



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudio de Postgrado
Maestría en Estructuras

**DISEÑO DE NUEVOS ELEMENTOS DE RESTRICCIÓN SÍSMICA EN PUENTES
VEHICULARES EN LA ZONA SÍSMICA 4.2 EN GUATEMALA**

Ing. Pablo José Rivera Méndez
Asesorado por el Maestro Ing. Fóscolo Liano Quezada

Guatemala, noviembre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE NUEVOS ELEMENTOS DE RESTRICCIÓN SÍSMICA EN PUENTES
VEHICULARES EN LA ZONA SÍSMICA 4.2 EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. PABLO JOSÉ RIVERA MÉNDEZ

ASESORADO POR EL MAESTRO ING. FÓSCOLO LIANO QUEZADA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ESTRUCTURAS

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

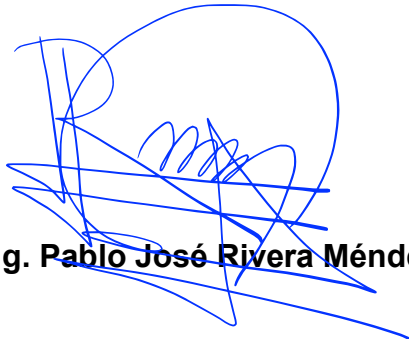
DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Carlos Eduardo Galicia Castillo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE NUEVOS ELEMENTOS DE RESTRICCIÓN SÍSMICA EN PUENTES VEHICULARES EN LA ZONA SÍSMICA 4.2 EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 14 de enero de 2022.



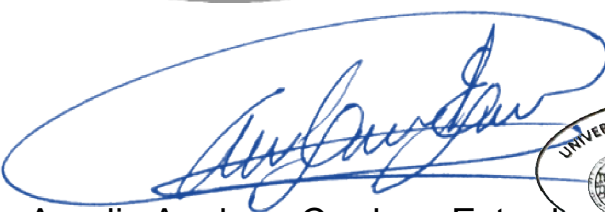
Ing. Pablo José Rivera Méndez

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.733.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE NUEVOS ELEMENTOS DE RESTRICCIÓN SÍSMICA EN PUENTES VEHICULARES EN LA ZONA SÍSMICA 4.2 EN GUATEMALA**, presentado por: **Pablo José Rivera Méndez**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Estructuras después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, noviembre de 2022

LNG.EEP.OI.733.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“DISEÑO DE NUEVOS ELEMENTOS DE RESTRICCIÓN SÍSMICA EN PUENTES
VEHICULARES EN LA ZONA SÍSMICA 4.2 EN GUATEMALA”**

presentado por **Pablo José Rivera Méndez** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Estructuras** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**





Guatemala, 3 de junio de 2022

MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que se ha revisado y APROBADO la siguiente TESIS DE GRADUACIÓN del alumno:

Carné: 100018289
Alumno: Pablo José Rivera Méndez
Maestría: Estructuras
Título de la
Investigación: DISEÑO DE NUEVOS ELEMENTOS DE RESTRICCIÓN SÍSMICA EN
PUENTES VEHICULARES EN LA ZONA SÍSMICA 4.2 EN
GUATEMALA

En este sentido, extendiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Sin otro particular

Vo. Bo. Msc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador Área Estructuras
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Guatemala 03 de junio de 2022

MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

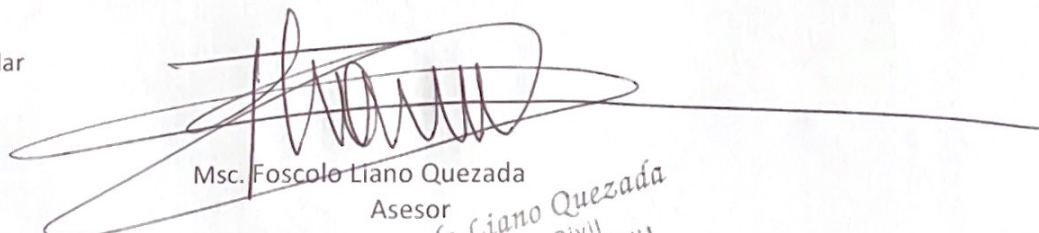
Por este medio informo a usted, que, como ASESOR, he revisado y aprobado la siguiente **TÉSIS DE GRADUACIÓN** del (la) alumno (a):

Carné:	100017306
Alumno:	Pablo José Rivera Méndez
Maestría:	Estructuras
Título de la Investigación:	DISEÑO DE NUEVOS ELEMENTOS DE RESTRICCIÓN SÍSMICA EN PUENTES VEHICULARES EN LA ZONA SÍSMICA 4.2 EN GUATEMALA

En este sentido, extendiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Asimismo, se hace constar que el estudiante cumplió con el pago de los honorarios profesionales de asesoría de dicha tesis de graduación.

Sin otro particular


Msc. Foscolo Liano Quezada
Asesor
Foscolo Liano Quezada
Ingeniero Civil
MSc. Estructuras GWU
Coleg. No. 2205

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser la luz que guía mi camino.
Mi madre	Por ser mi fuente de inspiración y quien me demostró que no hay imposibles.
Mi abuela	Porque es pilar importante en mi crecimiento personal.
Mi abuelo (q. e. p. d)	Espero seguir cumpliendo con los anhelos de su corazón a su pequeño niño que formó.
Mis tíos	Porque desde muy pequeño me motivaron a seguir siempre hacia adelante.
Mis primos	Porque sé que ellos pueden ser aún mejores.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la institución que me dio la oportunidad de formarme académicamente y crecer profesionalmente

Facultad de Ingeniería

Por ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.

Mis amigos

Porque siempre están, en los tiempos buenos y, sobre todo, en los no tan buenos.

Lcda. Jackelin Vásquez

Por ser el motor que hizo que retomara lo inconcluso.

Ing. Fóscolo Liano

Por mostrarme lo que es la verdadera amistad

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XV
OBJETIVOS	XIX
HIPÓTESIS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Aspectos generales	1
1.2. Ubicación de la zona de estudio	1
1.3. Localización de la zona de estudio	3
1.4. Consideraciones sísmicas	4
1.4.1. Antecedentes sísmicos importantes	5
1.4.2. Determinación de la zona sísmica de estudio	10
1.4.3. Consideraciones sísmicas en puentes con geometría irregular	13
1.4.3.1. Puentes curvos	13
1.4.3.2. Puentes esviados	15
1.5. Tipología de los puentes en Guatemala.	18
1.6. Requerimientos mínimos de soporte	20
1.7. Tipos de dispositivos de restricción	22
1.7.1. Elementos longitudinales de restricción	23
1.7.2. Barras de anclaje vertical	24

1.7.3.	Topes sísmicos	26
1.7.3.1.	Topes sísmicos internos	27
1.7.3.2.	Topes sísmicos externos	27
2.	ELEMENTOS DE RESTRICCIÓN EN ZONA 4.2	29
2.1.	Puentes del país	29
2.2.	Puentes en zona sísmica 4.2	31
2.3.	Evaluación según municipio	36
2.3.1.	Guatemala	36
2.3.2.	Antigua Guatemala	38
2.3.3.	Barberena	40
2.3.4.	Jutiapa	42
2.3.5.	Puerto Barrios	44
2.3.6.	Santa Cruz del Quiché	47
2.3.7.	Chimaltenango	49
2.3.8.	Sololá	51
2.3.9.	Totonicapán.	53
2.3.10.	San Marcos	55
2.3.11.	Quetzaltenango.....	57
2.4.	Resumen de situación localizada.....	59
3.	CONSIDERACIONES INICIALES DE LOS ELEMENTOS DE RESTRICCIÓN SÍSMICA.....	67
3.1.	Geometría	67
3.2.	Longitud apoyo	70
3.2.1.	Cálculo según la norma AASHTO 2020	71
3.2.2.	Cálculo según la norma chilena	75

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE ELEMENTOS DE RESTRICCIÓN.....	79
4.1. Elemento para la prevención de la pérdida de apoyo longitudinal	79
4.2. Topes sísmicos.	83
4.2.1. Norma AASHTO	83
4.2.2. Norma chilena	84
4.2.3. Topes sísmicos internos	89
4.2.4. Topes sísmicos externos	93
4.3. Barras de anclaje vertical antisísmicas.....	96
4.4. Discusión de resultados	98
CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES.....	103
REFERENCIAS	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Mapa de Guatemala.....	2
2.	Localización de área en estudio	3
3.	Tectónica regional de Guatemala.....	5
4.	Ubicación del epicentro del evento sísmico del 7 de noviembre de 2012	8
5.	Mapa de intensidades del temblor del 7 de septiembre de 2017	10
6.	Mapa de zonificación sísmica de Guatemala.....	12
7.	Condición para la instalación de topes interiores en los puentes curvos, en la dirección perpendicular al eje del puente. Irrevocable	15
8.	Condición para la instalación de topes sísmicos interiores en los puentes esviados, en la dirección perpendicular al eje del puente	17
9.	Mapa de ubicación de estructuras de drenaje registradas.....	30
10.	Mapa de ubicación de puentes de la zona sísmica 4.2.....	35
11.	Mapa de ubicación, puentes de Guatemala	37
12.	Mapa de ubicación, puentes de Antigua Guatemala	39
13.	Mapa de ubicación, puentes de Barberena	41
14.	Mapa de ubicación, puentes de Jutiapa	43
15.	Mapa de ubicación, puentes de Jutiapa	45
16.	Mapa de ubicación, puentes de Santa Cruz	48
17.	Mapa de ubicación, puentes de Chimaltenango	50
18.	Mapa de ubicación, puentes de Sololá	52
19.	Mapa de ubicación, puentes de Totonicapán	54
20.	Mapa de ubicación, puentes de San Marcos	56

21.	Mapa de ubicación, puentes de Quetzaltenango	58
22.	Puente Viñas ruta CA-01-Oriente kilómetro 45+400	60
23.	Puente las Pozas CA-01-Oriente kilómetro 129+800	61
24.	Puente Colón ruta CA-13 kilómetro 305+340	62
25.	Puente RD-GUA-47 kilómetro 0+600, tope sísmico continuo	63
26.	Puente Chajinchas CA-13 kilómetro 288+993.....	64
27.	Condición que permite la rotación de un tablero esviado	68
28.	Condición que permite rotación en tableros curvos.....	69
29.	Longitud de apoyo en estribo	73
30.	Longitud de apoyo en pilas centrales	74
31.	Longitud de apoyo en través en voladizo	74
32.	Longitud de apoyo en puentes esviados y curvos.....	76
33.	Sistema de prevención de pérdida de apoyo	81
34.	Sistema de prevención de pérdida de apoyo con tope de concreto	81
35.	Sistema de prevención de pérdida de apoyo	82
36.	Configuración tope sísmico interior y diafragma.....	88
37.	Configuración tope sísmico exterior y diafragma.....	88
38.	Nomenclatura de ménsula	91
39.	Diseño de las repisas horizontal para flexión y fuerza horizontal	94
40.	Diseño de las repisas horizontales al punzonamiento.....	96
41.	Diagrama de seguimiento de diseño de elementos de restricción.....	100

TABLAS

I. Municipios objeto de estudio dentro de la zona sísmica 4.2	1
II. Principales eventos sísmicos en Guatemala	6
III. Puentes de los 11 municipios objeto de estudio	31
IV. Listado de puentes evaluados en el municipio de Guatemala	38
V. Listado de puentes evaluación en el municipio de Antigua Guatemala.....	40
VI. Listado de puentes evaluación en el municipio de Barberena	42
VII. Listado de puentes evaluados en el municipio de Jutiapa	44
VIII. Listado de puentes evaluados en el municipio de Puerto Barrios	46
IX. Listado de puentes evaluados en el municipio de Santa Cruz del Quiché	49
X. Listado de puentes evaluación en el municipio de Chimaltenango	51
XI. Listado de puentes evaluación en el municipio de Sololá	53
XII. Listado de puentes evaluados en el municipio de Totonicapán	55
XIII. Listado de puentes evaluación en el municipio de San Marcos	57
XIV. Listado de puentes evaluados en el municipio de Quetzaltenango.....	59
XV. Porcentaje N de acuerdo con la zona sísmica y aceleración	72
XVI. Cantidad mínima de topes interiores	86

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Ao	Aceleración inicial
AMS_d	Aceleración máxima
H	Altura promedio de los estribos
b_w	Ancho del alma
b	Ancho total superestructura (m)
θ	Ángulo de esviaje en grados
θ'	Ángulo de esviaje en grados puente curvo
α_E	Ángulo de rotación marginal
W	Carga tributaria permanente de la superestructura
cm	Centímetro lineal
As	Coeficiente de aceleración
c_F	Coeficiente de desplazamiento
S_{vd}	Componente vertical de la aceleración
Vn	Cortante nominal
Vu	Cortante último
φ	Factor de resistencia, para corte es 0.90 en ménsulas
F	Fuerza de diseño
N_{UC}	Fuerza de tracción en sentido perpendicular al cortante
L	Longitud continua de la superestructura (m)
L_θ	Longitud continua de la superestructura en puente desviado
S_E	Longitud de apoyo

I	Longitud del vano
N	Longitud mínima de apoyo según AASHTO
S_{EM}	Longitud mínima de una viga en la mesa de apoyo.
S_{ER}	Longitud requerida de apoyo
S_{E0R}	Longitud requerida en puente esviado o curvo
S_F	Máxima longitud de diseño permitida
m	Metro lineal
mm	Milímetro lineal
d_e	Profundidad del centro de gravedad del acero.
Pie	Pie longitudinal
Plg	Pulgada longitudinal
S_{cd}	Parámetros de calibración de espectro de respuesta
F_y	Resistencia a la fluencia del acero
F'c	Resistencia específica del concreto

GLOSARIO

AASHTO	Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (American Association of State Highway and Transportation Officials).
AGIES	Asociación Guatemalteca de Ingeniero Estructurales.
ASTM	Sociedad Americana para el Ensayo e Inspección de los Materiales (American Society for Testing and Materials).
Estribo	Es el elemento estructural que se encuentra en los extremos y está destinado a soportar la superestructura de un puente.
Longitud de apoyo	Es la longitud mínima requerida para el soporte de la superestructura.
LRFD	Método de diseño por factores de carga y factores de resistencia.
Ménsula	Elemento estructural que sobresaliente de elementos que generalmente resiste cargas y que es diseñada como una viga en voladizo.

MOP

Ministerio de Obras Públicas de Chile.

Topes sísmicos

Elemento que restringe el movimiento perpendicular al eje del puente.

Viga cabezal

Elemento estructural que soporta la superestructura y está por encima de las columnas o los estribos.

Viga de borde

Es una viga que se analiza de la misma forma que una ménsula, pero se diferencia por ser más largo el voladizo.

RESUMEN

El presente trabajo muestra la necesidad de la inclusión dentro de la normativa local el uso de elementos de restricción sísmica, esto con el objeto primordial de prevenir el colapso de puentes importantes en el país y que bajo la amenaza sísmica de la zona la probabilidad de ocurrencia se incrementa día a día.

Para determinar si es necesaria la inclusión de los elementos de restricción sísmica, se hizo una investigación a los puentes que se ubican dentro de la zona sísmica 4.2 según el mapa de zonificación sísmica de AGIES, y estos cotejarlos contra las necesidades que tiene una estructura al actuar bajo la demanda de un evento sísmico importante.

Se tiene como punto de partida la experiencia de países donde han habido eventos sísmicos importantes, donde el principal factor de colapso fue la falta de sistemas adecuados de prevención de pérdida de apoyo de la superestructura y no el fallo estructural de los puentes, situación reflejada al país y la zona sísmica 4.2, donde se evidencia que si se poseen elementos de restricción tradicionales, pero las estructuras continúan siendo vulnerables debido a que estos elementos de restricción no contemplan todas las variables.

Para tal situación se toma de referencia normativa que ha sufrido modificación en el sentido de evitar el colapso por pérdida de soporte y su procedimiento de diseño, así como las variables que pueden afectar a los puentes y cuando estas hacen necesario el contemplar el uso de dispositivos de restricción.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Definición del problema

No existe en el país, una normativa que delimite o proponga el uso de elementos de restricción sísmica.

- Problema específico

La construcción de puentes y las normas internacionales que rigen el diseño de estas estructuras ha evolucionado con el pasar de los años. En el país no se han identificado puentes vehiculares que requieran atención por una falta de uso de dispositivos de restricción adecuados en diferentes zonas sísmicas.

Esta situación deja vulnerable las estructuras que se han construido años anteriores; en ocasiones estas estructuras no tienen los elementos de restricción adecuados, lo que las coloca en una situación de riesgo y por consiguiente puede limitar la movilidad de la población. Contar con un estudio y voluntad, estos puentes vulnerables pueden ser reforzados y pueda disminuir el riesgo de las estructuras.

Años atrás en el país se consideraba el uso de angulares anclados a la viga cabezal y a la viga, esos elementos eran los únicos que restringían el desplazamiento horizontal y vertical de la superestructura. Con el pasar de los años se implementaron los topes sísmicos, sin hacer una diferencia sustancial entre los internos y externos, por lo que se ven estructuras que poseen topes sísmicos internos, pero no externos o estos elementos son voluminosos, inclusive en zona donde la aceleración sísmica no es grande, por lo que no se ha establecido qué tipos de elementos de restricción sísmica en puentes vehiculares son viables para su incorporación y el tomar en cuenta que actualmente hay diversidad de ellos, así como en sus dimensiones; no por proponerlos de gran tamaño significa que funcionarán mejor, inclusive se ha visto que es contraproducente la propuesta.

Esta situación quizá derive en que no se ha determinado cuál es la ventaja del uso de elementos de restricción sísmica en la superestructura en puentes, pues de momento no se ha visto daños en las estructuras importantes, pese a que eventos sísmicos del año 2012 sí provocó daño en puentes, más no se analizó que causó los daños y cuáles fueron las averías que estos puentes tuvieron.

Según Earthquake Engineering Research Institute [EERI] y Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica [AGIES], (2013)

En la región afectada se registraron 17 puentes dañados. Ni los informes de la prensa ni el desarrollado por SEGEPLAN especifican qué puentes sufrieron daños o las causas principales de los daños. Se asume que los daños fueron mínimos porque de lo contrario la prensa habría informado sobre interrupciones en el tráfico. (p. 24)

- Delimitación del problema

El estudio se pretende realizar en el área central de país, en el departamento de Guatemala, y que se encuentre dentro de la zona sísmica 4.2, durante los primeros 6 meses del año 2022, por medio de observación y recolección de datos.

- Pregunta principal de la investigación

¿Cuál es la importancia del uso de nuevos elementos de restricción sísmica en puentes vehiculares en la zona sísmica 4.2 en Guatemala?

- Preguntas secundarias en la investigación

- ¿Qué puentes vehiculares, requieren atención por una falta de uso de dispositivos de restricción adecuados en la superestructura, en la zona sísmica 4.2 en Guatemala?
 - ¿Qué tipos de elementos de restricción sísmica en puentes vehiculares son viables para su incorporación en la zona sísmica 4.2 en Guatemala?
 - ¿Cuál es la ventaja del uso de elementos de restricción sísmica en la superestructura en puentes vehiculares en la zona sísmica 4.2 en Guatemala?

- Necesidades por cubrir por la investigación

El dar a conocer si puentes construidos en Guatemala, poseen elementos de restricción adecuados o si no cuentan con ellos y que el medio nacional conozca los nuevos elementos de restricción que se han implementado en otros países y cómo estos han ayudado a hacer los puentes más seguros. Promover la inclusión de estos elementos dentro de la normativa local, que hasta el momento carece de su incorporación y sus directrices de diseño.

OBJETIVOS

General

Determinar cuál es la importancia del uso de nuevos elementos de restricción sísmica de puentes vehiculares en la zona sísmica 4.2 en Guatemala.

Específicos

1. Identificar qué puentes vehiculares, requieran atención por una falta de uso de dispositivos de restricción adecuados en la superestructura, en la zona sísmica 4.2 en Guatemala.
2. Establecer qué tipos de elementos de restricción sísmica en puentes vehiculares son viables para su incorporación en la zona sísmica 4.2 en Guatemala.
3. Evidenciar cuál es la ventaja del uso de elementos de restricción sísmica en la superestructura en puentes vehiculares en la zona sísmica 4.2 en Guatemala.

HIPÓTESIS

Es necesaria la inclusión de nuevos elementos de restricción sísmica en puentes vehiculares, basados en la sismicidad y la alta probabilidad de un evento sísmico extraordinario que pueda dañar considerablemente la infraestructura, añadiendo una protección superior al puente, con lo cual disminuye el riesgo de pérdida de su apoyo.

INTRODUCCIÓN

Debido a la ubicación geográfica de Guatemala, y su cercanía con las placas tectónicas de cocos, norte América y caribe, se hace importante que nuestra normativa contemple la disminución del riesgo de colapso de las estructuras importantes para el desarrollo y economía del país, como lo son los puentes.

En la actualidad la normativa local no contempla los elementos de restricción sísmica y la longitud mínima de soporte para evitar la pérdida de soporte de la superestructura, siendo esto fundamental para conservar la operatividad de los puentes importantes luego de un evento sísmico extraordinario.

El realizar una evaluación de la red de puentes a nivel nacional es importante para determinar el nivel de riesgo que poseen las estructuras actualmente construidas y determinar la priorización de atención para la prevención de daños y su corrección, así como lo nuevos puentes posean estos elementos que prolonguen su vida de servicio.

En el marco teórico se hizo una breve introducción a lo que la zona sísmica del país representa y así como del historial o eventos sísmicos importantes ocurridos en el país o cercanos y que han afectados regiones de Guatemala, así como las medidas que se han tomado en otros países actualizando la normativa y dando importancia al uso y mejora de los elementos de restricción haciéndolos parte de un diseño sismorresistente que reduzca el riesgo de colapso.

La investigación de campo se detalla en el capítulo 2, donde se pudo constatar que los puentes de mayor edad son los que menos o ningún dispositivo de restricción poseen y el uso de topes sísmicos en los puentes de reciente construcción, aun cuando estos se construyen como un elemento que restringe la viga y no la superestructura como un elemento integral.

Las consideraciones de diseño y la comparativa entre normas que se utilizan localmente y las que se han actualizado, se desarrolla en el capítulo 3, donde se puede determinar que la norma más estricta es la norma Chilena sobre la AASHTO LRFD y se determina que los dispositivos de restricción sísmica tienen la función primordial de seguro, y si bien su función es restringir el movimiento debe existir cierto grado de libertad al movimiento de la superestructura, ya que de no ser así el comportamiento estructural del puente cambia.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Aspectos generales

Los municipios objeto de estudio deben de estar dentro de la zona sísmica 4.2, las referencias de eventos sísmicos importantes registrados en el país y las consideraciones previas como lo son la geometría de los puentes.

1.2. Ubicación de la zona de estudio

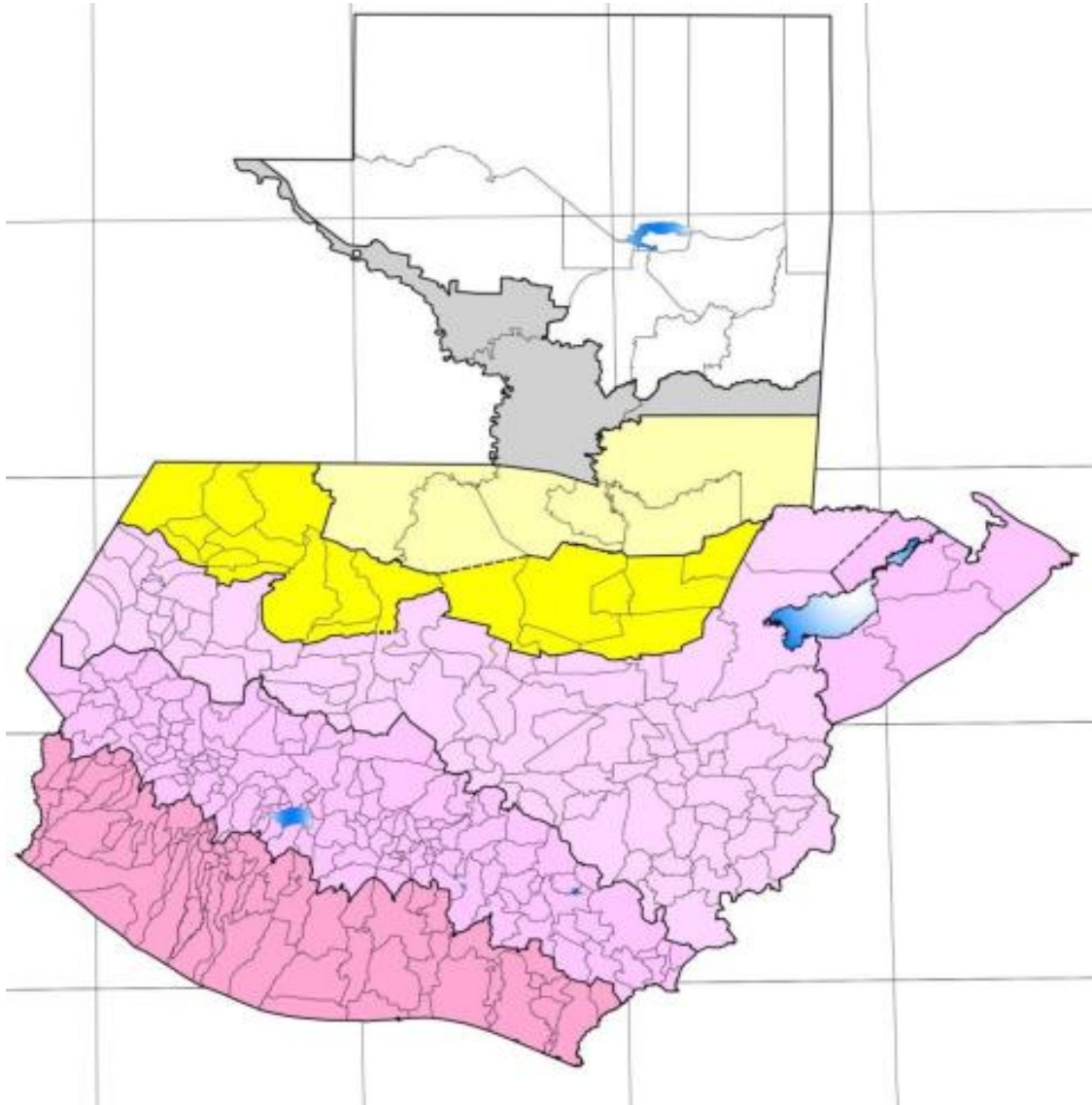
El área de estudio será en un municipio de cada departamento que se encuentre dentro de la zona sísmica 4.2, para el efecto se listan a continuación.

