


Artículo Original / Article

Factores incidentes en la vulnerabilidad sísmica y planificación urbana: recomendaciones de modificación del Plan Regulador Comunal de Puente Alto ante el riesgo de la falla San Ramón

Incident Factors in Seismic Vulnerability and Urban Planning: Recommendations for the Puente Alto Masterplan Modification in the face of the Risk of the San Ramón Fault

Elena Pontigo-Arestizábal , Contraloría General de la República, División de Infraestructura y Regulación, Comité de Vivienda y Urbanismo. Santiago, Chile.

Jorge Inzulza-Contardo , Universidad de Chile, Departamento de Urbanismo. Santiago, Chile.

CÓMO CITAR: Pontigo-Arestizábal, E. e Inzulza-Contardo, J. (2023). Factores incidentes en la vulnerabilidad sísmica y planificación urbana: recomendaciones de modificación del Plan Regulador Comunal de Puente Alto ante el riesgo de la Falla San Ramón. *Revista de Urbanismo*, (49), 42–65. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2023.71433>

***CONTACTO:** elemun@yahoo.es

Resumen: La falla San Ramón, de tipo cortical activa, recorre de norte a sur el piedemonte de Santiago pasando por las comunas de Lo Barnechea, Vitacura, Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida, Puente Alto y Pirque. Esta situación es compleja debido a que las normas chilenas NCh433.Of1996 "Diseño sísmico de edificios" (Instituto Nacional de Normalización [INN], 1996) y NCh2369.Of2003 "Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales" (INN, 2003) no consideran la presencia de fallas geológicas, las que tampoco se incorporan en el Plan Regulador Metropolitano de Santiago o en los planes reguladores comunales concernientes. El área amenazada en Puente Alto es una de las zonas con mayores daños esperados por aceleración de esta falla y se encuentra menos urbanizada que en las demás comunas. La presente investigación tiene por objetivo identificar los factores incidentes en la vulnerabilidad sísmica, de manera de recomendar ajustes normativos al Plan Regulador Comunal de Puente Alto en dicha área, pues ello tendría un efecto preventivo mayor que en las otras comunas. Para lo anterior, se usa un enfoque mixto que incluye entrevistas semiestructuradas a profesionales especialistas en riesgo sísmico y planificación urbana, así como el análisis de los instrumentos de planificación vigentes. Los resultados muestran que el principal factor incidente en la vulnerabilidad es el uso de suelo, por lo que se propone una clasificación de los usos de acuerdo con su nivel de criticidad. Se concluye que es posible ajustar el Plan Regulador Comunal de Puente Alto, reduciendo el riesgo sísmico asociado a la falla San Ramón.

Palabras clave: Factores incidentes, falla San Ramón, Plan Regulador Comunal, Puente Alto, vulnerabilidad sísmica

Abstract: The San Ramón Fault, of the active crustal type, is located in the foothills of Santiago running from north to south through the municipalities of Lo Barnechea, Vitacura, Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida, Puente Alto, and Pirque. This situation is complex, because Chilean regulations NCh433.Of1996 "Seismic design of buildings" (Instituto Nacional de Normalización [INN], 1996) and NCh2369.Of2003 "Seismic design of structures and industrial facilities" (INN, 2003) do not consider the presence of geological faults, which are neither incorporated in the Metropolitan Masterplan nor in the corresponding municipal masterplans. The threatened area in Puente Alto is one of the zones expected to suffer the greatest damage due to the acceleration of this fault, and is less urbanized than in the other districts. This research aims to identify the factors incidental to seismic vulnerability in order to recommend regulatory adjustments to the Puente Alto Municipal Masterplan in this area, as this would have a greater preventive effect than in the other municipalities. For this purpose, a mixed approach is used that includes semi-structured interviews with professionals specialized in seismic risk and urban planning, as well as the analysis of current planning instruments. The results show that the main incident factor in vulnerability is land use, for which classification of uses is proposed according to their level of criticality. It is concluded that it is possible to adjust the Puente Alto Municipal Masterplan, reducing the seismic risk associated with the San Ramón Fault.

