	0.414
3.870	0.140	3.150	0.365
4.370	0.124	3.650	0.327
4.870	0.111	4.150	0.298
5.370	0.101	4.650	0.274
5.870	0.092	5.150	0.254
6.370	0.085	5.650	0.237
6.870	0.079	6.150	0.223

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

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 8.0. 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".

Tomando en cuenta lo anterior, se concluye que se debe utilizar el método y valores obtenidos del Estudio de Amenaza Sísmica para las estructuras de los puentes sobre el río Ciruelas y Salitral.

5. Bibliografía

- Aguilar, T., Denyer, P., Montero, W. (2013) Cartografía Geológica de la Península de Nicoya, Costa Rica. Editorial Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Alvarado, G., Climent, A., Taylor, W., Vargas, A. (2014) Estudio Amenaza Sísmica P.G. las Pailas III: Área de Amenazas y Auscultación Sísmológica 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.
- Barquero, R. (1990) Sísmicidad y Tectónica de la Región Noroeste de Costa Rica con énfasis en la Zona del Proyecto Geotérmico Miravalles. Tesis de grado. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Benito, B. (2009). Amenaza Sísmica en América Central. Entimema.
- 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 Sísmorresistente 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 Sísmorresistente 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.

- 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.
- 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.
- 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.