Tabla I. **Municipios objeto de estudio dentro de la zona sísmica 4.2**

Municipio	Departamento
Chimaltenango	Chimaltenango
Guatemala	Guatemala
Puerto Barrios	Izabal
Jutiapa	Jutiapa
Quetzaltenango	Quetzaltenango
Santa Cruz del Quiché	Quiché
Antigua Guatemala	Sacatepéquez
San Marcos	San Marcos
Barberena	Santa Rosa
Sololá	Sololá
Totonicapán	Totonicapán

Fuente: elaboración propia, utilizando datos de AGIES.

Figura 1. **Mapa de Guatemala**

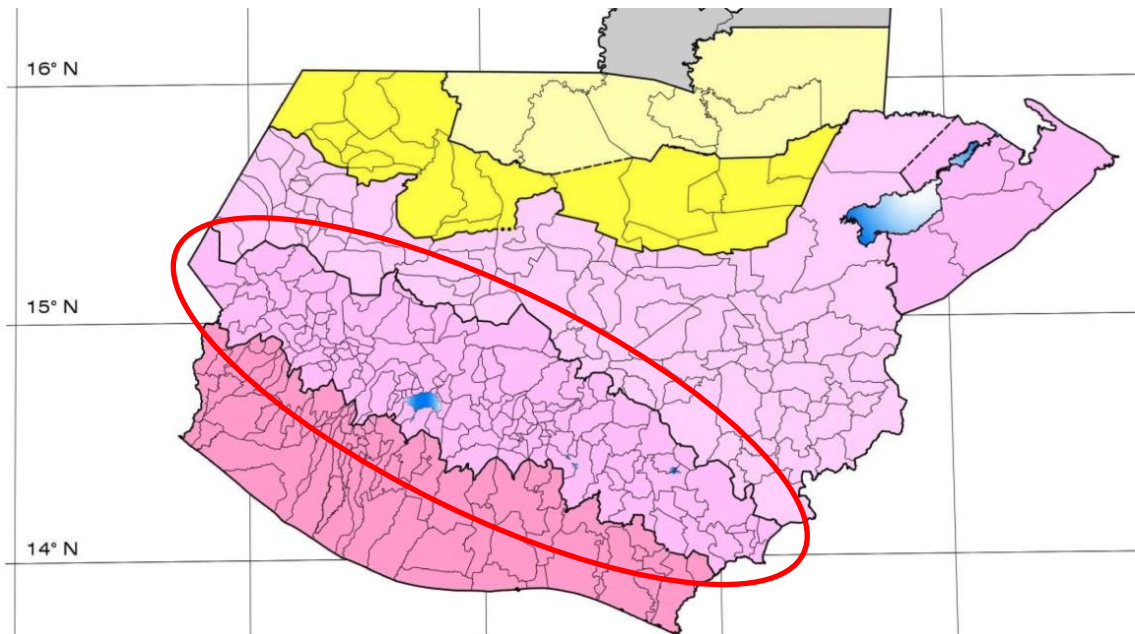


Fuente: AGIES (2018). *NSE 2, norma de seguridad estructural para Guatemala.*

1.3. Localización de la zona de estudio

El área en estudio es Guatemala específicamente en la zona sísmica 4.2.

Figura 2. Localización de área en estudio



Fuente: AGIES (2018). *NSE 2, norma de seguridad estructural para Guatemala.*

1.4. Consideraciones sísmicas

Guatemala es considerado un país altamente sísmico, Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología [INSIVUMEH], (2016) indica: “El territorio nacional está repartido en tres placas tectónicas: Norteamérica, Caribe y Cocos. Los movimientos relativos entre éstas determinan los principales rasgos topográficos del país y la distribución de los terremotos y volcanes” (p. 1). El país tiene la peculiaridad de estar dividido por tres placas tectónicas en constante movimiento, aunado a esta situación, la placa tectónica de Cocos se mantiene en constante movimiento, y de la cual se han generado los eventos sísmicos más importantes de la última década.

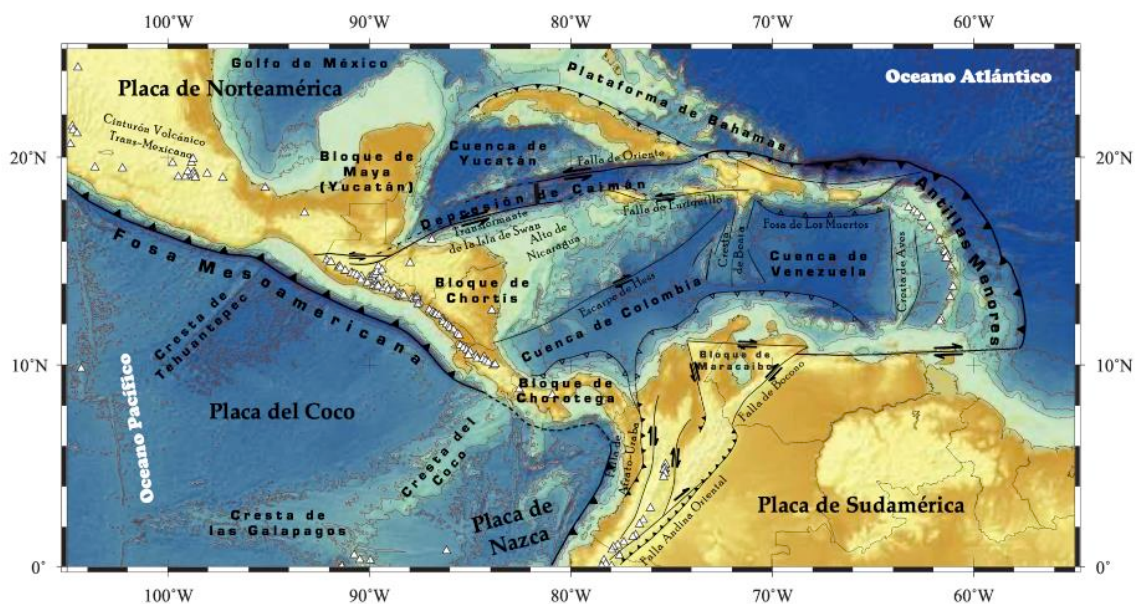
Según Bautista (2016):

El territorio de Guatemala se encuentra atravesado por el límite entre las placas de Norteamérica y del Caribe, el cual genera una zona de cizalla que manifiesta un movimiento transcurrente y cuya evidencia son los sistemas de fallas de: Motagua, Chixoy - Polochic y Jocotán - Chamelecón (...).

Por otro lado, al sur de Guatemala, en el Océano Pacífico, se encuentra el límite convergente entre las placas de Cocos y del Caribe, donde la primera está en subducción bajo la segunda a lo largo de la fosa Mesoamericana y cuya evidencia es el arco volcánico del país y una actividad sísmica profunda (> 30 km). (p. 13)

De lo indicado por este autor, se puede decir que la presencia y actividad de las tres placas tectónicas, genera la actividad de fallas tectónicas secundarias, de las cuales también se generan sismos dentro del territorio nacional, lo que confirma la premisa inicial, a continuación, se muestra un mapa con la tectónica nacional.

Figura 3. Tectónica regional de Guatemala



Fuente: Álvarez, (2009). *Tectónica y Geodinámica en el norte de Centroamérica*.

1.4.1. Antecedentes sísmicos importantes

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología [INSIVUMEH], (2016), destaca varios eventos sísmicos importantes desde inicios del siglo XX, hasta el año 2014, los que se listan a continuación:

Tabla II. Principales eventos sísmicos en Guatemala

Sismos en el siglo XX	
Fecha	Magnitud
18 de abril de 1902	7.5
8 de marzo de 1913	Sin referencia
27 de noviembre 1917	Sin referencia
4 de enero de 1918	6
6 de agosto de 1942	8.3
20 de febrero de 1959	Sin referencia
4 de febrero de 1976	7.5
11 de octubre de 1985	5.0
18 de septiembre de 1991	5.3
19 de diciembre de 1995	5.3
10 de enero de 1998	5.8
2 de marzo de 1998	5.6
11 de julio de 1999	6.1
Sismos del siglo XXI	
13 de enero de 2001	7.6
7 de noviembre de 2012	7.4
6 de septiembre de 2013	6.4
7 de julio de 2014	6.9

Fuente: elaboración propia, utilizando datos de INSIVUMEH.

Dentro de los eventos sísmicos listados en la tabla II, se encuentran los 2 que más daños han provocado en el país: el del año 1976 y el del año 2012, estos sismos provocaron gran daño a las estructuras del país y a la población.

El INSIVUMEH en el año 2014 generó un informe técnico sobre el sismo ocurrido el 7 de noviembre de 2012, a través del Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos, menciona lo siguiente.

Según el INSIVUMEH (2014):

En promedio, anualmente el 65 % a 70 % de los eventos sísmicos tienen origen en la zona de subducción, el 15 % a 20 % en los sistemas de fallas del Altiplano y el 5 % a 10 % está asociada a los sistemas Chixoy-Polochic-Motagua.

El sismo del 7 de noviembre de 2012 se generó en la zona de subducción, en la latitud de este sismo, la Placa de Cocos se mueve al nor-noreste con respecto a la Placa del Caribe a una velocidad aproximada de 77 mm/año, y se subduce debajo de América Central en la Fosa Mesoamericana. (p. 1)

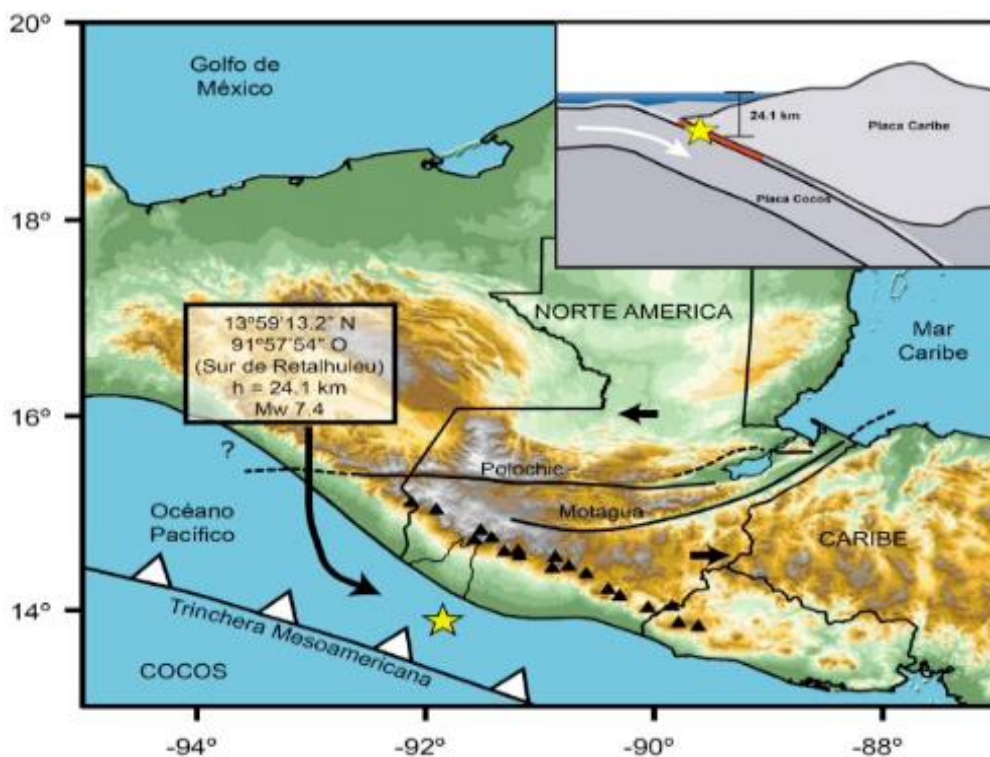
De lo anterior el INSIVUMEH, en esta sección, indica con claridad cual es el promedio anual de los sismos que tienen origen en la zona de subducción, donde se puede ver que la zona de subducción es la zona que más movimiento tiene.

En la sección 4 del mismo informe se detalla la ubicación, magnitud, duración y demás datos principales sobre el evento sísmico del 7 de noviembre de 2012.

Según el INSIVUMEH (2014):

El 7 de noviembre de 2012 a las 10 horas 35 minutos 47,8 segundos (hora local) se generó un sismo de magnitud Mw 7.4 (USGS) frente a las costas de Retalhuleu a aproximadamente 200 km de la capital (figura 3), sensible en todo el territorio nacional, con excepción de algunas regiones de Petén, en el sur de México y en El Salvador, afectando principalmente la región suroccidental y occidental del país, causando los peores daños desde el terremoto de 1976. (p. 4)

Figura 4. **Ubicación del epicentro del evento sísmico del 7 de noviembre de 2012**



Fuente: EERI – AGIES, (2013). *El terremoto guatemalteco M7.4 del 7 de noviembre 2012 y sus implicaciones para la reducción y mitigación de desastres.*

El terremoto del año 2012 dejó grandes lecciones al país se evidenció la necesidad de creación de guías, manuales demás documentación para las mejores prácticas en la construcción en el informe titulado *El terremoto guatemalteco M7.4 del 7 de noviembre 2012 y sus implicaciones para la reducción y mitigación de desastres*.

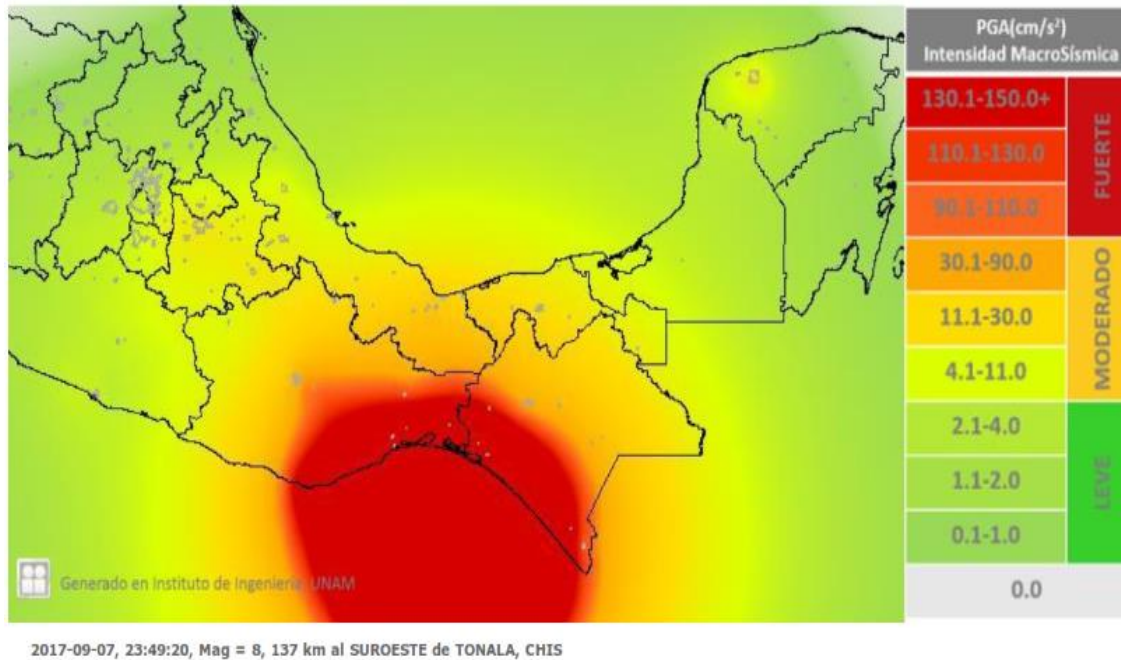
Según Earthquake Engineering Research Institute [EERI] y Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica [AGIES] (2013):

Desarrollo de estándares y pautas de mejores prácticas para el diseño y construcción de edificaciones e instalación de elementos no estructurales, operativos y funcionales; estrategias para aprobar los sistemas estructurales que no se encuentran descritos en las recomendaciones que brindan los códigos. (p. 39)

Este es un punto de inflexión importante para el país en términos de tecnificación de la construcción, a la vez promueve el que se hagan propuestas o investigaciones para la mejora en la seguridad de las estructuras del país.

Dentro del listado de la tabla II, no se encuentra un sismo el cual tuvo ocurrencia posterior a la generación de la información contenida en la tabla, pero que, pese a no haber sido el epicentro en territorio nacional, fue bastante sensible en el centro y occidente del país, y este sucedió el 7 de septiembre de 2017, fue un sismo que provoco mucho daño en el territorio mexicano, pero de gran cercanía al territorio nacional como se muestra en la siguiente figura.

Figura 5. **Mapa de intensidades del temblor del 7 de septiembre de 2017**



Fuente: Instituto de Ingeniería de la UNAM y Servicio Simológico Nacional, (2017). *Reporte Especial Sismo de Tehuantepec 2017-09-07 23:49 Mw 8.2.*

Como se puede observar en la figura 4, el occidente del país fronterizo con México fue la zona más afectada y donde el sismo fue más sensible.

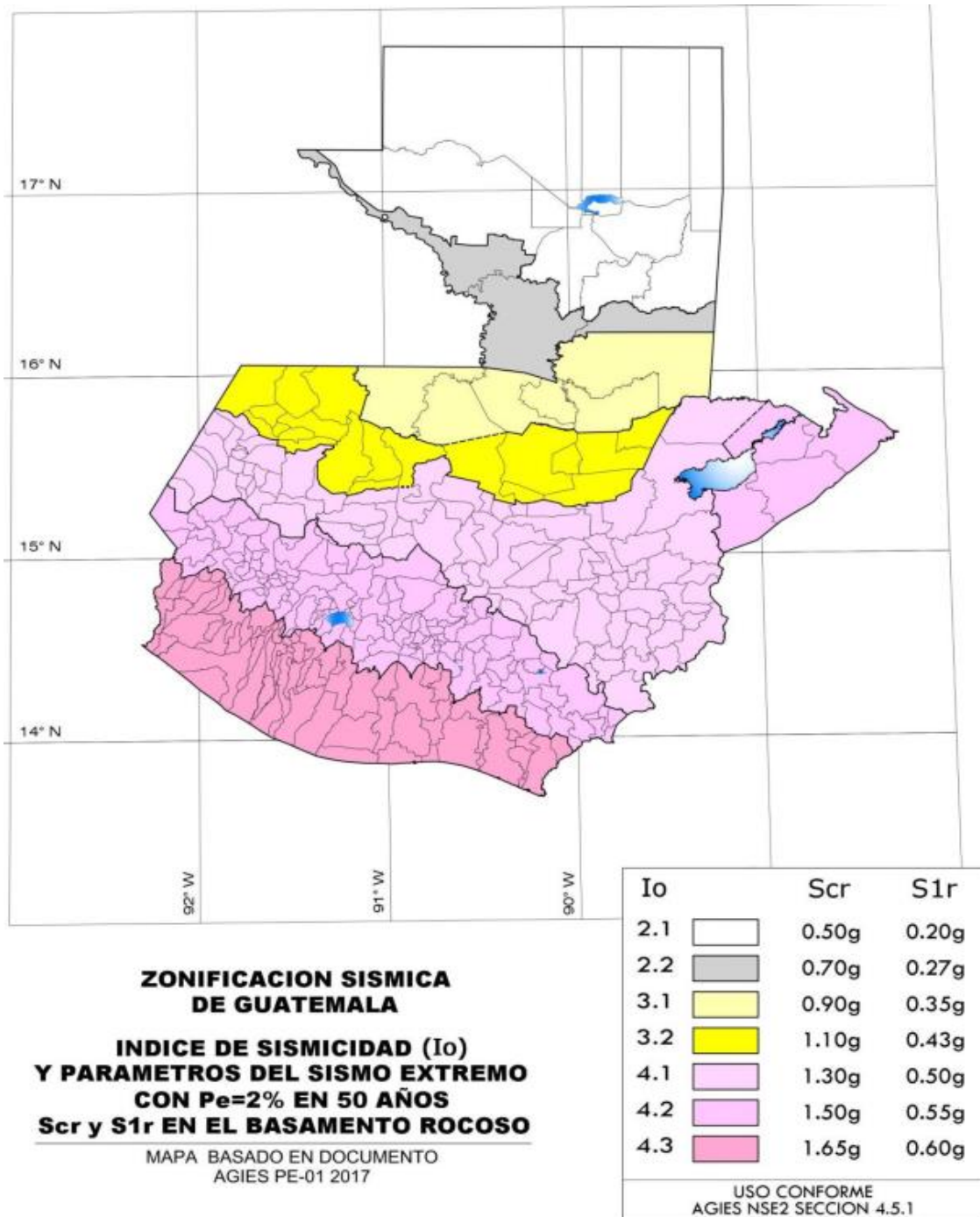
1.4.2. **Determinación de la zona sísmica de estudio**

Para aplicación en el país, se encuentran las Normas de Seguridad Estructural (NSE), estas normas se actualizaron en el año 2018; incluyen y actualizan parámetros para el diseño de estructuras y contemplan el impacto que tuvieron los últimos eventos sísmicos importantes registrados en el país en los años previos.

La Asociación Guatemalteca de ingeniería Estructural y Sísmica [AGIES], (2018) indica “La Norma de Seguridad Estructural AGIES NSE 2 estipula las cargas mínimas, las bases para establecer la condición del terreno y los niveles mínimos de protección sísmica (NPS) que se deberán emplear en el diseño estructural de edificaciones” (p. 1).

La misma AGIES, dentro de las *Normas de seguridad estructural*, ha generado un mapa de zonificación sísmica, este mapa divide en 7 zonas el país, esta división va en función de la aceleración sísmica que se genera en la zona, adicional a este mapa también se cuenta con una tabla en la cual se detalla un listado con la amenaza sísmica por departamento y municipio, a continuación, se muestra el mapa de zonificación sísmica.

Figura 6. Mapa de zonificación sísmica de Guatemala



Fuentes: AGIES, (2018). NSE 2, norma de seguridad estructural para Guatemala.

Para el caso de estudio se tomará de referencia la zona sísmica 4.2, se decidió el tomar esa zona de estudio debido a que dentro de ella se encuentra la ciudad de Guatemala, zona de gran importancia para el desarrollo económico del país.

1.4.3. Consideraciones sísmicas en puentes con geometría irregular

Actualmente en Guatemala no existe una limitación con referencia a la geometría irregular de los puentes ni parámetros que restrinjan esa geometría.

Otros países como Chile y Japón han integrado a su normativa local limitaciones a esa geometría irregular; según estudios que han realizado y la experiencia con los terremotos que sufrieron en el 2010 y 2011, han agregado a sus códigos criterios sísmicos que incluyen la evaluación por exceso en la rotación del tablero superior, tanto para puentes curvos como para puentes esviados.

1.4.3.1. Puentes curvos

Para los puentes curvos, el Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP), integró a su normativa sísmica, las recomendaciones realizadas dentro de la norma de Japón *Specifications for Highway Bridges, March 2012, Part V Seismic Design*, de tal manera que homologan los criterios adoptados.

Según el MOP (2017), “La posibilidad de rotación de una superestructura puede ser evaluada de una manera simple, usando la siguiente ecuación” (p. 22). Para esto plantea la siguiente ecuación.

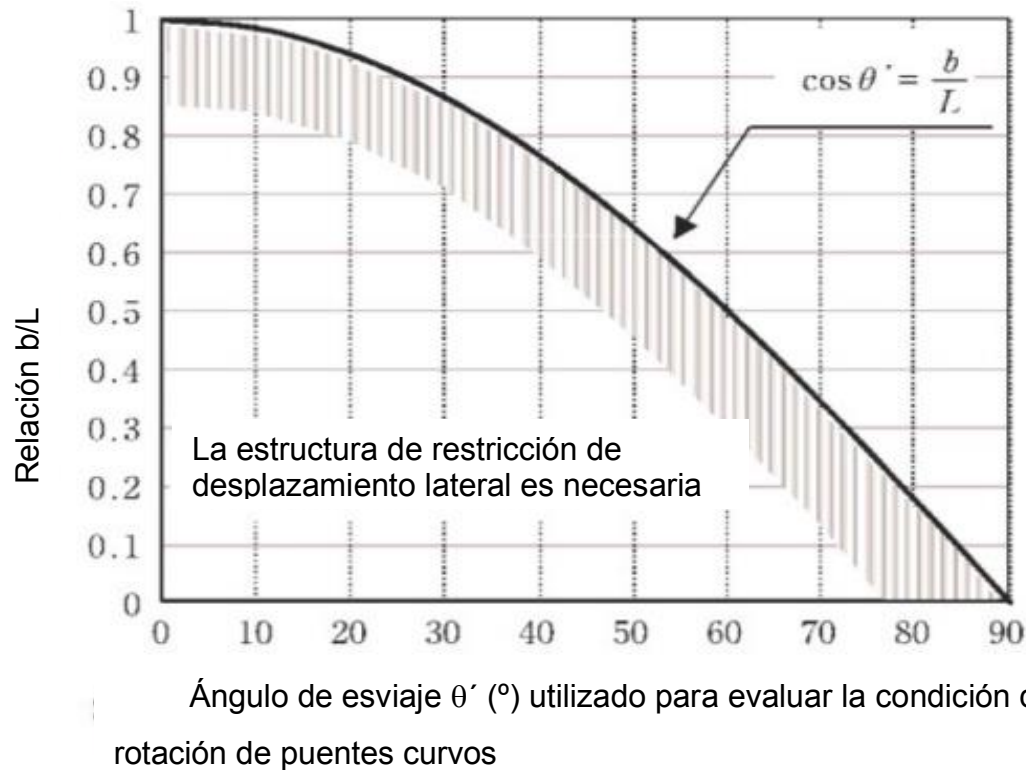
Ecuación 1. Condición para la rotación de un tablero en puentes curvos

$$\cos\theta > \frac{b}{L}$$

Para el diseño sísmico de puentes, según el MOP (2017):

La cual permite evaluar si se generarán desplazamientos excesivos en un tablero curvo, se deberá verificar si la geometría del tablero genera un punto queda bajo la curva, significará que existirán desplazamientos laterales excesivos del tablero, en cuyo caso se requerirá incorporar topes sísmicos interiores. (p. 24)

Figura 7. **Condición para la instalación de topes interiores en los puentes curvos, en la dirección perpendicular al eje del puente. Irrevocable**



Fuente: Japan Road Association, (2012). *Specifications for Highway Bridges, Part V Seismic Design*.