Keywords: Incident factors, San Ramón Fault, masterplan, Puente Alto, seismic vulnerability

Introducción

Chile forma parte del “Cinturón de Fuego del Pacífico”, área en la que se concentra alrededor del 90 % de los terremotos del planeta, debido a la fricción entre diversas placas tectónicas (Orellana, 2022). La colisión entre dichas placas produce fracturas de carácter superficial al interior de la placa continental, denominadas fallas geológicas, las que “son fuentes adicionales de sismicidad” (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2016, p. 2). Si bien los terremotos producidos por fallas geológicas tienen una baja probabilidad de ocurrencia, su activación puede producir graves daños. Por ejemplo, en Taiwán en 1999, la falla de Chelungpu provocó el terremoto de Chi-Chi, en el cual murieron 2.400 personas, 10.700 resultaron heridas y más de 10.000 edificios fueron dañados (Chen, & Chang, 2018). Por su parte, en Japón, la falla de Nojima produjo el terremoto de Kobe, por cuya causa fallecieron más de 6.000 personas y sufrieron grave daño los edificios construidos directamente sobre dicha falla (Easton et al., 2018).

En nuestro país, la falla San Ramón (más adelante, FSR) recorre de norte a sur el piedemonte de Santiago, la ciudad más poblada del país, pasando por las comunas Vitacura, Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida, Puente Alto (Armijo et al., 2010), Pique y Lo Barnechea (Inzulza et al., 2022). Se trata de una falla cortical activa, que puede generar aceleraciones “por sobre 100 % g en el caso de un sismo de magnitud Mw 7,2-7,5 [...] Es decir, por lo menos dos a tres veces más fuerte que lo registrado en Santiago durante el terremoto del Maule en 2010” (Easton et al., 2018, p. 5). Según observaciones geológicas “se puede estimar una probabilidad del orden de un 3 % de un gran terremoto en esta falla en los próximos 100 años” (Easton, 2023). Además, tiene la capacidad de “levantar varios metros el bloque cordillerano” sobre el de la depresión central (Easton et al., 2022, p. 4) “en un solo evento” (Secretaría Regional Ministerial Metropolitana de Vivienda y Urbanismo [Seremi de Vivienda y Urbanismo RM], 2012b, p.74), lo que colapsaría “cualquier estructura que corte esta ruptura” (Pérez, 2016, p. 189).

Este trabajo busca recomendar ajustes normativos al Plan Regulador Comunal (en adelante, PRC) de Puente Alto —instrumento normativo que fija, en lo que importa, la zonificación sobre la base de ciertas normas urbanísticas, los incentivos a dichas normas con las correspondientes condiciones y la red vial—, en el área amenazada por la FSR, con el fin de reducir el riesgo sísmico asociado a esa falla cortical, considerando los factores incidentes en la disminución de ese tipo de riesgo. Se eligió la comuna de Puente Alto, pues en esta se encuentra una de las zonas con mayores daños esperados por aceleración (Pérez, 2016), sin que el PRC vigente para ese territorio considere el riesgo sísmico asociado a dicha falla. Ello ha permitido la construcción de infraestructura crítica (Curihuinca, 2020) y asentamientos (Inzulza et al., 2022), principalmente conjuntos de vivienda de tipo condominio (Inzulza et al., 2021) en este sector.

El presente artículo se estructura en cuatro partes. En primer término, se entrega un marco teórico relativo a la amenaza que supone la FSR en Puente Alto; a referentes en la planificación territorial sobre la reducción del riesgo sísmico por fallas activas; y a la regulación para la reducción del riesgo en los planes reguladores comunales.