De lo anterior se puede determinar que hay recomendaciones para puentes curvos, situación que en Guatemala por tener una topografía montañosa es muy probable que se deba recurrir en algún momento a este tipo de puentes.

1.4.3.2. Puentes esviados

Igualmente, para puentes esviados, el Ministerio de Obras Públicas de Chile ha adoptado los criterios implementados por la norma japonesa.

Ecuación 2. Condición para la rotación de un tablero en puentes esviados

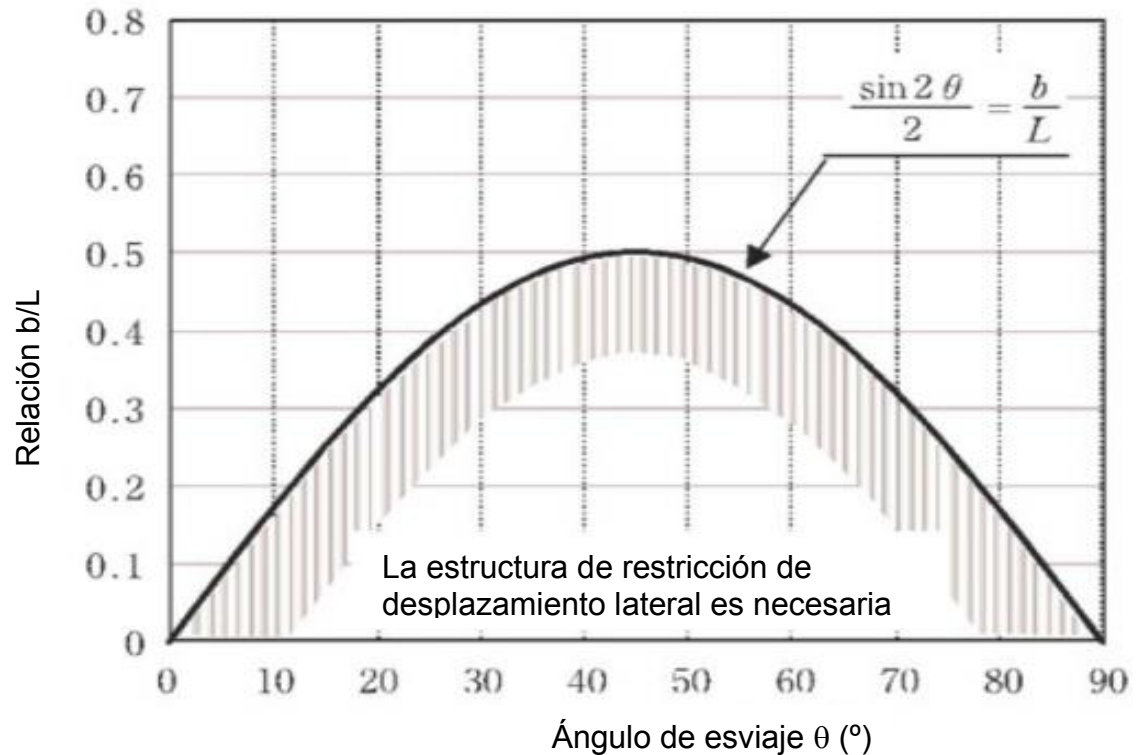
$$\frac{\text{Sen}2\theta}{2} > \frac{b}{L}$$

Dentro los criterios sísmicos para el diseño de puentes según el MOP, (2017):

Se deberá verificar si la geometría del tablero y el ángulo agudo de éste generan un punto que queda bajo la curva, lo cual significará que existirán desplazamientos laterales excesivos del tablero, debido a la rotación, en cuyo caso se requerirá incorporar topes sísmicos interiores. (p. 24)

De lo anterior la siguiente figura representa la ecuación 2.

Figura 8. **Condición para la instalación de topes sísmicos interiores en los puentes esviados, en la dirección perpendicular al eje del puente**



Fuente. Japan Road Association, (2012). *Specifications for Highway Bridges, Part V Seismic Design*.

Los puentes esviados son mucho más comunes de lo que podría creerse, por tal motivo es de mucha importancia tomar en cuenta que este tipo de estructuras al igual que los puentes curvos tienen un comportamiento diferente y a la vez es un criterio que debe tomarse en consideración el poder mantener la vigas en su posición garantiza el no exista una pérdida de soporte, pero a la vez el hacer un diseño que sea excesivo o este muy por debajo de lo necesarios, lejos de ayudar a la estructura podría dañarla irreparablemente.

1.5. Tipología de los puentes en Guatemala

En el país, la tipología estructural de los puentes no es tan amplia; en los últimos años se ha limitado a la construcción de puentes de concreto reforzado o concreto pretensado y postensado, recientemente se ha iniciado a implementar nuevamente la construcción de puentes de acero.

La AGIES, en el año 2018, publicó la actualización de las *Normas de Seguridad Estructural*, donde se adicionó la norma NSE 5.2, la cual está dedicada a puentes de tamaño y altura limitados.

AGIES en el año 2018, en la norma NSE 5.2 titulada *Puentes de tamaño y altura limitados*, lista las siguientes tipologías para puentes de concreto:

Según AGIES (2018):

Tipologías estructurales de puentes en concreto — Las siguientes son algunas de las tipologías estructurales de puentes en concreto:

- Losas armadas
- Losas preesforzadas
- Vigas armadas
- Vigas armadas con preesfuerzo pretensado
- Vigas armadas con preesfuerzo postensado
- Arcos armados y/o preesforzados
- Cajones en voladizos sucesivos de sección constante.
- Cajones en voladizos sucesivos de sección variable.
- Puentes atirantados. (p. 1-7)

Las tipologías de concreto son las más comunes en el país y que han venido evolucionado con los años, en el país de momento son pocos los puentes de concreto que sean de luces muy grandes, a pesar de que actualmente existe tecnología o tipos de elementos que lo permiten, como lo son los puentes de vigas tipo cajón, estas no están dentro del listado, en el país son escasos y antiguos los puentes con este tipo de elementos.

AGIES en el año 2018, en la norma NSE 5.2 titulada *Puentes de tamaño y altura limitados*, lista las siguientes tipologías para puentes de acero:

Según AGIES (2018):

Ejemplos de tipología estructural de puentes en acero. Las siguientes son algunas de las tipologías estructurales de puentes en acero:

- Vigas
- Armaduras sobre tablero y bajo tablero
- Vigas metálicas en cajón
- Arcos sobre tablero y bajo tablero
- Puentes atirantados.
- Puentes colgantes. (p. 1-8)

Los puentes de acero han tomado auge en los últimos años, en especial para puentes con luces grandes, por tener la bondad de ser contruidos con luces más grandes sobre los puentes de concreto.

Las tipologías anteriormente indicas están basadas en los listados identificados en la norma NSE 5.2 de AGIES, y la cual se basó en las tipologías que existen en el país.

1.6. Requerimientos mínimos de soporte

Uno de los principales problemas que, según las investigaciones de referencia, ha sido el causante de la falla de los puentes bajo la demanda de un evento sísmico es la pérdida de soporte de las vigas principales, esto puede ser mitigado con la inclusión de elementos sísmicos de restricción, estos elementos que se detallan en el numeral 3.4.

La Administración Federal de Carreteras (FHWA) por sus siglas en inglés, en su documento FHWA-NH-15-004 indica:

Según la FHW (2014):

Se ha observado en terremotos pasados que los puentes a menudo colapsan porque no tienen longitudes de soporte adecuadas para acomodar los movimientos de la estructura y los desplazamientos relativos del suelo entre los soportes.

Las longitudes de los soportes deben adaptarse a los desplazamientos resultantes de la respuesta inelástica general en el sistema, el posible movimiento independiente de los diversos componentes de la subestructura y los desplazamientos y rotaciones fuera de fase que resultan de los movimientos de las ondas de la superficie viajera que se producen en el suelo durante un terremoto. (p. 8-16)

La norma de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes por sus siglas en inglés [AASHTO], (2020) en su inciso 4.7.4.4, indica: “Las longitudes de soporte en las juntas de expansión sin retenedores, STU o amortiguadores deben adaptarse al mayor de los desplazamientos máximos calculados de acuerdo con las disposiciones” (p. 4-87). Esto es en función de los desplazamientos máximos como resultado del análisis sísmico según la zona sísmica de ubicación del puente.

Adicional a esto, la AASHTO en el año 2020, propone el uso de una ecuación empírica, la cual se indica a continuación.

Ecuación 3. longitud de soporte mínimo

$$N = (8 + 0.02L + 0.08H)(1 + 0.000125S^2)$$

En donde:

N: longitud mínima del soporte medida normal a la línea central del rodamiento (pies).

L: longitud de la plataforma del puente hasta la junta de expansión adyacente, o hasta el final de la plataforma del puente (pies).

H: para estribos, altura media de los pilares que sostienen el tablero del puente desde el estribo hasta la siguiente junta de dilatación(pies).

S: esviaje del soporte medido desde la línea normal al tramo (grados).

Esta ecuación es para determinar la dimensión mínima de soporte que debe de tener la viga cabezal ya sea en estribo o pila, de no cumplir con ella se deberán de colocar los dispositivos de restricción longitudinales que correspondan.

Adicional a lo anteriormente mencionado el Departamento de Transporte de California [CALTRANS (2015) en el documento titulado *Práctica de diseño de puentes* indica:

La tapa en T invertida, (...), se usa típicamente con vigas de concreto prefabricado para aumentar el espacio vertical y mejorar la apariencia estética. Sin embargo, desde el punto de vista del diseño, es difícil satisfacer las demandas sísmicas, y el refuerzo del borde de la tapa en T presenta desafíos especiales en cuanto a corte, flexión y anclaje de barras. (p. 12-10)

Se considera importante lo mencionado por CALTRANS en el año 2015, debido a que durante unos años fueron construidos puentes de concreto prefabricado con vigas cabezal tipo T invertida; hace notar la vulnerabilidad que estos puentes pueden presentar.

1.7. Tipos de dispositivos de restricción

A continuación, se destacan los tipos de elementos de restricción sísmica que tienen como objeto evitar que las estructuras pierdan el soporte en la superestructura y que ya se ha normado su uso en otros países que tienen un riesgo sísmico alto.

1.7.1. Elementos longitudinales de restricción

Los elementos de restricción longitudinales son un tipo cable que actúan en la dirección longitudinal de la estructura, como indica Samuel Montufar Vieyra en el año 2017, en su tesis de maestría titulada *Influencia de apoyos, juntas y topes en la respuesta sísmica de puentes* indica:

Según Montufar (2017):

En la práctica común de diseño, descuidan este aspecto del comportamiento. Para estimar el riesgo potencial es necesario conocer el movimiento relativo que existe entre la superestructura y las pilas o en los estribos de los puentes; dichos movimientos son más comunes cuando se cuenta con cambios bruscos de rigidez entre los tramos adyacentes en una misma pila.

Los sujetadores son colocados en dirección longitudinal para tratar de evitar la pérdida de asiento. (p. 22)

Es importante realizar un análisis estructural a detalle para determinar el movimiento que pueda tener la estructura para proponer este tipo de dispositivos.

Según AASHTO (2020):

Si el inmovilizador está en un punto donde el desplazamiento relativo de las secciones de la superestructura está diseñado para ocurrir durante movimientos sísmicos, se debe permitir suficiente holgura en el inmovilizador para que el inmovilizador no comience a actuar hasta que se exceda el desplazamiento de diseño.

Cuando se disponga un limitador en columnas o pilares, el limitador de cada tramo puede estar unido a la columna o al pilar en lugar de interconectar tramos adyacentes. (p. 3-6)

Como se indica por parte de la AASHTO en el año 2020, la fricción que pueda existir entre los elementos de soporte y la superestructura no puede ser considerada como un aporte a la restricción del movimiento.

Adiciona a lo indicado hace la observación que este tipo de elemento de restricción puede ser utilizado en puentes de concreto o acero y en puentes de más de una luz.

1.7.2. Barras de anclaje vertical

El profesional egresado de la Universidad Politécnica de Catalunya, González (2016), en su tesis de maestría *Estudio del comportamiento de los puentes prefabricados chilenos durante el sismo de 27 de febrero de 2010* las definen como:

Este tipo de elementos de sujeción tienen por finalidad incrementar la carga vertical sobre los apoyos a fin de reducir la componente ascendente de la aceleración vertical y, así, reducir el efecto de pérdida de resistencia horizontal debida al rozamiento por parte de los elementos aparatos de apoyo. (p. 31)

Cómo este autor, indica en su momento, que los elementos fueron utilizados en ausencia de los topes sísmicos internos y que incrementan la carga vertical y reducen la aceleración en esa componente.

Según MOP (2017):

Las aceleraciones verticales pueden asumir mayor relevancia en los puentes con apoyos flexibles y aún más con aisladores elastoméricos. La utilización de apoyos flexibles en la dirección horizontal, en muchos casos implica un incremento de la flexibilidad vertical. Este aspecto tiene que ser considerado con cuidado, debido a la potencial amplificación del movimiento vertical y la posible pérdida de apoyo de la superestructura. (pp. 43-44)

Mientras tanto, este autor, hace la aclaración que este tipo de elementos son más relevantes en los casos donde las vigas poseen soporte elastoméricos; eso incrementa la flexibilidad vertical de la superestructura, en donde entran a funcionar las barras de anclaje vertical, para reducir esa flexibilidad vertical y posterior posible pérdida de soporte.

Mientras tanto la AASHTO (2020), en la *Norma para el diseño de puentes* en su apartado 3.10.9.6, indica lo siguiente:

Para las zonas sísmicas 2, 3 y 4, se deben proporcionar dispositivos de sujeción en los soportes y en las bisagras de las estructuras continuas donde la fuerza sísmica vertical debida a la carga sísmica longitudinal se opone y excede el 50 por ciento, pero es menos del 100 por ciento, de la reacción debida a cargas permanentes. En este caso, la fuerza de elevación neta para el diseño del dispositivo de sujeción se tomará como

el diez por ciento de la reacción debida a las cargas permanentes que se ejercerían si el tramo estuviera simplemente apoyado. (p. 3-116)

Esta norma, pese a dar recomendaciones de relación entre fuerza sísmica vertical y la carga sísmica vertical, no proporciona un procedimiento o recomendaciones de dimensión de las barras de anclaje vertical, como si lo hace el MOP en el *Manual de criterios sísmicos para diseño de puentes en Chile*.

1.7.3. Topes sísmicos

Según indica Montufar (2017), “Los topes sísmicos se utilizan en los puentes que se encuentran en zonas sísmicas con el propósito de evitar los desplazamientos excesivos transversales en el tablero. Su función principal es entonces limitar los desplazamientos transversales” (p. 16). Estos generalmente se clasifican en dos tipos, los internos y los externos.

Existen recomendaciones de separación de los topes sísmicos con la estructura, esto con el fin que la estructura tenga un cierto grado libertad y no se dañen los elementos al menos movimiento bajo una demanda sísmica.

En el documento FHWA-NHI-15-004 según la FHWA (2014), “Las llaves de corte se utilizan comúnmente en los estribos de puentes de luz pequeña a mediana para proporcionar conectividad transversal para la superestructura del puente bajo cargas laterales.” (p. 6-22). El elemento cumple la función de integración para aquellos puentes que su diseño no contempla el ser construirlo de forma integral.

1.7.3.1. Topes sísmicos internos

Los topes sísmicos internos, son aquellos elementos que van anclados a la viga cabezal e intercalados a las vigas principales, y que también restringen el movimiento en el sentido perpendicular.

El Ministerio de Obras Públicas de Chile, en el manual titulado *Criterios sísmicos para diseño de puentes en Chile*, menciona al respecto.

Según MOP (2017):

Los topes sísmicos interiores deberán formar una llave de corte con los travesaños, con el objetivo que no se produzcan daños en las vigas, en un probable movimiento lateral que supere el desplazamiento de diseño, debido a un sismo de importancia, el impacto se debe producir entre los topes y el travesaño, generando algún tipo de daño reparable en ellos.
(p. 39)

Los travesaños a los que hace mención la norma son los diafragmas; en la actualización de la norma los diafragmas se han vuelto obligatorios sin importar la zona sísmica. Cabe hacer mención que los diafragmas no evitan el movimiento horizontal, sino ayuda a que el comportamiento losa y viga sea uniforme e integral.

1.7.3.2. Topes sísmicos externos

En el libro, *Diseño sísmico y evaluación de puentes: métodos de análisis y estudios de caso inelásticos*, elaborado por Kappos, Saiid. Nuray Aydinoglu y Tatjana (2012), mencionan:

Para identificar el estado de la llave de corte, la demanda de fuerza debida al terremoto se compara con la capacidad calculada de la llave de corte. La capacidad de las llaves de corte se calcula normalmente con base en una teoría de fricción de corte. (p. 21)

Kappos *et al.*, (2012), hace notar sobre la llave de corte, realmente hace referencia al tope sísmico, las consideraciones para el diseño del tope sísmico son similares a las del tope sísmico interno.

En el manual titulado *Criterios sísmicos para diseño de puentes en Chile*, elaborado por MOP (2017) indica lo siguiente:

El ancho mínimo de los topes sísmicos debe ser 40(cm) y el máximo de 70(cm). No se recomienda colocar anchos mayores debido a que al ser más robustos no se comportarán como un fusible y es probable que cuando se produzca el impacto sobre ellos, se transmitan solicitaciones importantes a la infraestructura, pudiendo producir grietas en los cabezales y en los muros de los estribos.

En todos los topes se debe incluir un neopreno lateral de bajo espesor, para amortiguar el impacto sobre estos. (p. 39)

Esta norma ha propuesto que los topes sísmicos no sean muy robustos, para que estos fallen ante una sollicitación sísmica importante, y no por ser robustos estos dañen la viga en su base y su reparación sea imposible, por lo que se entiende que estos dispositivos juegan un papel de resguardo y deben ser los primeros elementos en llegar al fallo.

2. ELEMENTOS DE RESTRICCIÓN EN ZONA 4.2

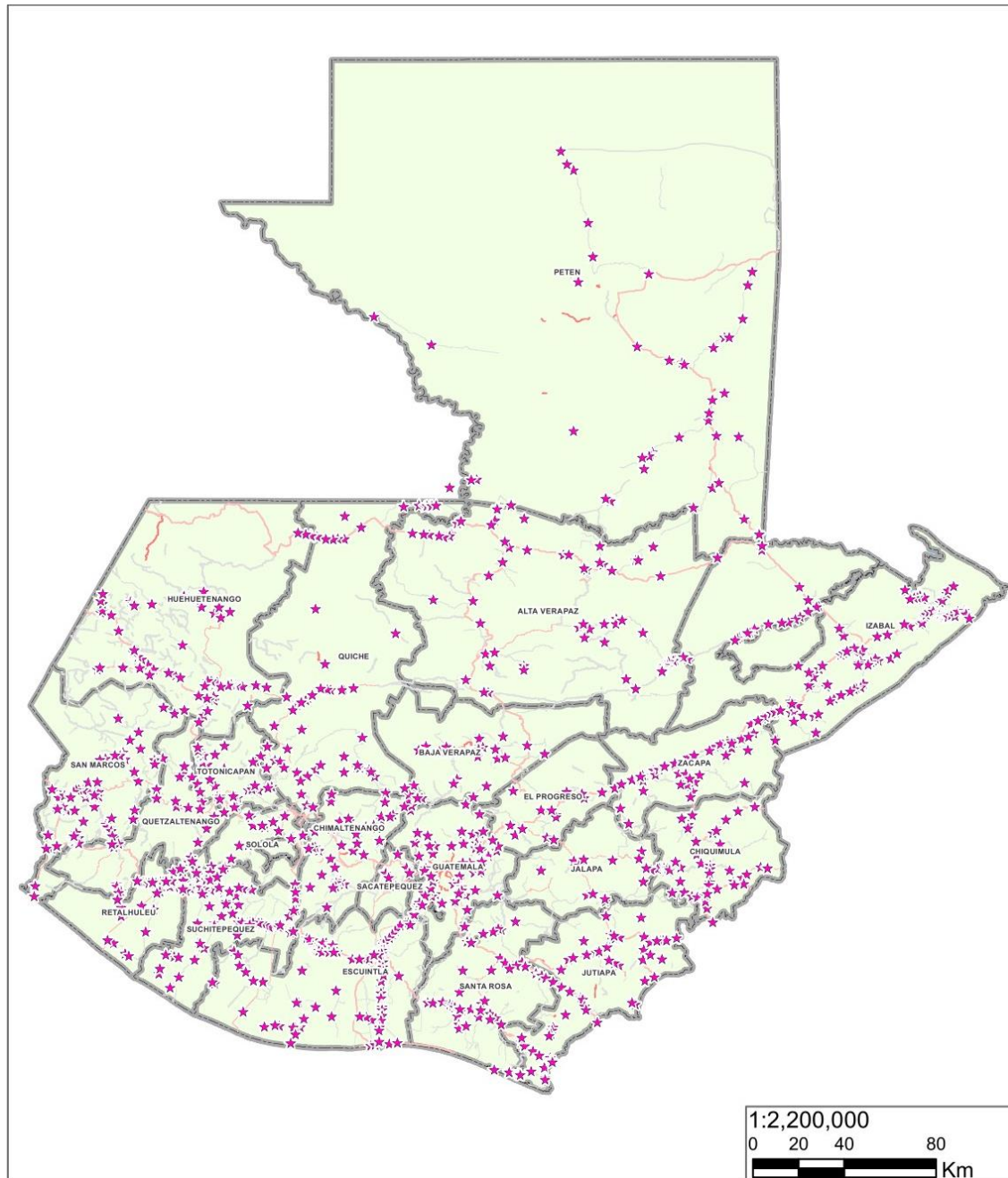
2.1. Puentes del país

La red vial nacional registrada se encuentra inventariada al igual que las estructuras de drenaje mayor que existen sobre esta red vial, por lo que se hizo la consulta la Unidad de Conservación Vial (COVIAL), donde se pudo determinar que existen 1847 estructuras de drenaje mayor, dentro de la red vial registradas en el país.

Es importante tener claro cuál es el panorama nacional en cuanto al tipo de elementos de restricción que tienen los puentes actualmente en el país.

Los puentes dentro de la red vial se muestran en siguiente mapa.

Figura 9. **Mapa de ubicación de estructuras de drenaje registradas**



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS.

2.2. Puentes en zona sísmica 4.2

En la zona sísmica 4.2 se encuentra formada por 11 departamentos, con un total de 140 municipios que integran la zona sísmica 4.2, lo que la hace una zona sísmica extensa y con gran cantidad de puentes, haciendo un total de 521 de estructuras de drenaje mayor dentro de la zona objeto de estudio.

Cabe resaltar que existen 53 municipios dentro de la zona sísmica 4.2, que no tiene estructuras de drenaje mayor registradas dentro de la red vial principal.

Para poder hacer un análisis sobre una muestra considerable, se determinó hacerla sobre las cabeceras de los departamentos que se localizan dentro de la zona sísmica 4.2, para un total de 11 municipios de 11 departamentos.

Los puentes localizados dentro de los 11 municipios se listan a continuación:

Tabla III. **Puentes de los 11 municipios objeto de estudio**

Nombre	Ruta	Estación	Longitud total	Ancho total	Longitud	Latitud
Guatemala - Guatemala						
RD-GUA-52-01 - 12+687	RD-GUA-52-01	12+687	10.85	8.4	-90.422032	14.6497765
Rodriguitos	CA-09-NORTE-02	8+300	30.9	18.7	-90.450852	14.6496967
San Juan ida	CA-09-NORTE-04	21+000	50.6	9.5	-90.380535	14.7047042
San Juan retorno	CA-09-NORTE-04	21+000	55.7	9.7	-90.380561	14.70484
San Cristobal	CA-01-OCCIDENTE-01	18+550	122	20.2	-90.573694	14.58328
Antigua Guatemala - Sacatepequez						
Rio Pensativo	RN-10	41+900	5.6	7.5	-90.72139	14.556614
Barberena Santa Rosa						

Continuación de la tabla III.

Nombre	Ruta	Estación	Longitud total	Ancho total	Longitud	Latitud
Sin Nombre (En Los Verdes)	RN-02-03	37+500	35.2	5	-90.438357	14.3949731
Sin Nombre (En Los Verdes)	RN-02-03	36+900	9.5	5.2	-90.443496	14.3970433
Sin Nombre (En San Nicolas)	CPR-SRO-03	60+664	50.5	3.5	-90.45094	14.2228064
Aguacapa	RD-SRO-04-01	45+500	64.7	4.5	0	0
Aguacapa puente 1	CA-01-ORIENTE-06B	43+500	0	0	-90.433225	14.3379418
Aguacapa puente 2	CA-01-ORIENTE-06B	43+500	0	0	-90.433228	14.3376708
Cimarron puente 1	CA-01-ORIENTE-06B	45+525	0	0	-90.416564	14.3340571
Cimarron puente 2	CA-01-ORIENTE-06B	45+525	0	0	-90.416564	14.3340571
Jutiapa Jutiapa						
Amayito	CA-01-ORIENTE-12	111+430	56.1	8.95	-89.949204	14.2840575
Rio Salado	CA-01-ORIENTE-12	115+860	40.3	8.95	-89.910016	14.2937341
Rio La Virgen	CA-01-ORIENTE-13	117+409	25.75	9	-89.897746	14.2974244
Amayo Ingenio	RD-JUT-02-01	124+900	59.2	5.95	-89.897774	14.297424
San Antonio	CA-01-ORIENTE-13	122+025	38.58	8.85	-89.866235	14.3147229
Las Marias.	RN-23-01	129+450	5.4	4.95	-89.817683	14.2420715
Rn-23-01 - 127+068	RN-23-01	127+068	4.5	7	-89.83543	14.2513991
Las Trancas	RN-23-01	124+235	24.5	5.8	-89.857728	14.2623956
Las Posas	CA-01-ORIENTE-14	129+680	15.6	9.2	-89.815444	14.3516035
Puerto Barrios Izabal						
Puente machacas	CA-09-NORTE-22	278+530	15.2	9.6	-88.567113	15.615279
Puente Veracruz	CA-09-NORTE-22	279+550	20.4	9.6	-88.562006	15.6206116
Puente los limones	CA-09-NORTE-22	281+690	6.4	8.5	88.549952	15.632392
Puente agua caliente	CA-09-NORTE-23	289+190	10.3	8.6	88.576554	15.6814582
Cacao	CA-09-NORTE-24	292+140	36.1	13.9	88.586622	15.700943
Puente sin nombre	CA-09-NORTE-24	292+700	8.45	10.4	88.588117	15.7049087
Puente rio salado	CA-09-NORTE-24	293+900	8.75	14	88.586666	15.700993
Puente agua caliente	CA-09-NORTE-A	291+855	11.1	9	-88.586927	15.6958345
Piedras negras ii	CA-09-NORTE-A	293+638	8.65	10	-88.568326	15.6887114
Puente piedras negras	CA-09-NORTE-A	293+160	5.1	10	-88.597068	15.6885938
Puente quebrada seca	CA-09-NORTE-A	294+536	21.2	9	-88.609973	15.6878123
Puente la esperanza	CA-13-ENTRERIOS	284+250	9.7	9.3	-88.533034	15.6338395
Puente el tigre	CA-13-ENTRERIOS	286+980	41.17	9.3	-88.510263	15.6256463
Puente san francisco	CA-13-ENTRERIOS	287+548	38.6	9.3	-88.504773	15.623542
Puente el mudo	CA-13-ENTRERIOS	288+635	13.6	9.3	-88.496064	15.6186487
Puente canjichas	CA-13-ENTRERIOS	288+960	21.4	9.3	-88.493633	15.6165503
Puente el macho	CA-13-ENTRERIOS	289+850	28.7	9.3	-88.487552	15.6113134

Continuación de la tabla III.

Nombre	Ruta	Estación	Longitud total	Ancho total	Longitud	Latitud
Puente caña real	CA-13-ENTRERIOS	290+970	12.75	9.3	-88.47841	15.6096488
Puente las palmeras	CA-13-ENTRERIOS	291+670	12.75	9.3	-88.471948	15.611075
Puente skimo	CA-13-ENTRERIOS	293+357	10.75	9.3	-88.459353	15.6182812
Puente chinook	CA-13-ENTRERIOS	295+185	7.7	9.3	-88.443486	15.6138579
Puente cinchado	CA-13-ENTRERIOS	297+662	7.7	9.3	-88.431682	15.6318039
Puente motagua	CA-13-ENTRERIOS	301+250	277	9.7	-88.406591	15.6344698
Puente gogo	CA-13-ENTRERIOS	302+350	10.5	9.3	-88.401816	15.6262484
Puente arizona	CA-13-ENTRERIOS	302+602	16.5	9.3	-88.400832	15.6241758
Puente jimeritos	CA-13-ENTRERIOS	303+060	41.05	41.05	-88.398988	15.6204999
Puente Colon	CA-13-ENTRERIOS	303+355	18.45	9.3	-88.386367	15.6050067
Final San Agustin	RD-IZB-18	296+700	12.4	5.65	-88.626033	15.6836537
Puente sin nombre	RD-IZB-17	291+690	18.5	3.35	-88.504837	15.6692469
Puente sin nombre	RD-IZB-17	293+400	9	4.5	-88.495367	15.6768043
Sin-nombre	RD-IZB-17	297+480	18.5	3.3	-88.477115	15.7033285
Puente sin nombre	RD-IZB-17	296+540	12.5	5.2	NULL	NULL
Puente sin nombre	RD-IZB-17	299+000	12.5	5.2	-88.47184	15.7157915
Sin-nombre	RD-IZB-18	302+305	0	0	-88.448843	15.7321056
Santa Cruz del Quiché						
RD-QUI-14-01 - 167+069.50	RD-QUI-14-01	167+069.5	5.7	9.05	-91.176939	15.0236203
RD-QUI-14-01 - 167+110	RD-QUI-14-01	167+110	6.2	8.8	-91.177078	15.0236757
Canchó	RN-15-02	157+560	37	4.7	-91.124822	15.0053303
Chimaltenango - Chimaltenango						
RD-CHM-01 - 63+050	RD-CHM-01	63+050	9	11.3	-90.788666	14.7276168
RD-CHM-01 - 64+733	RD-CHM-01	64+733	15.5	4.16	-90.788385	14.7370201
Xaya pixcaya	CR-CHM-47	61+600	25	5.2	-90.852371	14.6804439
Sololá Sololá						
No tiene	RN-01-05	131+550	5	6.8	-91.173515	14.8335661
Quiskap	RD-SOL-04-08	164+450	17	6.8	-91.197742	14.7742997
Argueta (puente nuevo)	CA-01-OCC-08	139+000	40.6	10	-91.220797	14.8104029
Argueta (puente viejo)	CA-01-OCC-08	139+045	46.95	8.62	-91.220837	14.8101411
Atanasio Tzul	RN-01-09	198+970	0	0	-91.374762	14.9094241
Totonicapán - Totonicapán						
Bocoba	CPR-TOT-05-01	175+600	3.6	8.7	-91.226849	14.9485794
Agua caliente	CPR-TOT-05-01	178+600	6.5	3.8	-91.240828	14.9442229
Panimajox	CPR-TOT-05-01	187+650	6.3	4.5	-91.299404	14.9306398

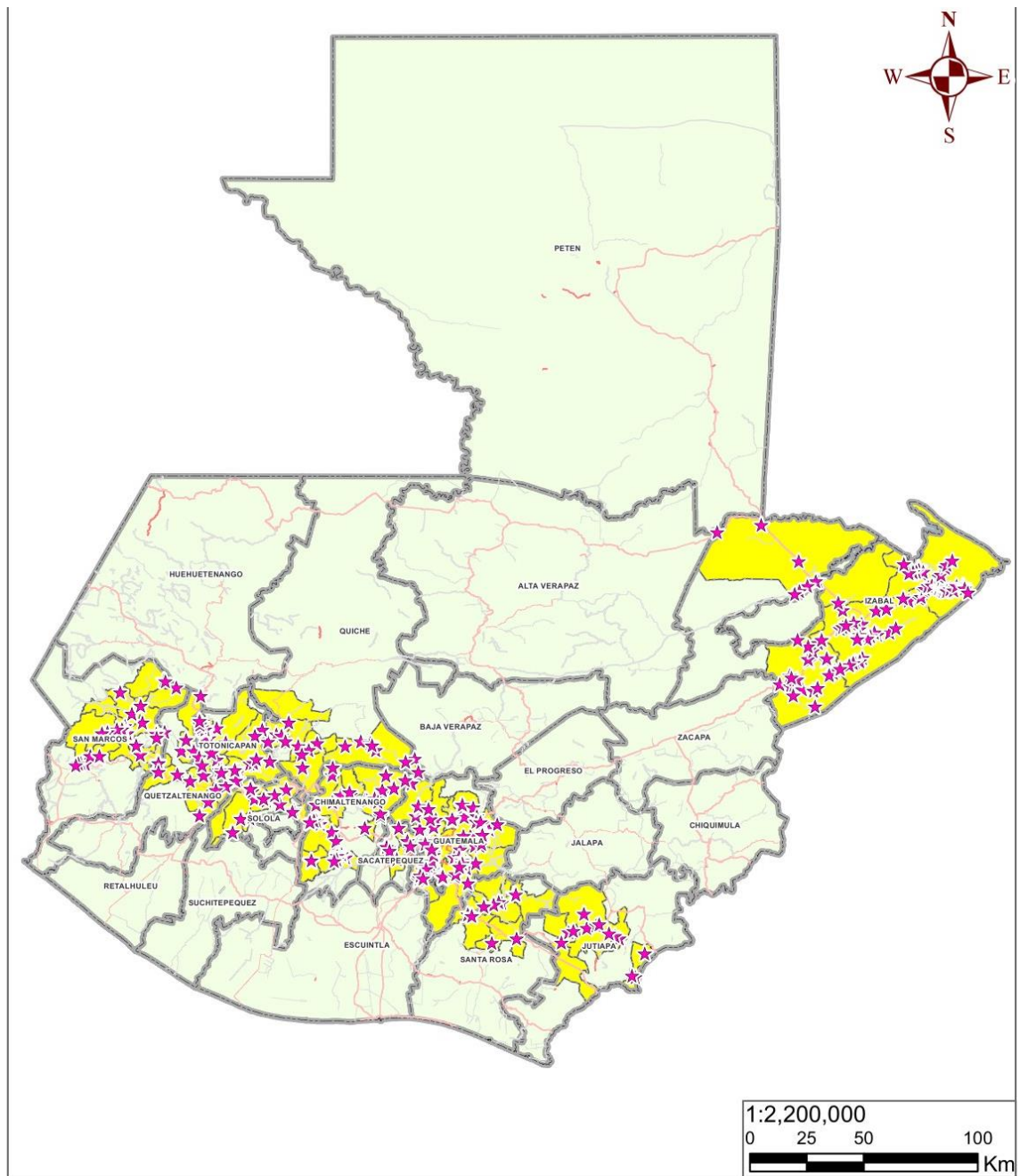
Continuación tabla III.

Nombre	Ruta	Estación	Longitud total	Ancho total	Longitud	Latitud
Candelaria	RD-TOT-01	206+468	5	7.4	-91.313873	14.9358895
Panasotz	RD-TOT-01	205+195	4.2	7.3	-91.30701	14.9374656
Guaca	RD-TOT-03-02	204+610	9.5	8.4	-91.364711	14.9050504
Estación río seco	CPR-TOT-01	212+990	8.9	7.15	-91.572902	15.0329496
CPR-TOT-01 - 213+680	CPR-TOT-01	213+680	4.25	4.9	-91.577214	15.0321089
Sin nombre	RD-TOT-01	197+000	0	0	-91.321719	14.9346548
Pachoc	RD-TOT-01	195+500	0	0	-91.306423	14.9375697
Chuatroj	RD-TOT-22	1+300	0	0	-91.416426	14.8450741
San Marcos - San Marcos						
Los molinos	RD-SM-02-N-02	2+225	9.2	4.5	-91.803297	15.1309927
Coche 273+485	RD-SM-02-02	273+485	0	0	-91.83118	15.0810779
Serchil	RN-12-NORTE-01	268+140	0	0	-91.819461	15.0517382
Las vegas	RN-12-NORTE-01	268+550	0	0	-91.823323	15.0532497
RN-12-NORTE-02 271+020	RN-12-NORTE-02	271+020	0	0	-91.836871	15.0661015
RN-12-NORTE-02 272+020	RN-12-NORTE-02	272+020	0	0	-91.838016	15.0677074
Llano de la guardia 1	RN-12-NORTE-02	272+900	0	0	-91.842733	15.0677224
Llano de la guardia 2	RN-12-NORTE-02	272+950	0	0	-91.843085	15.0680225
Quetzaltenango - Quetzaltenango						
Samala 1	CITO-180-01	222+250	51	8	-91.459431	14.829469
Carlin	RN-01-A-07	206+643	4.3	45.2	-91.565358	14.8651782
Las rosas	RN-01-B-02	189+500			-91.485574	14.846053

Fuente: elaboración propia, utilizando datos de COVIAL.

Del listado obtenido se determinó que existen 100 puentes de diferentes tipologías, por lo que se procedió a hacer una selección aleatoria principalmente en los municipios de mayor cantidad de estructuras como en: Totonicapán, Barberena y Puerto Barrios, en los municipios restantes se procedió a evaluar todos los puentes listados, de este listado se descartaron las estructuras del tipo bóveda.

Figura 10. Mapa de ubicación de puentes de la zona sísmica 4.2



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS.

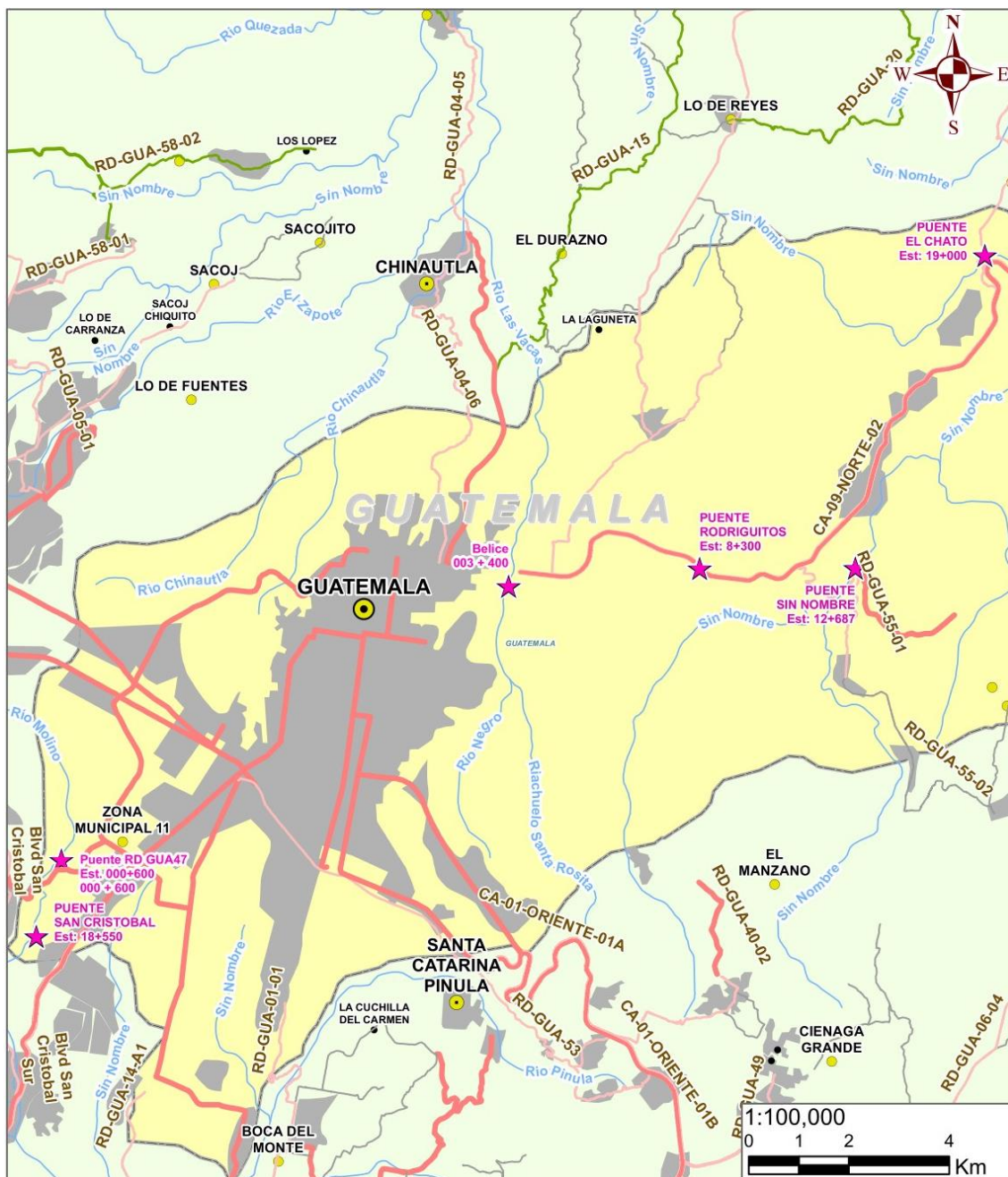
2.3. Evaluación según municipio

A continuación, se presenta un resumen de los municipios evaluados, así como el listado de puentes y los mapas de ubicación de los puentes visitados.

2.3.1. Guatemala

En el municipio de Guatemala departamento de Guatemala se visitaron 4, que están registrados dentro de la red vial nacional, en este municipio se observó que los puentes que se encuentran dentro de la zona urbana no están a cargo de las instituciones encargadas de la red vial nacional, por lo que son pasos a desnivel y puentes urbanos no se localizan dentro del listado.

Figura 11. Mapa de ubicación, puentes de Guatemala



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS.

Tabla IV. **Listado de puentes evaluados en el municipio de Guatemala**

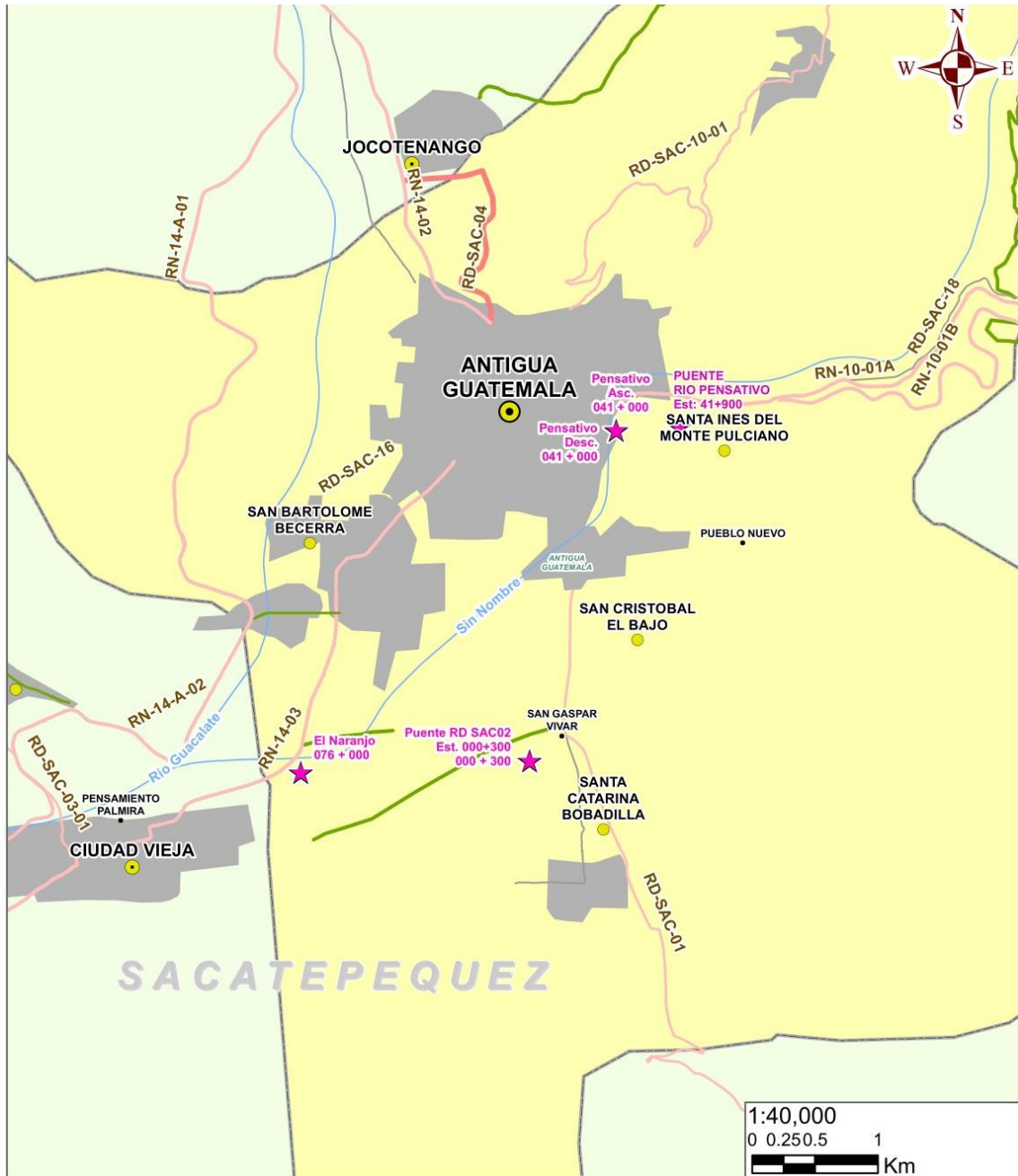
Nombre	Ruta	Est.	Long	Tipo puente	Elementos de restricción
Belice	CA-09-N-01	3+400		Estructura metálica	Posee elementos de disipación sísmica recientemente colocados
Rodriguitos	CA-09-N-02	8+300	30.9	Concreto preesforzado	No posee elementos de restricción, únicamente diafragmas
San juan ida	CA-09-N-04	21+00 0	50.6	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico
San juan retorno	CA-09-N-04	21+00 0	55.7	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico

Fuente: elaboración propia.

2.3.2. Antigua Guatemala

En el municipio de Antigua Guatemala departamento de Sacatepéquez, únicamente se localizaron 3 puentes, según se muestra en el mapa.

Figura 12. Mapa de ubicación, puentes de Antigua Guatemala



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS.

Tabla V. **Listado de puentes evaluación en el municipio de Antigua Guatemala**

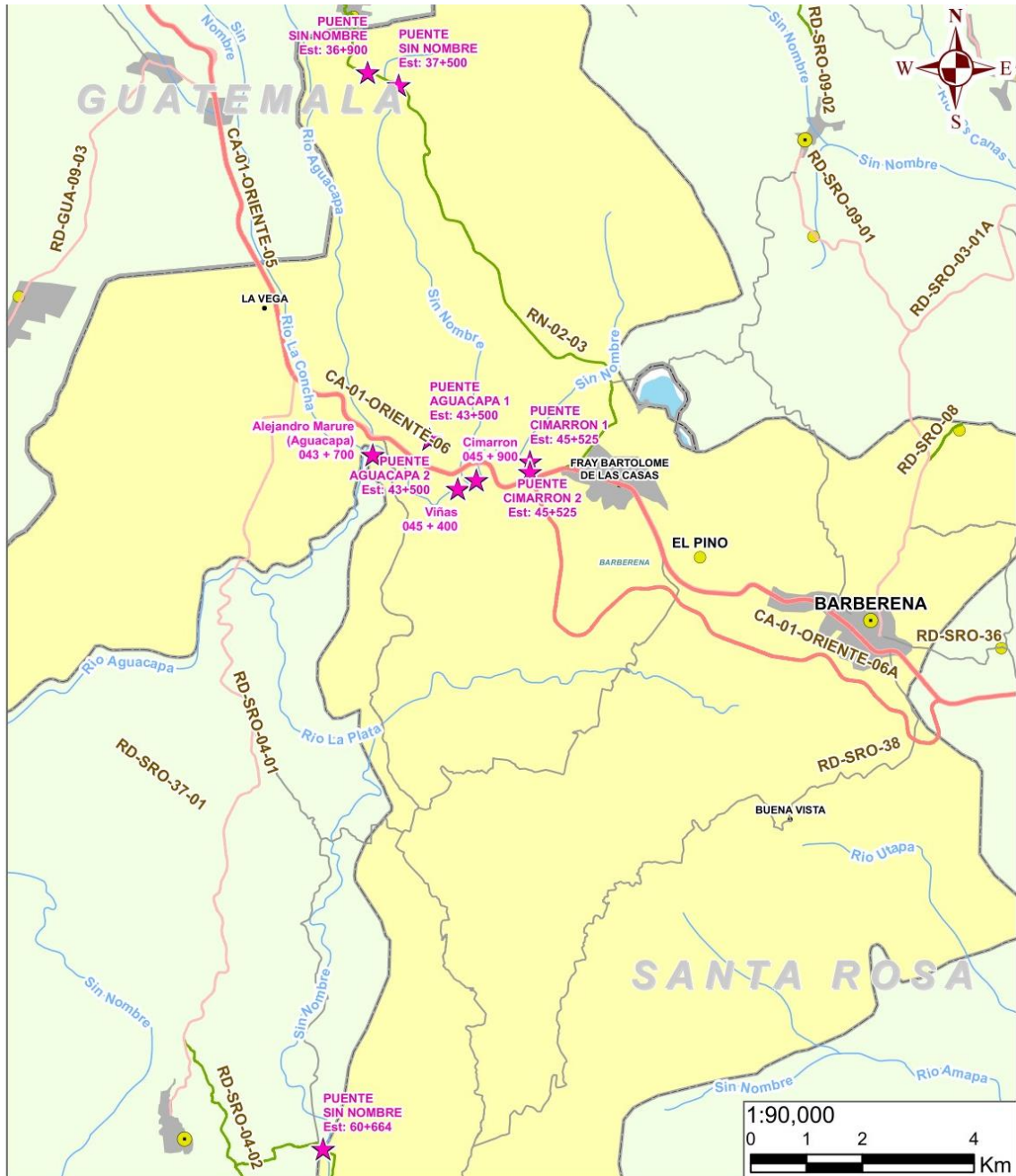
Nombre	Ruta	Est.	Long	Tipo puente	Elementos de restricción
Rio pensativo	RN-10	41+900	5.6	Concreto reforzado	No posee elementos de restricción, únicamente diafragmas

Fuente: elaboración propia.