En la segunda parte, se explica la metodología propuesta, consistente en entrevistas semiestructuradas a profesionales especialistas en riesgo sísmico y planificación urbana con el fin de identificar los principales factores incidentes en la vulnerabilidad sísmica y los criterios generales para su regulación; también se busca establecer criterios para la elaboración de un mapa preliminar con distintos niveles de amenaza en el

área afecta por la FSR en Puente Alto, y de una matriz de infraestructura crítica clasificada por tipo de uso de suelo. En seguida se realiza un análisis de la norma urbanística vigente en el área amenazada.

En tercer término, se presentan los resultados mostrando que los principales factores incidentes en la vulnerabilidad son el uso del suelo, la superficie de subdivisión predial mínima, la altura máxima de la edificación, la densidad, la materialidad de la estructura soportante de las edificaciones y los estándares de la urbanización referidos a la accesibilidad y a las redes. También se determinan los criterios generales para regular esos factores incidentes en cuatro áreas predefinidas según su nivel de amenaza: el área de potencial ruptura, las áreas cercanas susceptibles de remoción en masa en caso de sismo, toda el área al oriente del área de ruptura y hasta 5 kilómetros al poniente de esta, en las cuales las aceleraciones superarían las previstas por la norma sísmica atingente.

Para finalizar, se concluye que es posible ajustar el PRC de Puente Alto, reduciendo el riesgo sísmico asociado, sin perjuicio de las limitaciones de la normativa urbanística chilena en materia de riesgos, lo que además permite recomendar que las amenazas conocidas sean incluidas en los instrumentos de planificación urbana.

Marco teórico

Amenaza sísmica por la falla San Ramón en Puente Alto

La falla San Ramón es una falla inversa, lo que implica un desplazamiento vertical hacia arriba del bloque de techo con respecto al bloque de muro (Red Sismológica Nacional [RSN], 2019), como se puede apreciar en la Figura 1. El “Estudio de Riesgo y Modificación PRMS Falla San Ramón”, Informe Etapa 3, de 2012, que tiene como objetivo general la evaluación del peligro sísmico asociado a la FSR, entre los ríos Maipo y Mapocho –orientado a proponer la consecuente modificación del PRMS, no obstante a la fecha no se ha concretado–, consideró un rango de potencial influencia asociada a rupturas superficiales de la FSR de 300 m; 100 m hacia el frente de la traza de la falla principal (oeste) y 200 m hacia atrás (este) (Seremi de Vivienda y Urbanismo RM, 2012, p. 14). Por otra parte, las zonas con mayores daños esperados por aceleración, producto de un terremoto detonado por la FSR, se concentran en los bloques colgantes que poseen sedimentos, en las comunas de Las Condes y Puente Alto (Pérez, 2016). Se estima que los valores de las aceleraciones horizontales máximas esperables son los indicados en la Figura 2 (Seremi de Vivienda y Urbanismo RM, 2012, p. 18).