2.3.3. Barberena

En el municipio de Barberena departamento de Santa Rosa, se visitaron 5 puentes de los 11 listados y ubicados en el mapa, priorizando los que se encuentra sobre rutas de mayor importancia comercial para el país, cabe resaltar que algunos de los puentes evaluados son paralelos, por lo que uno es de reciente construcción y otros son más antiguas encontrándose criterios diseño de elementos de restricción diferentes, punto importante a resaltar en la investigación.

Figura 13. Mapa de ubicación, puentes de Barberena



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS.

Tabla VI. **Listado de puentes evaluación en el municipio de Barberena**

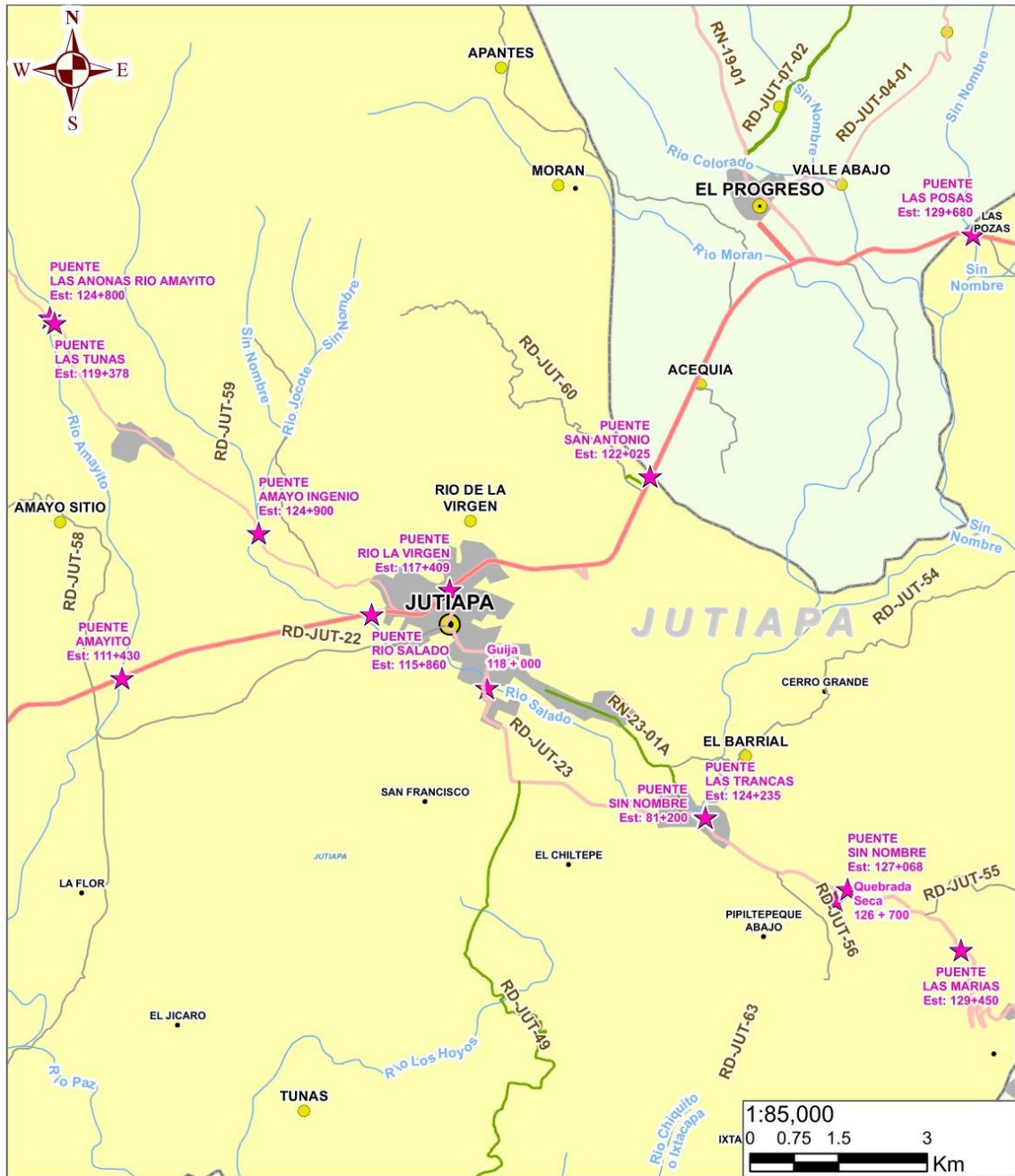
Nombre	Ruta	Est.	Long	Tipo puente	Elementos de restricción
Aguacapa puente 1	CA-01-OR-06B	43+500	0	Concreto reforzado	No posee elementos de restricción, únicamente diafragmas
Aguacapa puente 2	CA-01-OR-06B	43+500	0	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico
Cimarron puente 1	CA-01-OR-06B	45+525	0	Concreto reforzado	No posee elementos de restricción, únicamente diafragmas
Cimarron puente 2	CA-01-OR-06B	45+525	0	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico
Viñas puente 1	CA-01-OR-06B	45+400		Puente de concreto con vigas perfil W	No posee elementos de restrucción, únicamente perno de anclaje al patín de la viga
Viñas puente 2	CA-01-OR-06B	45+400		Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas

Fuente: elaboración propia.

2.3.4. Jutiapa

En el municipio de Jutiapa departamento de Jutiapa, se visitaron 5 puentes de los 9 listados y ubicados en el mapa, priorizando los que se encuentra sobre rutas de mayor importancia comercial para el país.

Figura 14. Mapa de ubicación, puentes de Jutiapa



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS.

Tabla VII. **Listado de puentes evaluados en el municipio de Jutiapa**

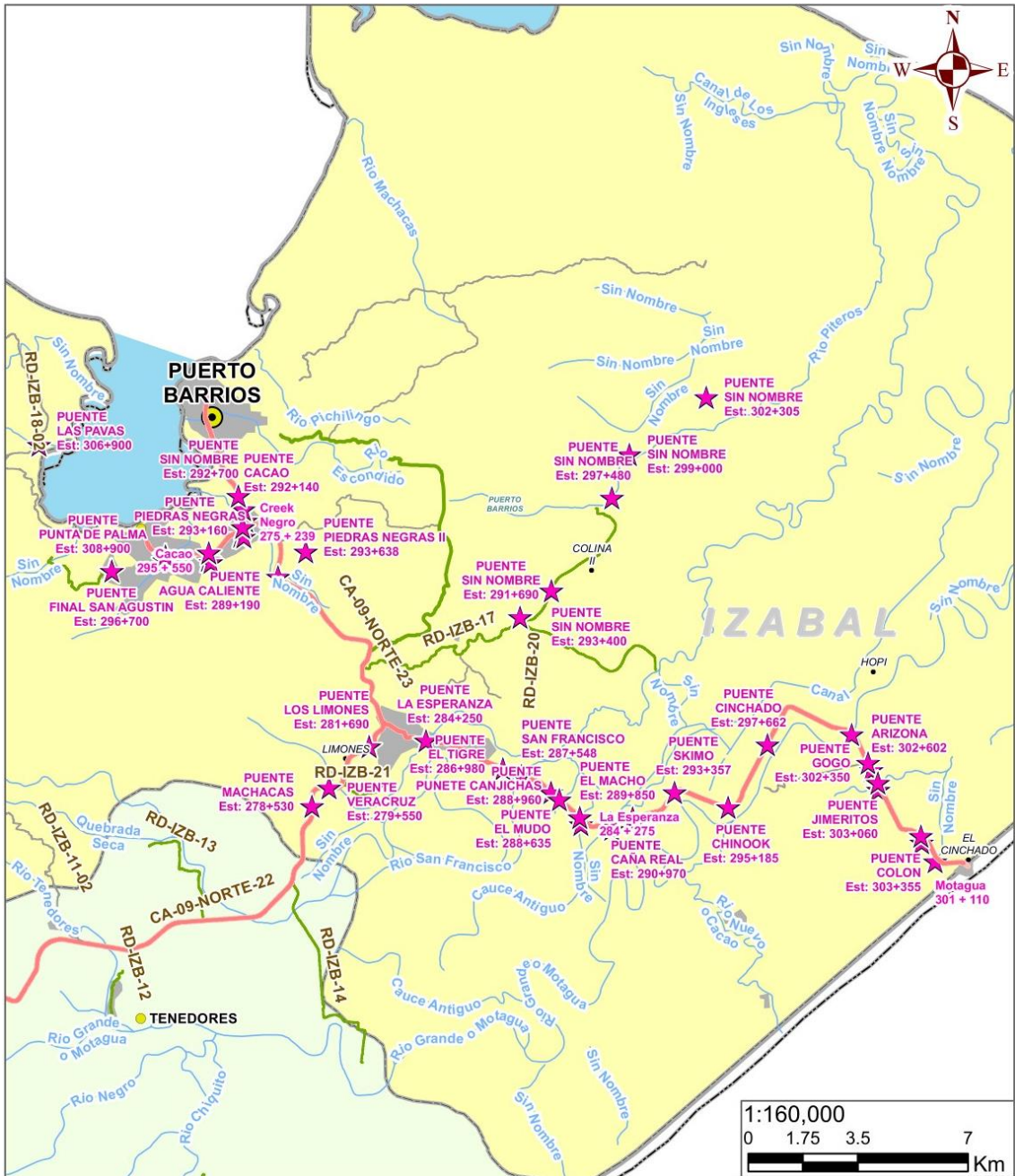
Nombre	Ruta	Est	Long	Tipo puente	Elementos de restricción
Amayito	CA-01-OR-12	111+430	56.1	Puente de concreto con vigas perfil W	No posee elementos de restricción, únicamente balancines y diafragmas
Rio salado	CA-01-OR-12	115+860	40.3	Puente de concreto con vigas perfil W	No posee elementos de restricción, únicamente perno de anclaje al balancín de la viga
Rio la virgen	CA-01-OR-13	117+409	25.7 5	Puente de concreto con vigas perfil W	No posee elementos de restricción, únicamente balancines y diafragmas
San Antonio	CA-01-OR-13	122+025	38.5 8	Concreto reforzado	No posee elementos de restricción, únicamente diafragmas externos
Las posas	CA-01-OR-14	129+680	15.6	Concreto reforzado	No posee elementos de restricción, únicamente diafragmas externos y balacines metálicos

Fuente: elaboración propia.

2.3.5. Puerto Barrios

En el municipio de Puerto Barrios, del departamento de Izabal, se visitaron 21 puentes de 34 listados y ubicados en el mapa de la figura 14, priorizando los que se encuentran sobre las rutas de mayor importancia comercial del país, Izabal es uno de los departamentos que más puentes poseen, una de las razones de esta afirmación es la hidrología ya que los departamentos donde están los finales de las cuencas principales poseen más estructuras de drenaje mayor.

Figura 15. Mapa de ubicación, puentes de Jutiapa



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS.

Tabla VIII. Listado de puentes evaluados en el municipio de Puerto

Barrios

Nombre	Ruta	Est	Long	Tipo puente	Elementos de restricción
Puente machacas	CA-09-N-22	278+530	15.2	Puente de concreto con vigas perfil W	No posee elementos de restricción, únicamente diafragmas
Puente veracruz	CA-09-N-22	279+550	20.4	Puente de concreto con vigas perfil W	No posee elementos de restricción, únicamente diafragmas
Puente los limones	CA-09-N-22	281+690	6.4	Concreto reforzado	No posee elementos de restricción es un puente tipo losa
Puente agua caliente	CA-09-N-23	289+190	10.3	Puente de concreto con vigas perfil W	No posee elementos de restricción, únicamente diafragmas
Puente quebrada seca	CA-09-N-A	294+536	21.2	Puente de concreto con vigas perfil W	No posee elementos de restricción, únicamente diafragmas
Puente la esperanza	CA-13-ENTRERIOS	284+250	9.7	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas
Puente el tigre	CA-13-ENTRERIOS	286+980	41.17	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas, no posee elemento longitudinal a pesar de ser un puente de varias luces
Puente san francisco	CA-13-ENTRERIOS	287+548	38.6	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas, no posee elemento longitudinal a pesar de ser un puente de varias luces
Puente el mudo	CA-13-ENTRERIOS	288+635	13.6	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas
Puente canjichas	CA-13-ENTRERIOS	288+960	21.4	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas, no posee elemento longitudinal
Puente el macho	CA-13-ENTRERIOS	289+850	28.7	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas, no posee elemento longitudinal a pesar de ser un puente de varias luces
Puente caña real	CA-13-ENTRERIOS	290+970	12.75	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas

Continuación tabla VIII.

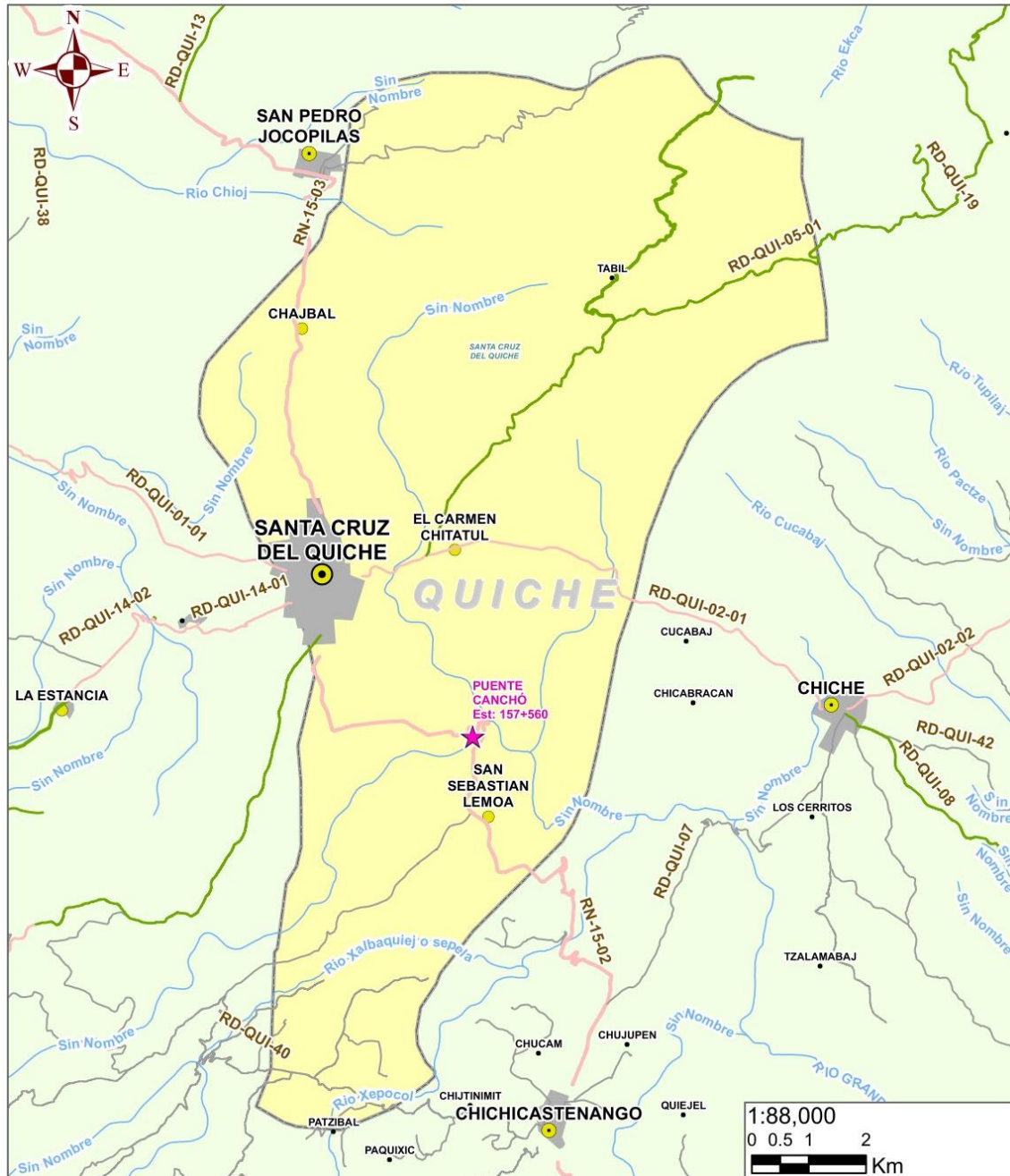
Nombre	Ruta	Est	Long	Tipo puente	Elementos de restricción
Puente las palmeras	CA-13-ENTRERIOS	291+670	12.75	Concreto reforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas
Puente skimo	CA-13-ENTRERIOS	293+357	10.75	Concreto reforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico externo y diafragmas
Puente chinook	CA-13-ENTRERIOS	295+185	7.7	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas
Puente cinchado	CA-13-ENTRERIOS	297+662	7.7	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas
Puente motagua	CA-13-ENTRERIOS	301+250	277	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo diafragmas, no posee elemento longitudinal a pesar de ser un puente de varias luces ni topes sísmicos
Puente gogo	CA-13-ENTRERIOS	302+350	10.5	Puente de concreto con vigas perfil W	No posee elementos de restricción, únicamente balancines y diafragmas
Puente arizona	CA-13-ENTRERIOS	302+602	16.5	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas
Puente jimeritos	CA-13-ENTRERIOS	303+060	41.05	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas
Puente colon	CA-13-ENTRERIOS	303+355	18.45	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas

Fuente: elaboración propia.

2.3.6. Santa Cruz del Quiché

En el municipio de Santa Cruz, del departamento de Quiché, se visitó el único puente registrado como se muestra en el mapa de la figura 15.

Figura 16. Mapa de ubicación, puentes de Santa Cruz



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS.

Tabla IX. **Listado de puentes evaluados en el municipio de Santa Cruz del Quiché**

Nombre	Ruta	Est	Long	Tipo puente	Elementos de restricción
Canchó	RN-15-02	157+560	37	Puente de concreto con vigas perfil W	Posee diafragmas y topes sísmicos

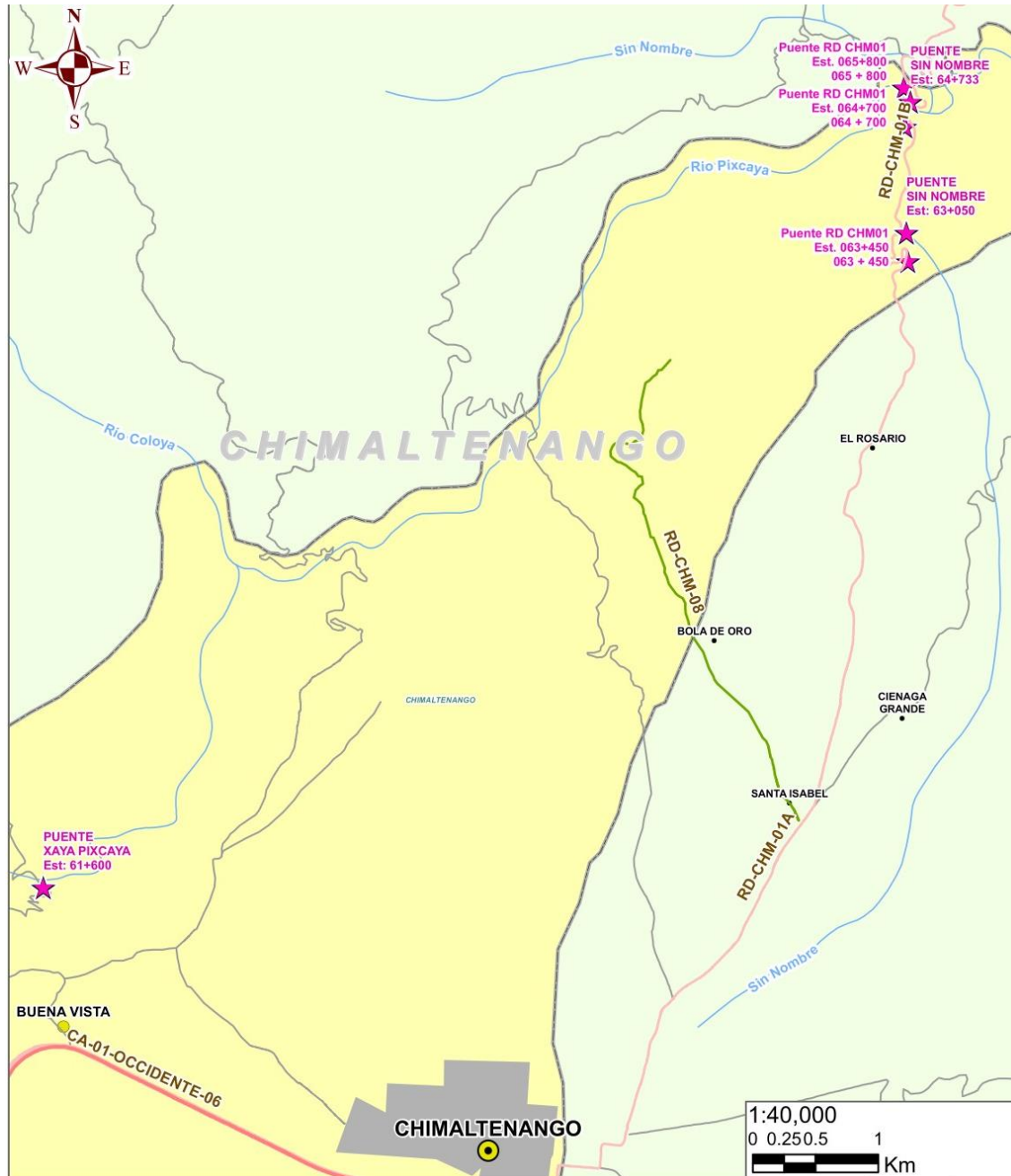
Fuente: elaboración propia.

Al realizar la visita se comprobó que dos de las estructuras dentro del municipio de Santa Cruz son del tipo bóveda, por lo cual se descartó su evaluación.

2.3.7. Chimaltenango

En el municipio de Chimaltenango, del departamento de Chimaltenango, se visitaron 3 puentes de 3 listados y ubicados en el mapa de la figura 16.

Figura 17. Mapa de ubicación, puentes de Chimaltenango



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS.

Tabla X. **Listado de puentes evaluación en el municipio de Chimaltenango**

Nombre	Ruta	Est	Long	Tipo puente	Elementos de restricción
RD-CHM-01 - 63+050	RD-CHM-01	63+050	9	Puente de concreto con vigas perfil W	No posee elementos de restricción, únicamente diafragmas
RD-CHM-01 - 64+733	RD-CHM-01	64+733	15.5	Puente de concreto con vigas perfil W	Posee topes sísmicos externos y diafragmas

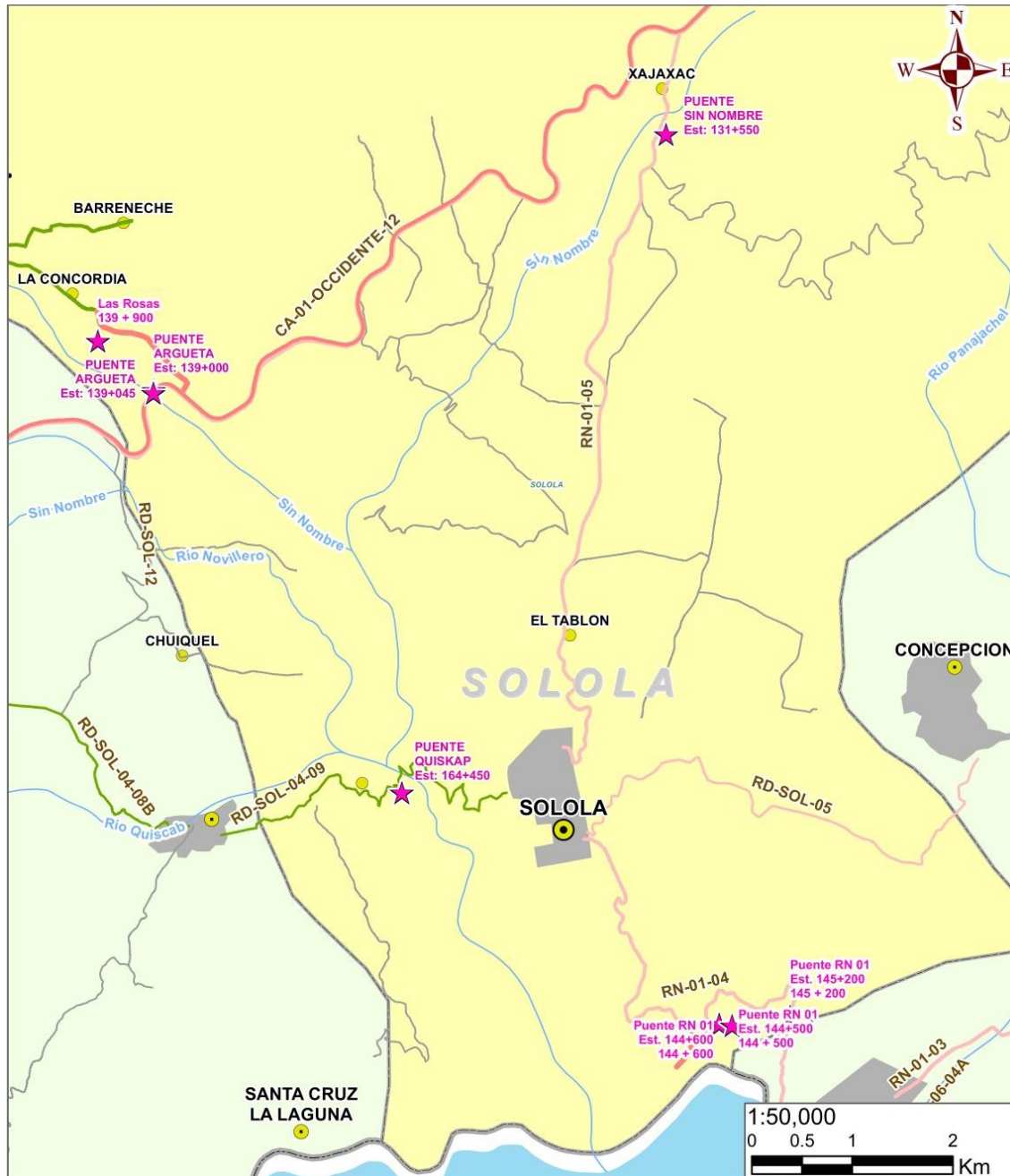
Fuente: Elaboración propia

Al realizar la visita se comprobó que dos de las estructuras dentro del municipio de Chimaltenango es del tipo bóveda, por lo cual se descartó su evaluación.