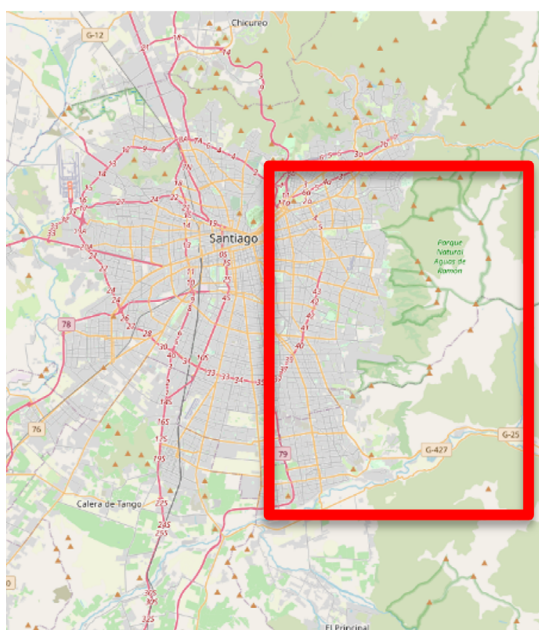
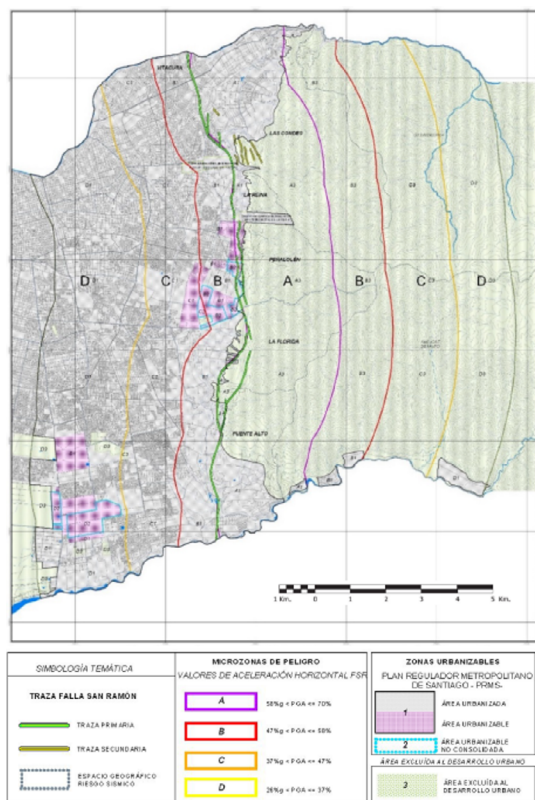
Figura 1

Esquema del proceso de ruptura en superficie como producto de un terremoto cortical de magnitud Mw7,2-7,5



Nota. Easton et al., 2022, p. 7.

Figura 2
Valores de aceleración horizontal falla San Ramón



Nota. Seremi de Vivienda y Urbanismo RM (2012, p. 18) y OpenStreetMap (Licencia de bases de datos abiertas de Open Data Commons).

Al respecto, es importante precisar que la norma chilena de diseño sísmico NCh4330f.1996 (INN, 1996) establece que la zona sísmica 2, aplicable a la comuna de Puente Alto, se asocia a una aceleración efectiva $A_0 = 0,30 \text{ g}$ y, si bien la aceleración horizontal no es equivalente a la efectiva —que se define como el valor de pseudoaceleración que está más estrechamente relacionado con la respuesta estructural y el potencial de daños de un sismo (Laporte, 2006)—, es posible suponer que, desde los 10 km al oeste de la traza de la FSR hacia el oriente, la falla “causa un peligro mayor al peligro sísmico regional dado por todas las fuentes” (Seremi de Vivienda y Urbanismo RM, 2012, p. 10).

De esta forma, es posible de implementar la gestión del riesgo desde la política urbana e instrumentos de planificación territorial, como se revisa en la siguiente sección, de manera de “anticiparse a posibles escenarios futuros [...] como la zonificación del uso del suelo y las variables urbanas fundamentales que orientarán la ubicación y la calidad de todas las edificaciones” (Camargo et al., 2020, p. 14).

Referentes de planificación territorial sobre reducción del riesgo sísmico por fallas activas

Bolton et al. (1986) explican que, en los entornos ya edificados, sobre o cerca de fallas superficiales, poco se puede hacer para evitar que el desplazamiento gradual o violento de estas cause daños a las edificaciones, instalaciones o redes de infraestructura, mientras que, en los territorios no edificados, el conocimiento sobre la ubicación y la naturaleza de una falla sirve para evitar su desarrollo futuro.

Además, estos autores describen una serie de técnicas de planificación apropiadas para la mitigación del riesgo sísmico, incluyendo aquel asociado a las fallas geológicas. La primera de ellas consiste en las ordenanzas sobre zonificación para restringir o prohibir el desarrollo —en una zona o en un área sobrepuesta a la zonificación de base—,

regulando usos de suelo, tipo de estructura, emplazamiento, altura, volumen, superficie predial, intensidad de uso y densidad; dichas ordenanzas requieren un distanciamiento específico al trazado de la falla, exigen un informe geológico para determinar estándares de desarrollo y construcción especiales, y/o incorporan el área de riesgo al sistema de espacios abiertos. La siguiente son las *ordenanzas de subdivisión y urbanización* que, con el mismo objeto, norman el tamaño y la forma de los lotes, las dimensiones de las calles, el drenaje y alcantarillado, establecen la obligación de una salida y entrada de dos sistemas de carreteras independientes, y exigen estudios geológicos que detallen medidas de mitigación suficientes para reducir la inestabilidad potencial del terreno, especialmente en aquellos con altas pendientes o alto nivel freático.

Bolton et al. (1986) agregan los *códigos de construcción* relativos al diseño, construcción, calidad de los materiales, uso, ocupación, ubicación y mantenimiento de los edificios y estructuras dentro de un área. Adicionalmente, aluden a los *permisos especiales para instalaciones de uso especial y crítico*, como edificaciones de emergencia, de operaciones peligrosas, con población dependiente o de alta ocupación, para los cuales se exigen estudios más detallados, en los que demuestren que estos cumplirán con los estándares de seguridad requeridos.

En seguida, menciona los *requisitos sobre la divulgación*, que exigen a los agentes inmobiliarios que proporcionen a los posibles compradores de bienes inmuebles la información sobre la existencia de un peligro natural; y finalmente, se refiere a la *adquisición de la propiedad o de los derechos de construcción* de las áreas de riesgo por parte del gobierno local.

Con el fin de establecer los parámetros para la regulación de los factores incidentes mencionados, se exponen a continuación cinco casos concretos de planificación en territorios afectados a fallas geológicas activas.

California. La denominada ley “Alquist-Priolo” (Resolution SB 520, 1972), prohíbe construir edificaciones destinadas a la ocupación humana y subdividir terrenos con dicho fin, en las “zonas de fallas” ubicadas en torno a las fallas activas del estado de California. Estas “zonas de falla”, de un ancho variable, en torno a un cuarto de milla (aproximadamente 402 metros), son previamente definidas en mapas por un geólogo estatal. Los referidos mapas se distribuyen a los gobiernos locales los que hacen efectiva dicha prohibición. Se exceptúan de esta restricción las viviendas unifamiliares con estructura de madera o acero, a construir en terrenos con informes geológicos aprobados, o que no excedan los dos pisos y no formen parte de un desarrollo de cuatro unidades o más.

Aquellas otras edificaciones que excepcionalmente se admiten en la zona de falla deben contar también con un informe geológico. Además, el vendedor se encuentra obligado a informar, conforme a un procedimiento específico, al potencial comprador, que la propiedad se ubica en una zona de falla (Resolution SB 520, 1972, p. 2621 a 2630).

Taiwán. Según una investigación sobre el daño producido a los edificios por el terremoto de Chi-Chi de 21 de septiembre de 1999 —que consideró la altura, data de construcción, materiales de construcción, uso, componentes estructurales y características arquitectónicas—, la mayoría de los edificios sufrieron daños graves, incluidos colapso (809 edificios), inclinación (253 edificios) y otros (431 edificios) (Chen & Chang, 2018). Además, hubo una tendencia a que se agruparan más edificios dañados a lo largo de la línea de falla en el área urbana planificada.

El Ministerio del Interior estableció una zona de prohibición de 50 metros a cada lado de la falla de Chelungpu, hasta finales de 1999, la que se disminuyó a 15 metros a cada lado, luego de la creación de mapas geológicos más precisos (1/1.000). Actualmente, en esta faja solo se admiten edificaciones de uso residencial, con un coeficiente de ocupación de suelo inferior al 50 %, un coeficiente de constructibilidad menor a 180 % y una altura inferior a 7 metros (Chen & Chang, 2018).