2.3.8. Sololá

En el municipio de Sololá departamento de Sololá, se visitaron 6 puentes de los 8 listados y ubicados en el mapa, priorizando los que se encuentran sobre rutas de mayor importancia comercial para el país.

Figura 18. Mapa de ubicación, puentes de Sololá



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS.

Tabla XI. **Listado de puentes evaluación en el municipio de Sololá**

Nombre	Ruta	Est	Long	Tipo puente	Elementos de restricción
Argueta (puente nuevo)	CA-01-OCC-08	139+000	40.6	Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas
Argueta (puente viejo)	CA-01-OCC-08	139+045	46.95	Tipo warren en una luz y vigas W en la segunda luz	Posee diafragmas y platina con perno, no posee otro elemento de restricción ni longitudinal ni lateral
Atanasio Tzul	RN-01-09	198+970	0	Concreto preesforzado	No posee elemento de restricción
La catarata	RN-01-04	144+500		Concreto y bóveda de metal	No posee elemento de restricción
145+200	RN-01-04	145+200		Concreto	No posee elemento de restricción

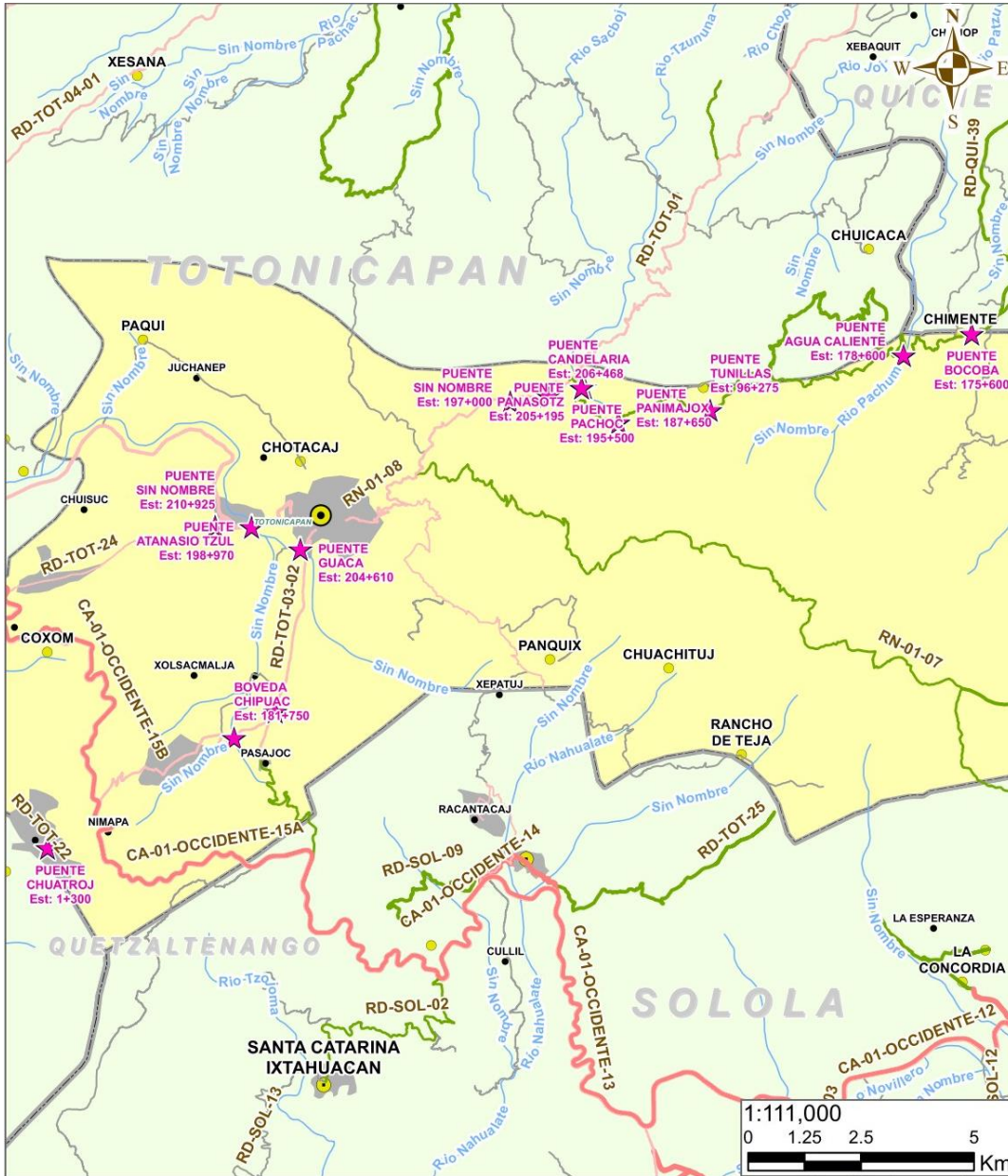
Fuente: elaboración propia.

Al realizar la visita se comprobó que dos de las estructuras dentro del municipio de Sololá son del tipo bóveda, por lo cual se descartó su evaluación.

2.3.9. Totonicapán

En el municipio de Totonicapán departamento de Totonicapán, se visitaron 5 puentes de los 13 listados y ubicados en el mapa, priorizando los que se encuentran sobre rutas de mayor importancia comercial para el país.

Figura 19. Mapa de ubicación, puentes de Totonicapán



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS.

Tabla XII. **Listado de puentes evaluados en el municipio de Totonicapán**

Nombre	Ruta	Est.	Long	Tipo puente	Elementos de restricción
Panimajox	CPR-TOT-05-01	187+650	6.3	Concreto	No posee elementos de restricción.
Panasotz	RD-TOT-01	205+195	4.2	Concreto	No posee elementos de restricción.

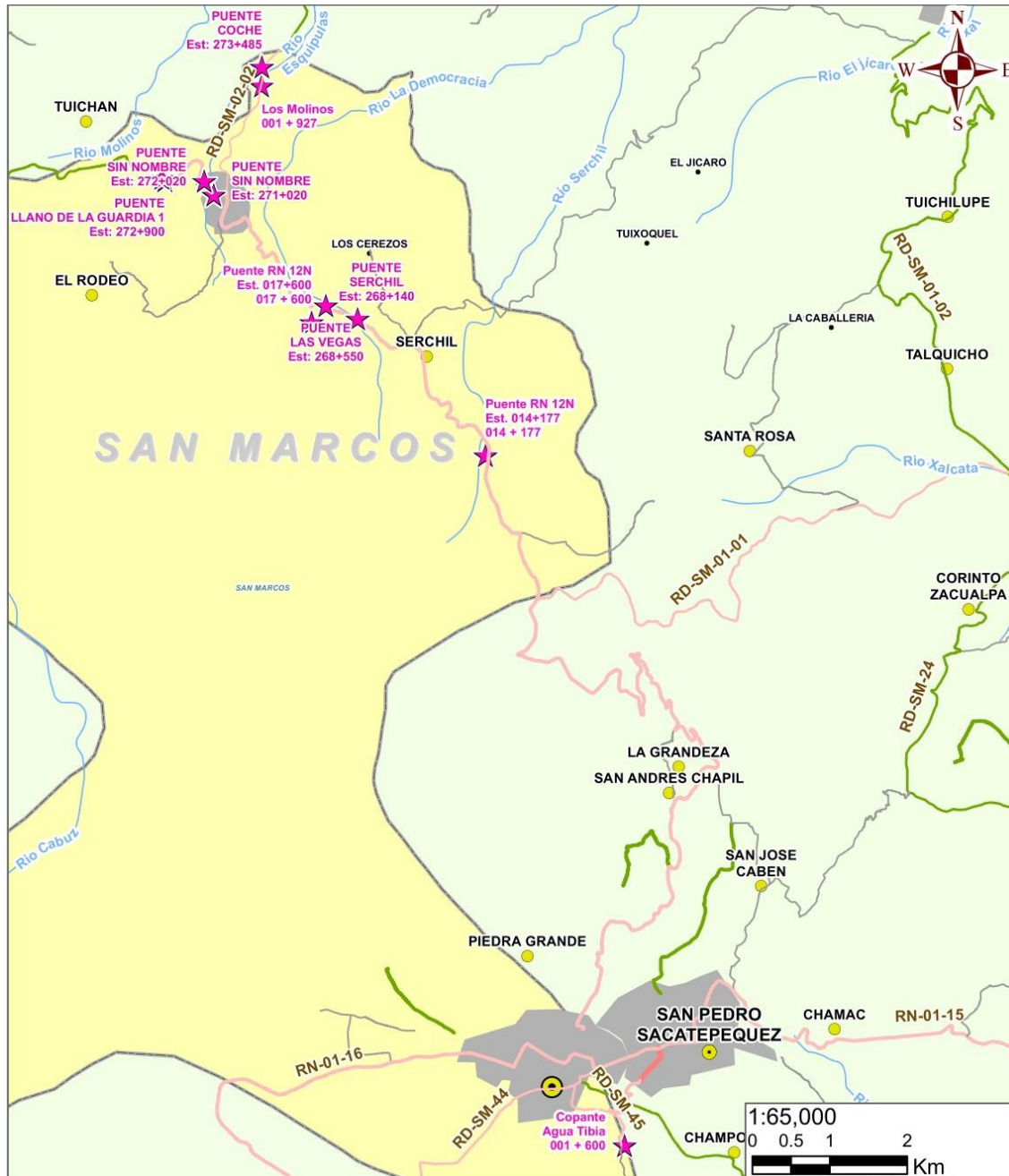
Fuente: elaboración propia.

Al realizar la visita se comprobó que tres de las estructuras dentro del municipio de Totonicapán son del tipo bóveda, por lo que se descartó su evaluación.

2.3.10. San Marcos

En el municipio de San Marcos departamento de San Marcos, se visitaron 3 puentes de los 5 listados y ubicados en el mapa, priorizando los que se encuentran sobre rutas de mayor importancia, en el caso específico de San Marcos, varias de las estructuras de drenaje mayor, realmente son tuberías o bóvedas pequeñas, las que no son parte de la. Investigación.

Figura 20. Mapa de ubicación, puentes de San Marcos



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS.

Tabla XIII. **Listado de puentes evaluación en el municipio de San Marcos**

Nombre	Ruta	Est	Long	Tipo puente	Elementos de restricción
Las vegas	RN-12-N-01	268+550	0	Concreto reforzado	No posee elementos de restricción es un puente tipo losa
Copante agua tibia	RD-SM-45	1+600		Concreto reforzado	No posee elementos de restricción es un puente tipo losa

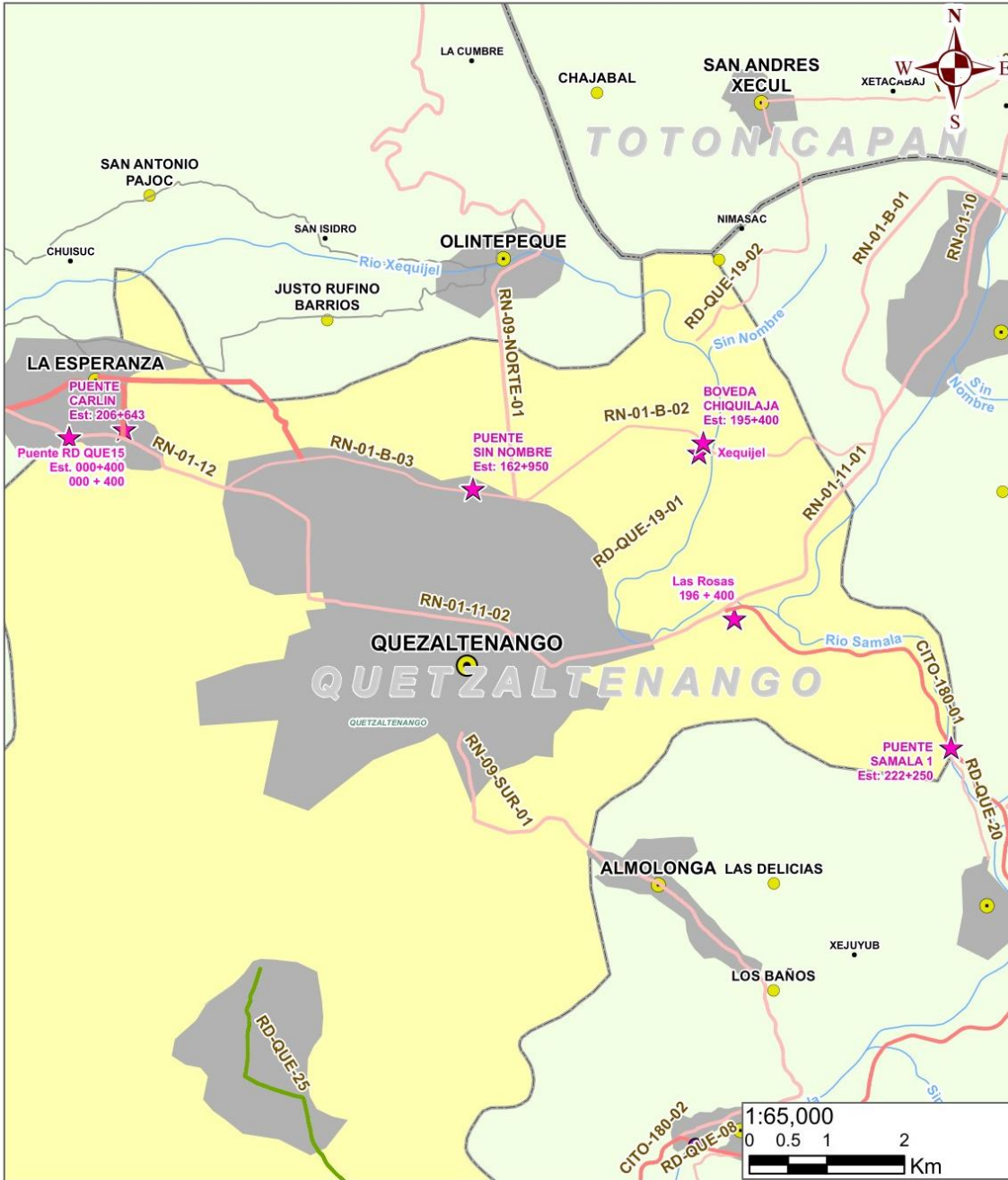
Fuente: elaboración propia.

En el caso de los puentes evaluados en San Marcos, únicamente se hicieron 2 debido a que los otros puentes listados, eran tuberías o bóvedas, no aportando información de importancia a la investigación.

2.3.11. Quetzaltenango

En el municipio de Quetzaltenango departamento de Quetzaltenango, se visitaron 5 puentes de los 5 listados y ubicados en el mapa, en el caso de Quetzaltenango hay estructuras de drenaje mayor registradas que son bóvedas, las que no son de relevancia para la investigación.

Figura 21. Mapa de ubicación, puentes de Quetzaltenango



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS.

Tabla XIV. **Listado de puentes evaluados en el municipio de Quetzaltenango**

Nombre	Ruta	Est.	Long	Tipo puente	Elementos de restricción
Samalá 1	CITO-180-01	222+250	51	Estructura metálica de paso inferior	Balancines y diafragmas, no posee restricción vertical ni horizontal
Las rosas	RN-01-B-02	189+500		Concreto preesforzado	Posee elemento de restricción tipo tope sísmico y diafragmas

Fuente: elaboración propia.

Al realizar la visita se comprobó que tres de las estructuras dentro del municipio de Quetzaltenango son del tipo bóveda, por lo cual se descartó su evaluación.

2.4. Resumen de situación localizada

Las evaluaciones realizadas se han centrado en revisar el tipo de puente y el tipo de elemento de restricción que poseen cada una de las estructuras evaluadas, esto tiene como objeto hacer un análisis de cómo han evolucionado en el tiempo los elementos de restricción y cuáles son los más utilizados.

Dentro de la evaluación se pudo observar que hay varios puentes que no poseen elemento de restricción sísmica, pero si articulaciones en las bases como se muestra en la figura 21.

Figura 22. Puente Viñas ruta CA-01-Oriente kilómetro 45+400



Fuente: [Fotografía de Pablo Rivera]. (Pueblo Nuevo Viñas, Santa Rosa. 2022).
Colección particular. Guatemala.

Los tipos de elementos de restricción sísmica que más predomina dentro de los puentes evaluados son los topes sísmicos y los pernos y platinas figura 22.

Figura 23. Puente las Pozas CA-01-Oriente kilómetro 129+800



Fuente: [Fotografía de Pablo Rivera]. (El Progreso, Jutiapa. 2022). Colección particular. Guatemala.

Los topes sísmicos son un elemento de restricción horizontal, pero debe de complementarse con un elemento que restrinja el movimiento vertical que evite hacer “saltar” la superestructura y esta salga de su ubicación.

Se observó que en algunos casos el tope sísmico es muy robusto, lo que pone en riesgo la integridad de la viga, figuras 23 y 24, ya que el tope sísmico es un elemento que tiene una función de seguro, y por tal razón este debe de fallar antes que los elementos principales.

Figura 24. Puente Colón ruta CA-13 kilómetro 305+340



Fuente: [Fotografía de Pablo Rivera]. (Puerto Barrios, Izabal. 2022). Colección particular.
Guatemala.

Figura 25. **Puente RD-GUA-47 kilómetro 0+600, tope sísmico continuo**



Fuente: [Fotografía de Pablo Rivera]. (Amatitlán, Guatemala. 2022). Colección particular. Guatemala.

Se observó que hay puentes que tienen más de una luz y que no poseen elemento de restricción longitudinal, como se muestra en la siguiente figura 25.

Figura 26. Puente Chajinchas CA-13 kilómetro 288+993



Fuente: [Fotografía de Pablo Rivera]. (Puerto Barrios, Izabal. 2022). Colección particular. Guatemala.

En los puentes más recientes se pudo observar que si se contempló la inclusión de topes sísmicos, pese a no existir uniformidad de criterio en su aplicación, así como la uniformidad que existen entre los topes sísmicos internos y externos.

En los puentes de mayor antigüedad se notó que no se contempló la inclusión de topes sísmicos de ningún tipo, pero en la gran mayoría existe balancines o articulaciones que permiten el movimiento en el sentido longitudinal.

En ningún caso se observó un elemento que restrinja el movimiento vertical, siendo esta una de las fuerzas que pueden generar la vibración excesiva y por consiguiente una pérdida de soporte de las vigas.

Durante las visitas a los puntos seleccionados, se observó que no existe una clasificación adecuada de las estructuras, lo que se evidencio al momento de visitar puntos que no eran estructura de drenaje menor pero dentro del registro tienen la categoría de estructuras de drenaje mayor pero menor.

El registro de las estructuras de drenaje mayor no incluye las estructuras que se encuentran dentro de los cascos urbanos, los que en cantidad pueden ser significativos y que no reciben seguimiento a atención periódica.

La evaluación se centró en determinar si las estructuras cuentan o no con dispositivos de restricción sísmica, y el tipo de elemento de restricción que poseen, pero adicional se pudo constatar que existe una falta de mantenimiento, atención y refuerzo de estas estructuras.

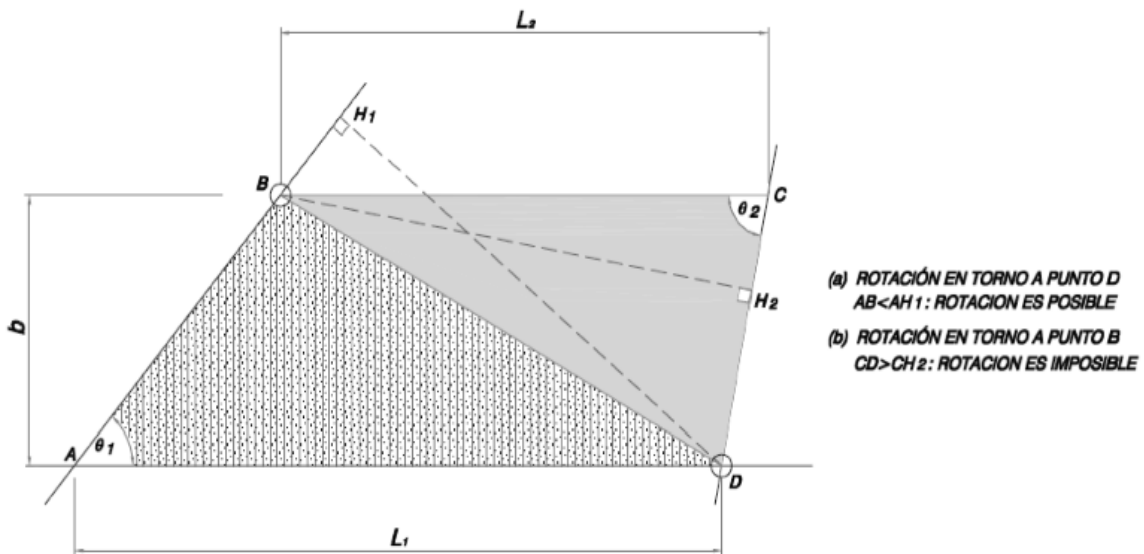
3. CONSIDERACIONES INICIALES DE LOS ELEMENTOS DE RESTRICCIÓN SÍSMICA

3.1. Geometría

Previo al diseño de los puentes en general se deben verificar condiciones geométricas, la razón de estas verificaciones porque se ha logrado determinar que el exceder esas condiciones de geometría puede generar incremento en la rotación de la superestructura de los puentes y provocar pérdida de soporte en los extremos de la superestructura, lo que deriva en el colapso de la estructura.

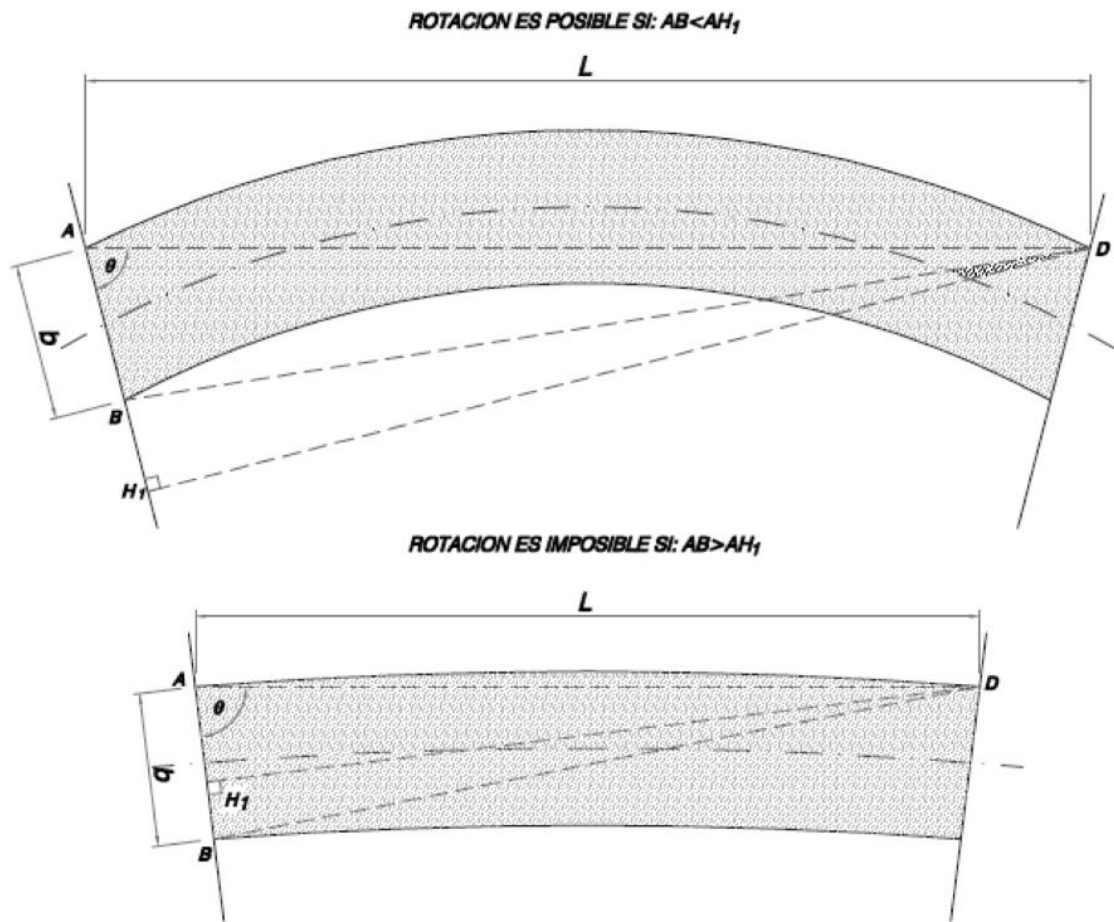
De la investigación documental realizada, se ha observado que en diferentes normativas se ha implementado la restricción de ángulos de esviaje o curvatura, implementando verificaciones de esviaje y curvatura, previo a adoptar una geometría definitiva.