Japón. En Japón, por ley, los geólogos de la prefectura deben establecer “zonas de falla sísmicas” alrededor de las trazas superficiales de fallas activas y emitir los mapas correspondientes. Dichas franjas presentan un ancho variable, con un promedio de 300 metros. Se han realizado diversos estudios relativos al comportamiento de las fallas geológicas para establecer regulaciones diferenciadas —incluyendo la prohibición de construir— tanto para las viviendas como para la infraestructura, según el riesgo que importa cada falla y considerando su distancia a la traza (Konagai, 2003, p.7). Al igual que en California, la “discusión reciente en ese país se orienta a proveer mejor información a los ocupantes de estas franjas y aplicar medidas de prevención y manejo de los desastres, como vías alternativas, redes seguras, etc. más que impedir su ocupación” (Seremi de Vivienda y Urbanismo RM, 2012, p. 47).

Nueva Zelanda. El Ministerio del Medio Ambiente de ese país, propone como principios: reunir información precisa sobre la falla; planificar para evitar el desarrollo y la subdivisión en el área de riesgo de ruptura por falla; adoptar un enfoque basado en el riesgo en las áreas ya desarrolladas o subdivididas, considerando el período de recurrencia de cada falla, su complejidad —bien definida, distribuida o incierta— y la categoría de la edificación; e informar sobre el riesgo en aquellas áreas construidas susceptibles a la ruptura de la falla (Kerr et al., 2003).

Las categorías de edificación se dividen en: 1) estructuras que presentan un bajo grado de peligrosidad para la vida y la propiedad; 2) viviendas con entramado de madera, estructuras normales y aquellas que no caben en otra categoría; 3) estructuras que, como conjunto, pueden contener personas en multitudes, que posean un alto valor para la comunidad o representan riesgos para las personas en multitudes; y 4) estructuras con una función estratégica posdesastre (Kerr et al., 2003).

Por ejemplo, en el caso de fallas con un intervalo de recurrencia entre 5.000 y 8.000 años, como el de la FSR, en las áreas no construidas se prohíben las categorías 3 y 4, y en las áreas ocupadas solo se prohíbe la categoría 4. Además, se recomienda definir una zona de restricción con un mínimo de 20 metros a cada lado de una falla.

Costa Rica. la Ley de Planificación Urbana de ese país establece que en el reglamento de zonificación del plan regulador figurarán como zonas especiales “las que soporten alguna reserva en cuanto a su uso y desarrollo”. Esto incluye las zonas de riesgo de ruptura en superficie por falla geológica, por lo que se deben establecer restricciones o dado el caso, prohibiciones del uso del suelo para el desarrollo de obras constructivas (Decreto N.º 4240, 1968, artículo 25).

El protocolo de “Zonificación y restricciones al uso del suelo sobre o en el ámbito territorial inmediato a Fallas Geológicas Activas”, que forma parte del procedimiento de evaluación ambiental de los planes reguladores en Costa Rica, exige la realización de un estudio geológico-neotectónico del territorio a planificar, por parte de un geólogo calificado (Secretaría Técnica Nacional Ambiental [Setena], 2006). Si en este estudio se identifica una falla geológica, se debe indicar si se trata de una falla inactiva,

potencialmente activa o activa (Astorga-Gätgens, 2013). Tratándose de una falla “potencialmente activa” se establece una zona de seguridad preliminar de 50 metros de ancho a ambos lados de la traza de la falla o de la zona de falla, la cual puede disminuir a 15 y hasta a 10 metros, en el caso de que no existan ramificaciones.

Cuando se trata de zonas de falla anchas, esta dimensión puede llegar a 100 metros, los que se suman al ancho propio de la zona de falla. También se debe caracterizar la vulnerabilidad a una potencial fractura en superficie por falla geológica activa, señalando si se requiere o no fijar una “zona de seguridad” y realizar un estudio geológico-neotectónico de la falla que permita detallar la zona de seguridad o de restricción al uso del suelo (Astorga-Gätgens, 2013).