Figura 27. Condición que permite la rotación de un tablero esviado



Fuente: MOP, (2017). *Criterios sísmicos para diseño de puentes en Chile.*

Figura 28. Condición que permite rotación en tableros curvos



Fuente: MOP, (2017). *Criterios sísmicos para diseño de puentes en Chile*.

Según MOP (2017):

Las condiciones de geometría pueden obviarse en casos donde la topografía no permita adecuarse a las condiciones geométricas localizadas, pero eso implicará realizar un análisis más exhaustivo como el incluir dentro del análisis de un modelo 3D utilizando el método modal espectral. (p 25)

Como se indica en la ecuación No 2, la correlación que existe entre la longitud y el ancho efectivo del puente y el seno del ángulo teta, que corresponde al ángulo de esviaje deben de estar por debajo de la curva según la figura 6.

Esto define si es necesaria la restricción lateral de la superestructura del puente, siendo de vital importancia determinar esta condición, ya que el colocar elementos de restricción de no ser necesarios lejos de ayudar a la estructura durante un evento sísmico importante, la puede dañar o hacer su comportamiento sísmico diferente al calculado.

Los elementos de restricción sísmica tienen como fin primordial prevenir la pérdida de apoyo de la superestructura y por consiguiente evitar el colapso de los puentes por la pérdida de apoyo. Por esta razón el analizar previamente la geometría y tratar de cumplir con los parámetros indicados es el primer paso para determinar la necesidad y tipos de elementos de restricción a ser utilizados.

El siguiente paso en el diseño de elementos de restricción adecuados es determinar una longitud de apoyo adecuada y el diseño de topes sísmicos internos y externos, así como elementos de restricción vertical.

3.2. Longitud apoyo

La longitud de apoya, es la distancia que existe desde el extremo del apoyo de la superestructura, hasta el punto donde termina el elemento principal de la superestructura, el cálculo de esta distancia se realiza según los criterios de las normas que a continuación se detallan.

3.2.1. Cálculo según la norma AASHTO 2020

La longitud de apoyo tiene como objeto garantizar que la superestructura mantenga su posición o no pierda el soporte debido al movimiento sísmico horizontal o vertical, para verificar esta condición, la AASHTO en el apartado 4.7.4.4, nos proporciona una ecuación que permitirá a los elementos tener la suficiente movilización. Para el caso específico de la zona sísmica 4.2 son los correspondientes a la zona sísmica 4 definida por la AASHTO.

Ecuación 4. longitud de soporte mínimo

$$N = (8 + 0.02L + 0.08H)(1 + 0.000125S^2)$$

Donde:

N=mínima longitud de apoyo medida en forma normal al eje del apoyo (plg); (mm)

L = longitud del tablero del puente hasta la junta de expansión adyacente, o hasta el extremo del tablero; si hay articulaciones dentro de un tramo L deberá ser la sumatoria de las distancias a cada lado de la articulación; para los puentes de un solo tramo L es igual a la longitud del tablero (pie); (mm)

H = para los estribos, altura promedio de las columnas que soportan el tablero del puente hasta la siguiente junta de expansión (pie) ;(mm) Para las columnas y/o pilares, altura de la columna o altura del pilar (pie); (mm) Si hay articulaciones dentro de un tramo, se tomará la altura promedio de las dos columnas o pilares adyacentes (pie); (mm) 0.0 para puentes de un solo tramo (pie); (mm)

S = oblicuidad del apoyo medida a partir de una recta normal al tramo ($^{\circ}$)

La longitud mínima del apoyo será en función de un porcentaje de valor obtenido al ser operada la ecuación 4, este porcentaje está definido por la AASHTO en la siguiente tabla.

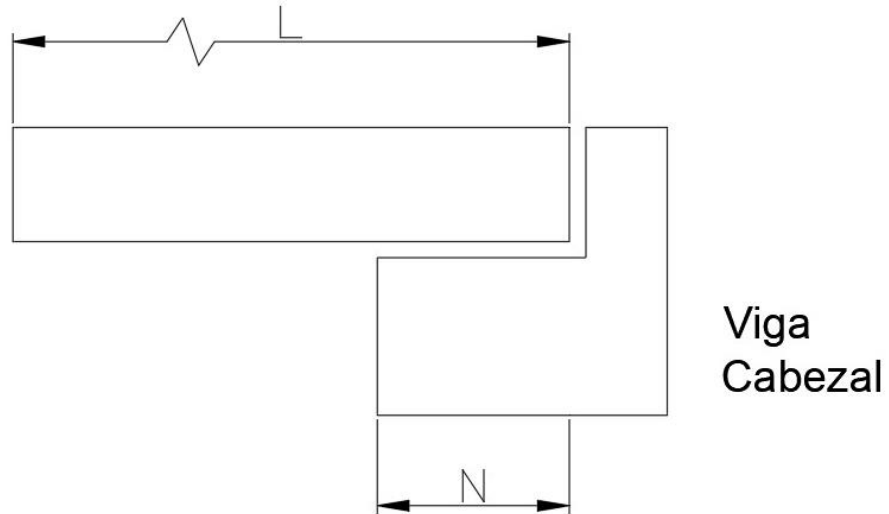
Tabla XV. **Porcentaje N de acuerdo con la zona sísmica y aceleración**

Zona	Coeficiente de Aceleración, A_s	Porcentaje, N
1	<0.05	≥ 75
1	≥ 0.05	100
2	Todos aplicables	150
3	Todos aplicables	150
4	Todos aplicables	150

Fuente: AASHTO, (2020). *Especificaciones para el diseño de puentes.*

La longitud mínima de apoyo está determinada por el valor N por el porcentaje indica en la tabla XV según la zona sísmica en la que se encuentre ubicada la estructura, la dimensión de N se mide como se indica en la siguiente figura.

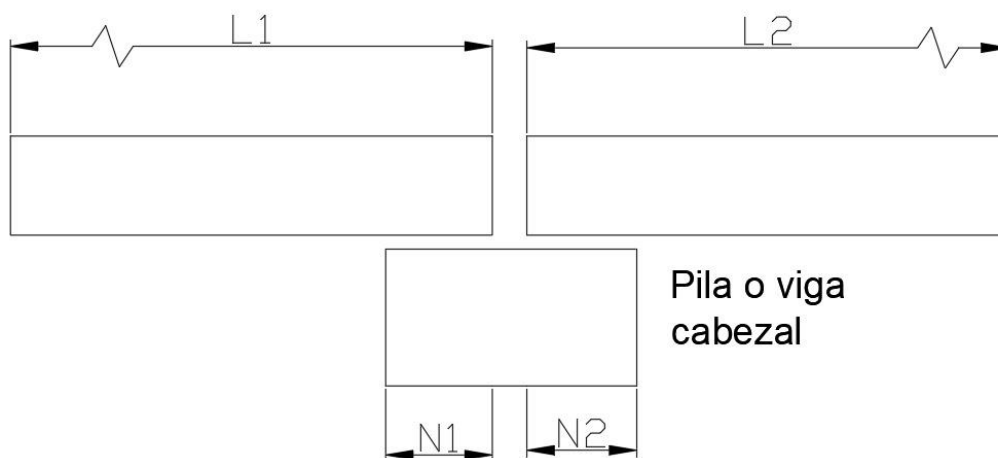
Figura 29. Longitud de apoyo en estribo



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Para el caso de tratarse de un puente de más de una luz, el dimensionamiento se deberá de calcular con base en cada longitud de luz, como se indica en la siguiente figura.

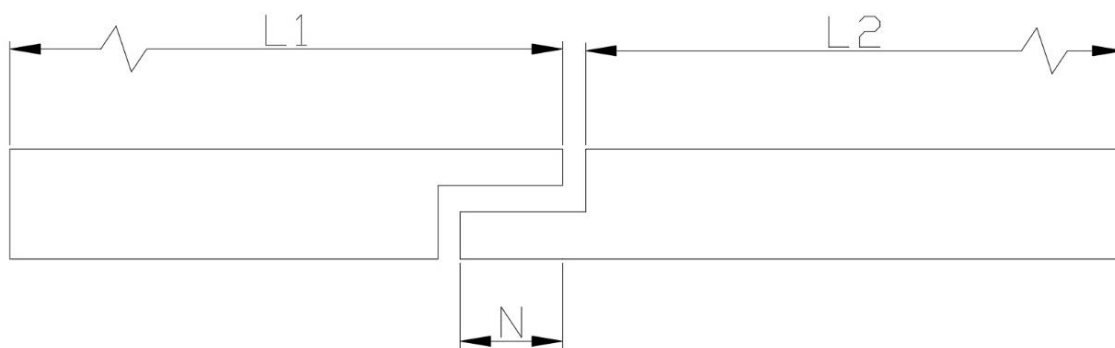
Figura 30. **Longitud de apoyo en pilas centrales**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Estas longitudes son iguales a la utilizadas en el caso de tratarse de superestructura en voladizo o tramos en voladizo.

Figura 31. **Longitud de apoyo en través en voladizo**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

3.2.2. Cálculo según la norma chilena

La norma chilena considera dos escenarios para el cálculo de la longitud mínima de apoyo, el primero es para un puente sin esviaje ni curvatura y el otro es para puentes con esviaje o curvatura, los que se definen a continuación

Ecuación 5. Longitud requerida de apoyo

$$S_{ER} \geq S_{EM}$$

Ecuación 6. Longitud mínima de apoyo

$$S_{EM} = 0.7 + 0.005l$$

Donde:

S_{ER} : Longitud requerida de apoyo (m).

S_{EM} : Longitud mínima de apoyo de una viga en la mesa de apoyo (m).

l : Longitud del vano (m). En un cabezal de cepa que soporte dos superestructuras con diferentes longitudes de vano, se deberá considerar el vano de mayor longitud para el valor de l .

Ecuación 7. Longitud mínima de apoyo para puentes esviados y curvos.

$$S_{E\theta R} > 2L_{\theta} \sin(\alpha_E/2) \cos(\frac{\alpha_E}{2} - \theta)$$

Donde:

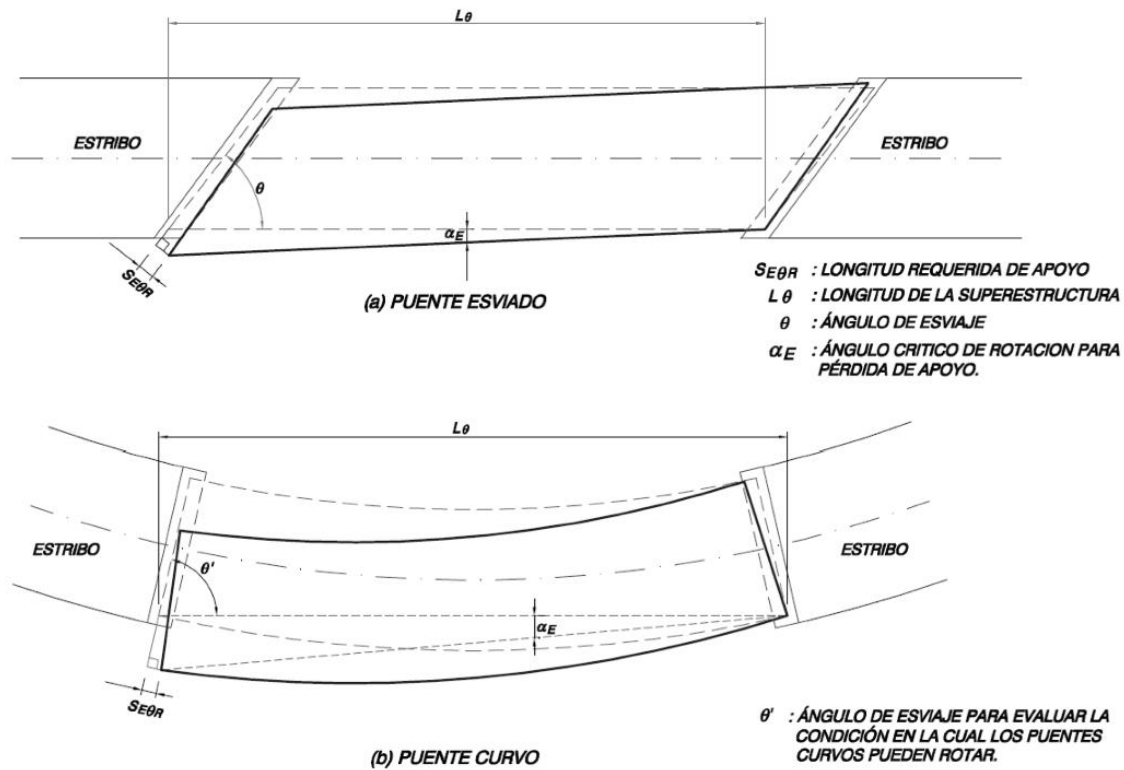
$S_{E\theta R}$ = Longitud requerida de apoyo en un puente esviado o curvo en (m).

L_{θ} = Longitud continua de la superestructura en (m).

θ = Ángulo de esviaje correspondiente al ángulo agudo del tablero en grados ($^{\circ}$).

α_E = Ángulo de rotación marginal, puede ser tomado como 2.5 ($^{\circ}$).

Figura 32. Longitud de apoyo en puentes esviados y curvos



Fuente: MOP, (2017). *Criterios sísmicos para diseño de puentes en Chile*.

Para un puente con las siguientes condiciones:

$$L = 25m$$

$$H = 8 \text{ m}$$

$$\alpha = 0$$

Según AASHTO

$$N \geq (203 + 1.67 * 20 + 6.66 * 7.2) * (1)$$

$$N \geq 298.03mm$$

$$N \geq 0.298m$$

Según norma chilena

$$S_{EM} = 0.7 + 0.005 * 25$$

$$S_{EM} = 0.825$$

Como se observa la diferencia es considerable, por tal razón es recomendable utilizar la propuesta de la norma chilena por ser más conservadora.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE ELEMENTOS DE RESTRICCIÓN

Los elementos de restricción para puentes que se considera pueden ser tomados en cuenta para su uso en Guatemala, son lo que se detallarán a continuación, así como, las directrices generales para su diseño, de igual forma se considera que los diafragmas son de vital importancia para el mejor desempeño de la superestructura, estos no se indican en este listado ya que son de uso general en puentes y existen directrices claras para su diseño.

4.1. Elemento para la prevención de la pérdida de apoyo longitudinal

Estos elementos han sido propuestos para puentes con más de una luz, donde los apoyos intermedios son apoyos deslizante, elástico o fijo, la razón obedece a que estos puntos de los puentes pueden tener movimiento en sentidos diferentes y la propuesta de longitud de apoyo puede ser muy grande haciendo su construcción compleja o puede limitar la superestructura con dimensiones muy grandes de vigas cabezales o estribos.

En este sentido, la norma chilena propone un nuevo ancho para la prevención de la pérdida de apoyo siempre que en este caso se utilicen elementos de prevención en el sentido longitudinal.

El Ministerio de Obras Públicas (MOP), propone lo siguiente:

Ecuación 8. Longitud mínima de apoyo

$$S_F = c_F S_E$$

Donde:

S_F = Máxima longitud de diseño permitida para un elemento de prevención de pérdida de apoyo (m).

S_E = longitud de apoyo (m).

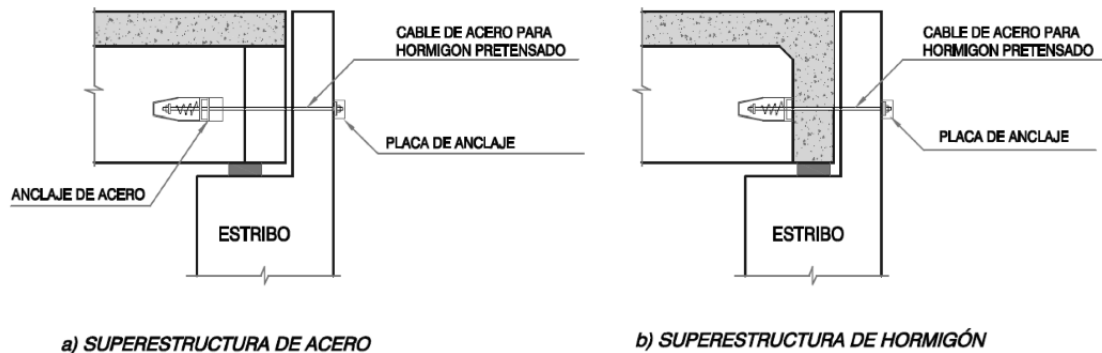
c_F = Coeficiente de desplazamiento de diseño de un elemento de prevención de pérdida de apoyo. Se debe utilizar un valor de 0.75

El MOP hace referencia a dos condiciones que deben cumplir los elementos de restricción en el sentido longitudinal y son:

- No debe alterar el funcionamiento del sistema de apoyo
- Debe permitir el movimiento de la superestructura en la otra dirección al elemento.

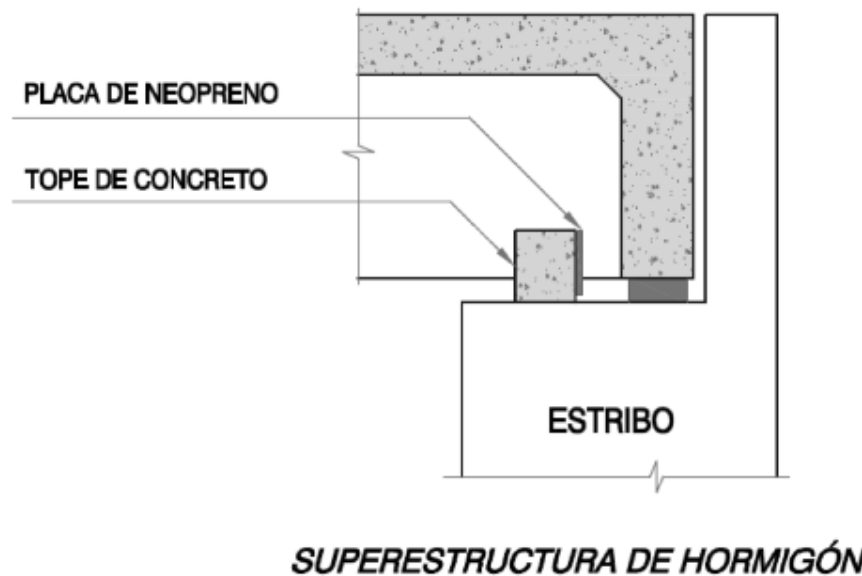
Para superestructura adosada al estribo de la superestructura en los extremos MOP propone lo siguiente:

Figura 33. Sistema de prevención de pérdida de apoyo



Fuente: MOP, (2017). *Criterios sísmicos para diseño de puentes en Chile.*

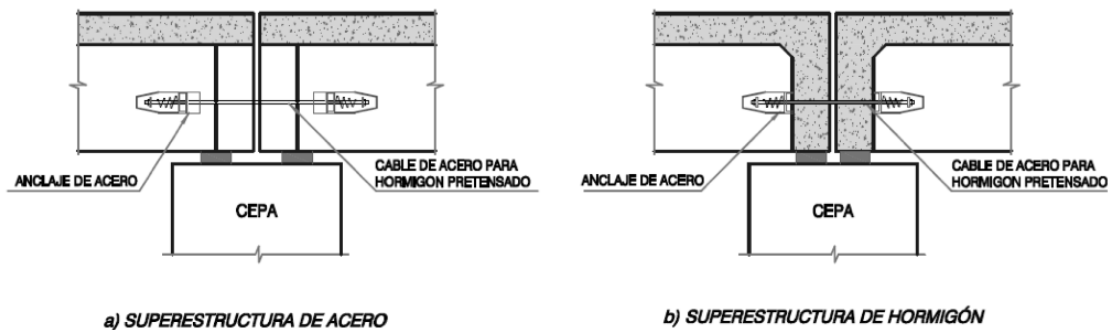
Figura 34. Sistema de prevención de pérdida de apoyo con tope de concreto



Fuente: MOP, (2017). *Criterios sísmicos para diseño de puentes en Chile.*

Para puentes continuos recomienda lo siguiente:

Figura 35. **Sistema de prevención de pérdida de apoyo**



Fuente: MOP, (2017). *Criterios sísmicos para diseño de puentes en Chile*.

Las fuerzas que actuarán sobre los cables deben soportar la totalidad de la fuerza que se genere en un movimiento inicial o la totalidad de la deformación en el sentido del eje del puente o longitudinal, determinado a través de un análisis modelación modal espectral.

Ecuación 9. fuerza que deben amortiguar los cables

$$F = 1.25 \times A_o m$$

La aceleración sísmica que se requiere es la aceleración en el tiempo 0 del evento, según la Asociación Guatemalteca de ingeniería Estructural y Sísmica, se define como:

Ecuación 10. Aceleración máxima

$$AMS_d = 0.40 \times S_{cd}$$

Donde

S_{cd} : son los parámetros de la calibración del espectro a la probabilidad de ocurrencia y el suelo.

Este valor indica según AGIES el inicio del espectro en $T=0$

El diseño de los cables debe de trabajar a un 70 por ciento de del valor de F_y de los cables, las barras deberán de ser de acero que cumpla con la norma ASTM A416, los grados de los cables según la norma son de 250 ksi y 270ksi.

El 70 por ciento indicado en la norma es para que el diseño no sobrepase la fluencia del acero propuesto y se garantice la no deformación de las barras antes del movimiento de la superestructura.

4.2. Topes sísmicos

Los topes sísmicos son elementos que restringen el movimiento transversal del puente y pueden ser interno y externos.

4.2.1. Norma AASHTO

El diseño de los topes sísmicos como tal no se ha desarrollado dentro de la norma AASHTO, pero en otros países se han agregado criterios para su análisis y diseño, los que se plantearán a continuación:

La norma AASHTO no es explícita en la carga que afectará a los topes sísmicos internos o externos, pero sí indica una ecuación para determinar la fuerza que actúa en la conexión super estructura – subestructura, la que se define como:

Ecuación 11. fuerza que actúa en la conexión super estructura – subestructura

$$F = \frac{(C_{smd} \times W)}{F_m}$$

Donde:

F : es la fuerza de diseño.

C_{smd}: es el coeficiente sísmico de diseño.

W : es la carga tributaria permanente.

F_m : es el factor de modificación de respuesta.

4.2.2. Norma chilena

La norma chilena para el diseño de puentes define criterios más amplios para el diseño de los topes sísmicos, incluyendo cantidades mínimas de topes sísmicos según la cantidad de vigas que la superestructura tenga y la obligatoriedad en el uso de topes sísmicos externos en todos los casos.

Adicional a eso, se considera que los topes sísmicos deben de ir ubicados a modo de trabe o llave, con el travesaño, el travesaño es lo que en el medio local se denomina diafragmas, la propuesta obedece a que los topes sísmicos ubicados en las bases de las vigas generaron daños a la viga o. generaron inestabilidad en la superestructura, ya que se busca que la superestructura se comporte como un solo elemento.

Esto derivó en una propuesta en la cual estos elementos restrinjan el movimiento excesivo de la superestructura en el sentido transversal, pero permitiendo un grado de movilidad que no genere daños a ningún elemento importante; lo que se busca con esta configuración es que las fallas se generen en los topes sísmicos o en los diafragmas y no en los elementos importantes como lo son las vigas, ya que si bien es cierto se generarán daños, estos se generan en elemento que pueden ser fácilmente reparados.

Para tal situación el MOP, recomienda que la fuerza que actúa sobre los topes sísmicos internos y externos está definido por la siguiente ecuación.

Ecuación 12. Fuerza que debe amortigua el tope de concreto

$$F = 1.25 \times A_o m$$

Ecuación 13. Aceleración máxima

$$AMS_d = 0.40 \times S_{cd}$$

Donde

S_{cd} : son los parámetros de la calibración del espectro a la probabilidad de ocurrencia y el suelo.

Este valor indica según AGIES el inicio del espectro en $T=0$

Según se indica en las Especificaciones Técnicas para el diseño de puentes del MOP

Según el MOP (2017):

Se deberá considerar el uso de topes sísmicos interiores, adicionales a los topes exteriores de acuerdo con la Tabla 5.4-1. Siempre se debe considerar la incorporación de topes sísmicos exteriores.

Los topes interiores se deben repartir de manera simétrica. En los puentes esviados los topes interiores se deben ubicar entre las vigas extremas, debido a que estarán sometidas a los mayores desplazamientos cuando se produzca la rotación del tablero. (p. 38)

La tabla a la que se hace referencia en las especificaciones Técnicas para el diseño de puentes del MOP, es la siguiente:

Tabla XVI. **Cantidad mínima de topes interiores**

No de Vigas en Tablero	Nº topes mínimos Interiores en Puentes Sin desplazamientos laterales excesivos	Nº topes mínimos Interiores en Puentes Con desplazamientos laterales excesivos
3 Vigas	0	2
4 Vigas	1	2
5 Vigas	2	2
6 Vigas o mas	2	3

Fuente: elaboración propia, utilizando datos de MOP.

Los desplazamientos laterales excesivos se determinan según la figura 7, lo cual se debe principalmente a la geometría irregular del puente.

Las dimensiones de los topes sísmicos según el MOP 2017 se recomienda:

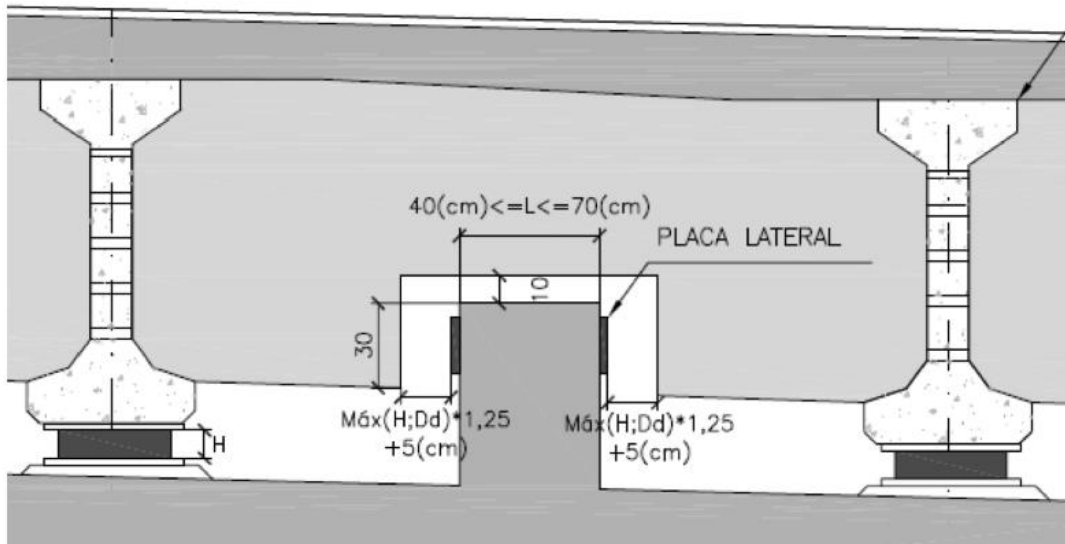
El ancho mínimo de los topes sísmicos debe ser 40(cm) y el máximo de 70(cm). No se recomienda colocar anchos mayores debido a que al ser más robustos no se comportarán como un fusible y es probable que cuando se produzca el impacto sobre ellos, se transmitan solicitaciones importantes a la infraestructura, pudiendo producir grietas en los cabezales y en los muros de los estribos.

En todos los topes se debe incluir un neopreno lateral de bajo espesor, para amortiguar el impacto sobre éstos, debido a que este únicamente tendrá la función de evitar la zona de contacto directa, este podrá ser de un espesor de 1cm.

Dentro de los criterios para el dimensionamiento de la distancia libre entre el diafragma y el tope sísmico el Ministerio de Obras Públicas [MOP],(2017) indica lo siguiente:

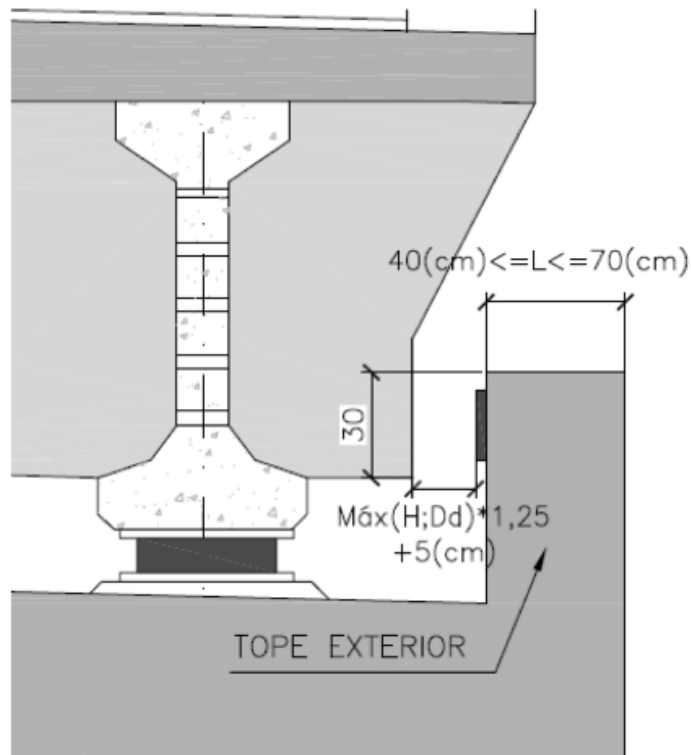
La distancia libre por considerar entre el borde de los travesaños y los topes en las llaves de corte, deberá ser el mayor valor entre la altura máxima del apoyo (aisladores sísmicos de goma o neoprenos) H (cm) o el desplazamiento máximo de diseño D_d incrementado en un 25% más 5 (cm), para todos los topes (interiores y exteriores). (p. 39)

Figura 36. Configuración tope sísmico interior y diafragma



Fuente: MOP, (2017). *Criterios sísmicos para diseño de puentes en Chile.*

Figura 37. Configuración tope sísmico exterior y diafragma



Fuente: MOP, (2017). *Criterios sísmicos para diseño de puentes en Chile.*

El diseño del tope sísmico deberá de ser calculado con base en la fuerza que resulte de la aceleración horizontal inicial y la masa de todo el tablero, incluidos los diafragmas, en el caso de otras normas como CALTRANS, consideran como parte de la masa de la superestructura las vigas cabezal, como sigue.

Ecuación 14. Fuerza que actúa sobre los topes sísmicos

$$F = A_o m$$

Ecuación 15. La aceleración máxima

$$AMS_d = 0.40 \times S_{cd}$$

Donde

S_{cd} : son los parámetros de la calibración del espectro a la probabilidad de ocurrencia y el suelo.

Este valor indica según AGIES el inicio del espectro en $T=0$

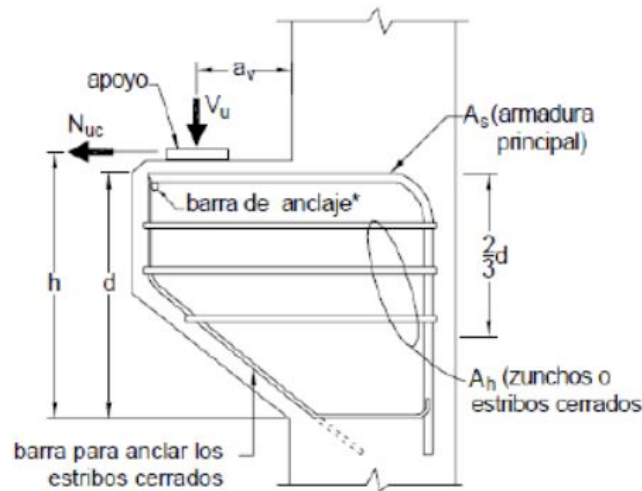
Según indica el MOP (2017), “los topes sísmicos interiores y exteriores deben ser capaces de resistir la fuerza horizontal transmitida por toda la superestructura dividida dentro del número total de topes sísmicos (...)” (p. 41).

4.2.3. Topes sísmicos internos

Para el diseño propio del elemento se tiene dos opciones según el tipo de tope sísmico, si es tope sísmico interno se utiliza la referencia de AASHTO 5.13.2.4, dentro de la norma este numeral hace referencia al diseño de ménsulas

o vigas cantiléver, la norma recomienda que se realice un análisis de una falla por corte, para los topes sísmicos internos.

Figura 38. **Nomenclatura de ménsula**



Fuente: AASHTO, (2020). *Especificaciones para el diseño de puentes*.

La sección del apoyo se diseña para resistir una fuerza de corte y momento mayorada.

Ecuación 16. Momento mayorado

$$M_u = V_u a_v + N_{uc}(h - d)$$

Para el caso de los topes sísmicos se considera que N_{uc} no genera fuerza de tracción, pero AASHTO indica que no puede ser tomada como 0, por lo que define lo siguiente.

Ecuación 17. Fuerza en la dirección perpendicular a la fuerza actuante

$$N_{uc} = 0.20V_u$$

Para el caso de vigas tipo cantiléver la norma establece que la cuantía de acero A_s/bd no debe de ser menor que: $0.04f'_c/f_y$, donde d se mide desde la cara del apoyo

Ecuación 18. La resistencia del cortante debe satisfacer

$$V_n = 0.2f'_c b_w d_e$$

$$V_n = 0.8b_w d_e$$

Estos son los cortantes de cada tope sísmico, la suma de todos los cortantes de cada tope sísmico interno y uno externo debe de ser mayor que el valor de la fuerza generada por la aceleración inicial y la masa de la superestructura, que es la fuerza actuante.

El refuerzo principal a tracción A_s , debe cumplir:

$$A_s \geq \frac{2A_{vf}}{3} + A_n$$

Y el área de los estribos colocado en una distancia de $2d_e/3$ a partir del refuerzo principal deberá satisfacer

$$A_h \geq 0.5(A_s - A_n)$$

$$A_n \geq \frac{N_{uc}}{\phi f_y}$$

Donde:

b_w : ancho del alma

d_e : profundidad del centro de gravedad del acero

A_{vf} : área de acero para cortante por fricción

A_s : Refuerzo a tracción

V_n : cortante nominal

V_u : Cortante ultimo

N_{uc} : Fuerza de tracción en el sentido perpendicular al cortante

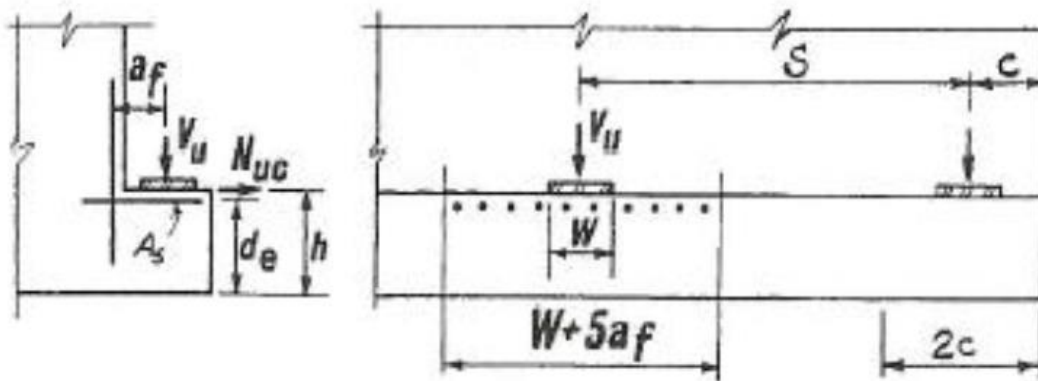
4.2.4. Topes sísmicos externos

Si es tope sísmico externo se utiliza el apartado de AASHTO 5.13.2.5, dentro de la norma este numeral hace referencia al diseño de vigas de borde, en apartado 5.13.2.5.4, diseño para cortante por punzonamiento.

El área total de refuerzo debe de ser calculada de igual forma que la del tope sísmico interno.

El refuerzo principal de tracción debe estar uniforme en la zona delimitada por $(W+5d_f)$ o $2c$, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 39. **Diseño de las repisas horizontal para flexión y fuerza horizontal**



Fuente: AASHTO, (2020). *Especificaciones para el diseño de puentes.*

Según la American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], (2020) en su numeral 5.13.2.5.4, indica que:

La Resistencia nominal se define como:

Ecuación 19. Cuando c es mayor que $S/2$

$$V_n = 0.125\sqrt{f'_c}(W + 2L + 2d_e)d_e$$

Ecuación 20. cuando la distancia al extremo, c , es menor que $S/2$ y $(c - 0,5W)$ es menor que d_e

$$V_n = 0.125\sqrt{f'_c}(W + L + d_e)d_e$$

Ecuación 21. cuando la distancia al extremo, c , es menor que $S/2$ pero $(c - 0,5W)$ es mayor que d_e

$$V_n = 0.125\sqrt{f'_c}(0.5W + L + d_e + c)d_e$$

Ecuación 22. La resistencia reducida del corte de elementos

$$V_r = \phi V_n$$

El diseño debe satisfacer con

$$V_r \geq V_n$$

Donde

ϕ : Factor de resistencia de acuerdo con 5.5.4.2.1 de AASHTO 2020, para corte es 0.90

V_n : Resistencia nominal a la fuerza cortante

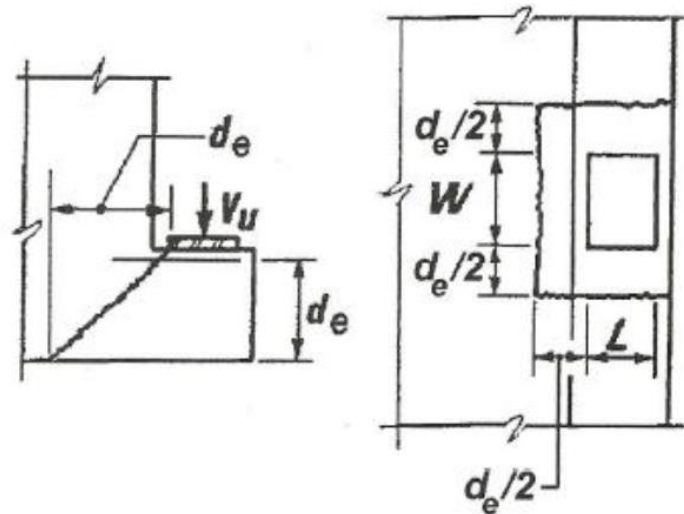
V_u : Fuerza mayorada de cortante debido a carga total

W : ancho de la placa de apoyo según figura 38

L : longitud de la placa de apoyo según figura 38

d_e : profundidad efectiva entre la fibra extrema y el centroide de la fuerza

Figura 40. **Diseño de las repisas horizontales al punzonamiento**



Fuente: AASHTO, (2020). *Especificaciones para el diseño de puentes*.

4.3. Barras de anclaje vertical antisísmicas

La componente vertical de los sismos solía ser considerada mucho menor a la componente horizontal, en eventos sísmicos recientes y de considerable magnitud se observó que la componente vertical no es mucho menor como se solía considerar. En la norma NSE 2, AGIES indica que en Guatemala la componente vertical fácilmente se puede exceder el 50 por ciento de la componente horizontal.

Según MOP, (2017):

Las aceleraciones verticales pueden asumir mayor relevancia en los puentes con apoyos flexibles y aún más con aisladores elastoméricos. La utilización de apoyos flexibles en la dirección horizontal, en muchos casos implica un incremento de la flexibilidad vertical. Este aspecto tiene que ser considerado con cuidado, debido a la potencial amplificación del movimiento vertical y la posible pérdida de apoyo de la superestructura. (p. 43)

Ecuación 23. Fuerza a que debe amortiguar las barras de anclaje vertical

$$F = A_o m$$

La componente vertical del sismo según AGIES se define con la siguiente ecuación:

Ecuación 24. Aceleración vertical

$$S_{vd} = 0.20 \times S_{cd}$$

Donde

Scd : son los parámetros de la calibración del espectro a la probabilidad de ocurrencia y el suelo.

Este valor indica según AGIES el inicio del espectro en T=0

El diseño de las barras de anclaje vertical debe de trabajar a un 70 por ciento de del valor de Fy de las barras, las barras deberán de ser de acero que cumpla con la norma ASTM A706, los grados del acero según la norma son de 60000 PSI y 80000 PSI.

El 70 % indicado en la norma es para que el diseño no sobrepase la fluencia del acero propuesto y se garantice la no deformación de las barras antes del movimiento de la superestructura. Las barras de anclaje vertical no deberán de estar dentro del diafragma ya que estas tienen como objeto únicamente limitar el movimiento vertical pero no el movimiento horizontal, ya que este tipo de movimiento dentro de un sismo debe de existir hasta cierto límite, el cual debe de ser controlado por los topes sísmicos o los dispositivos horizontales.

4.4. Discusión de resultados

De la información recolectada y las propuestas de elementos de restricción se puede resumir lo siguiente:

Los elementos de restricción son elementos de prevención de la pérdida de apoyo o soporte de la superestructura, estos elementos no deben alterar el sistema de apoyo ni los movimientos horizontales o rotacionales que ya están contemplado en el diseño estructural del puente que se esté analizando.

El movimiento transversal al eje de la superestructura de los puentes debe ser permitido por los elementos de restricción.

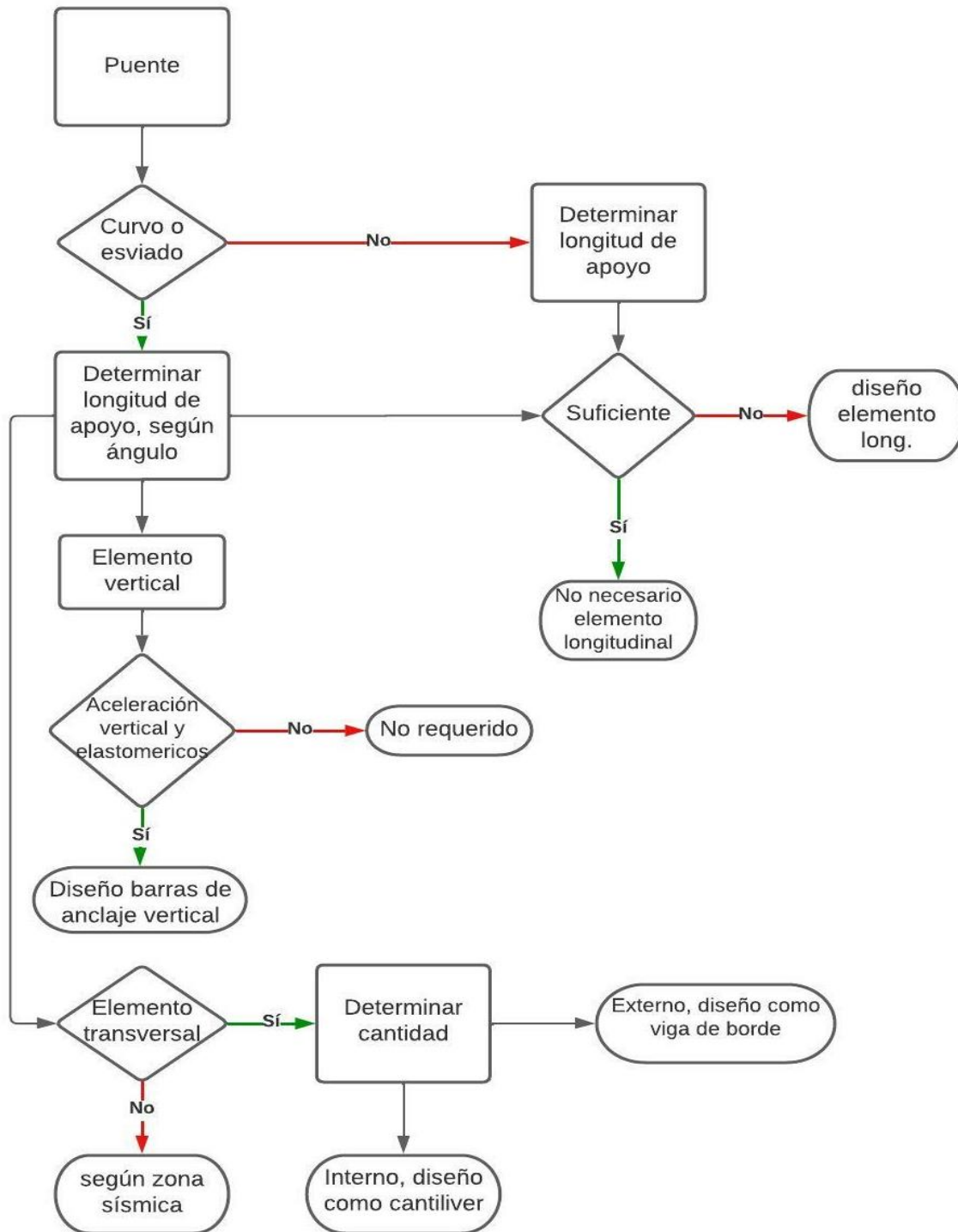
Los topes sísmicos internos deben de interactuar con el diafragma y no con la viga principal, ya que al hacerlo con las vigas principales pueden generar daño a un elemento principal.

De los elementos propuestos para la prevención de la pérdida de soporte son aplicables a puentes de concreto y de acero, como se indica, estos elementos no deben modificar el comportamiento durante el uso cotidiano de los puentes, e interactuarán con el puente únicamente con el objeto de prevenir el colapso por

su pérdida de soporte, debiendo fallar los elementos de restricción, antes de que lo haga la superestructura, cumpliendo su rol de seguro o fusible.

Para comprender de mejor forma el procedimiento a seguir o los elementos a tomar en consideración al momento de tomar en consideración la aplicación de elementos de restricción sísmica, se elaboró el siguiente diagrama.

Figura 41. Diagrama de seguimiento de diseño de elementos de restricción



Fuente: elaboración propia, realizado con Lucid.

CONCLUSIONES

1. Para los elementos de restricción sísmica que se utilizan actualmente en el país, no existe una especificación o recomendaciones que sirvan de guía o brinde requisitos mínimos para su diseño o incorporación, por tal razón, es importante que sean utilizados los dispositivos de restricción sísmica que mitiguen el efecto de la amplificación de la vibración vertical y que las vigas cabezales tengan el suficiente ancho para evitar la pérdida de soporte donde estos elementos pueden ser aplicados en todas las zonas sísmicas del país y no limitarse a la zona sísmica 4.2.
2. Durante la evaluación de los puentes de la zona sísmica 4.2 se pudo evidenciar que los puentes de mayor edad son los que no poseen elementos de restricción sísmica, siendo estos 27 puentes los que requieren la atención en ese aspecto.
3. Los elementos de restricción sísmica que pueden ser adoptados para su incorporación y uso localmente son: topes sísmicos internos, topes sísmicos externos, barras de anclaje vertical y elementos de restricción en sentido longitudinal. Los topes sísmicos internos y externos se utilizan actualmente en el país, más no en las condiciones que derivaron de experiencias de eventos sísmicos importantes suscitadas en otros países, por lo que es importante su implementación a nivel nacional bajo esas condiciones.

4. Implementar el uso de elementos de restricción sísmica en el país tiene como ventaja el poder contar con estructuras más seguras, ya que estos elementos evitarán el colapso, pero no alterarán el comportamiento de la estructura, que puede derivar en inducir el fallo de otros componentes del puente. Además, estos elementos deben permitir la movilidad de la superestructura, sin llegar al colapso, permitiendo que los mismos actúen como seguros o fusible de los puentes.

RECOMENDACIONES

1. Es conveniente realizar evaluaciones a puentes de antigua construcción, ya que estos son los que más riesgo de pérdida de soporte poseen.
2. Es importante realizar el análisis modal espectral para verificar la fuerza que actúa sobre el puente, ya que esa puede ser una guía para verificar el desplazamiento que debe de ser evitado durante un evento sísmico importante.
3. Actualizar el inventario de los puentes, real y bajo criterios definidos, para la correcta clasificación y monitoreo de su estado físico, a fin de que los programas de mantenimiento no vayan enfocados a la estética y vigilen la estabilidad estructural y actúen oportunamente ante fallas identificadas.
4. La mayor parte del territorio nacional se encuentra en zonas sísmicas 3 y 4, que a su vez son las mayores densamente pobladas, por tal motivo es recomendable hacer una priorización de importancia de los puentes según su uso y tipo de ruta.

REFERENCIAS

1. Álvarez Gómez, J. A. (2009). Tectónica Activa y Geodinámica en el Norte de Centroamérica. (Tesis de doctorado). Universidad Complutense de Madrid, España. Recuperado de <https://eprints.ucm.es/id/eprint/30783/>
2. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *LRFD Bridge design specifications*, Washington, Estados Unidos de América: Autor. Recuperado de <https://www.transportation.org/>
3. Asociación Guatemalteca de ingeniería Estructural y Sísmica. (2018). *Demandas estructurales y condiciones de sitio* (NSE 2). Guatemala: Autor.
4. Asociación Guatemalteca de ingeniería Estructural y Sísmica. (2019). *Puentes de tamaño y altura limitados* (NSE 5.2). Guatemala: Autor.
5. Bautista, L. A. (2016). *Propuesta de zonificación sismogénica para la república de guatemala*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <https://ecfm.usac.edu.gt/sites/default/files/2018-11/Tesis%20Luis%20Bautista.pdf>
6. Earthquake Engineering Research Institute y Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. (2013). *El terremoto guatemalteco M7.4 del 7 de noviembre 2012 y sus implicaciones para la reducción y*

mitigación de desastres. California, Estados Unidos de América: Autor.
Recuperado de <https://www.eeri.org/images/archived/wp-content/uploads/EERI-AGIES-Guatemala-Final-Report-Spanish.pdf>

7. Federal Highway Administration. (2014). *LRFD Seismic Analysis and Design of Bridges Reference Manual* (FHWA-NHI-15-004). Estados Unidos de América: Autor.
8. González Campañá, L. (2016). *Estudio del comportamiento de los puentes prefabricados chilenos durante el sismo de 27 de febrero de 2010*. (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Catalunya, España. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/90301>
9. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2014). *Sismo de magnitud mw 7.4 del 7 de noviembre del año 2012*. (INS-DG-US-DI-001). Guatemala: Autor. Recuperado de http://www.insivumeh.gob.gt/folletos/INFORME_TECNICO_FINAL_IN_SIVUMEHV2.pdf
10. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2016). *Sismología en Guatemala*. Guatemala: Autor. Recuperado de http://www.insivumeh.gob.gt/folletos/folleto_sismo-1.pdf
11. Japan Road Association. (2012). *Specifications for Highway Bridges, Part V Seismic Design*. Japón: Autor.
12. Kappos, A. J., Saiidi, M. S., Aydınoğlu, M. N., y Isaković, T. (2012). *Seismic design and assessment of bridges: inelastic methods of analysis*

and case studies. *Springer Science & Business Media*. 1 (21) 45-78. Recuperado de <http://www.amazon.com>

13. Ministerio de Obras Públicas. (2017). *Criterios sísmicos para el diseño de puentes en Chile*. Chile: Autor
14. Montufar Vieyra, S. (2017). *Influencia de apoyos, juntas y topes en la respuesta sísmica de puentes*. (Tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Michoacán, México. Recuperado de http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/4075
15. Servicio Sismológico Nacional (2017). *Sismo de Tehuantepec 2017-09-07 23:49 MW 8.2*. México: Autor. Recuperado de http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170907_Tehuantepec_M82.pdf
16. State of California Department of Transportation. (2015). *Bridge Design Practice*. California, Estados Unidos de América: Autor