En síntesis, de lo expuesto aparece que, en todos los casos, se fijaron áreas de restricción en función de la distancia a la falla. En estas áreas, en general, se prohíbe la subdivisión predial, se impide edificar o se restringe la infraestructura crítica —entendida como aquella peligrosa o con una alta carga de ocupación—, se admite la vivienda de cierta materialidad y altura, y se exige informar al comprador que la propiedad se ubica en una zona de falla. También, se incorpora el área amenazada al sistema de espacios abiertos, se exigen informes geológicos, redes seguras, vías alternativas, y se restringe la densidad máxima y los coeficientes de ocupación de suelo y constructibilidad.

La regulación chilena para la reducción del riesgo en los planes reguladores comunales

En Chile, si bien la Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC) incluye las áreas de riesgo en el listado de normas urbanísticas que establecen los planes reguladores, no las define ni establece parámetros para su regulación.

Por su parte, la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), que reglamenta la LGUC, indica en su artículo 2.1.17. que “en los planes reguladores podrán definirse áreas restringidas al desarrollo urbano, por constituir un peligro potencial para los asentamientos humanos”, y que las áreas de riesgo son “aquellos territorios en los cuales, previo estudio fundado, se limita determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran para su utilización la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole suficientes para subsanar o mitigar tales efectos” (Decreto N.º 47, 1992, artículo 2.1.17., incisos 1º y 4º).

Agrega ese artículo, que

para autorizar proyectos a emplazarse en áreas de riesgo, se requerirá que se acompañe a la respectiva solicitud de permiso de edificación un estudio fundado, elaborado por profesional especialista y aprobado por el organismo competente, que determine las acciones que deberán ejecutarse para su utilización, [y que] en estas áreas, el plan regulador establecerá las normas urbanísticas aplicables a los proyectos una vez que cumplan con los requisitos establecidos (Decreto N.º 47, 1992, artículo 2.1.17., inciso 5º).

Pues bien, en este reglamento no se define una metodología para elaborar los estudios de riesgo “ni se especifica un estándar mínimo de mitigaciones a realizar” (Moris et al. 2017, p.95). Tampoco se identifica el organismo competente para revisar dicho estudio fundado, ni existe claridad “en el procedimiento y

capacidades administrativas de estos organismos para evaluar y aprobar estas solicitudes” (Consejo Nacional de Desarrollo Urbano [CNDU], 2019, p.14).

Esto resulta particularmente relevante en el caso de las áreas de riesgo por falla geológica, pues el propio Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), que evalúa los estudios de peligro de remociones en masa, para la obtención de permisos municipales, anota en la guía de contenidos exigidos para dichos estudios que

los aspectos revisados y validados son únicamente aquellos de los cuales este Servicio es competente, en particular la componente geológica del peligro de remociones en masa. Por lo anterior, aspectos ingenieriles, medidas de mitigación, estructuras, geotecnia de suelos, entre otras similares, no forman parte de la revisión y marco acción de este Servicio (2022, p. 6).

A partir de 2021, la Ley N. ° 21.364 —que establece el sistema nacional de prevención y respuesta ante desastres, sustituye la oficina nacional de emergencia por el servicio nacional de prevención y respuesta ante desastres, y adecúa normas que indica— anota que el mapa de amenaza respectivo, que identifique las áreas expuestas al efecto directo o indirecto de una amenaza y cuya elaboración estará a cargo de los organismos técnicos correspondientes según sus competencias, será “utilizado para la elaboración de los instrumentos de planificación territorial” (Ley N. ° 21.364, 2021, artículo 35).

Metodología

El presente estudio tiene un alcance exploratorio con un enfoque mixto, pues combina métodos cualitativos y cuantitativos, y considera un estudio de caso. Este corresponde al sector del piedemonte de la comuna de Puente Alto afecto a la FSR (áreas A, B y C de la Figura 2) y se realizó durante el año 2022. En particular, se consideraron tres objetivos y el desarrollo de las siguientes actividades asociadas a cada uno:

Objetivo 1. Identificar distintos niveles de amenaza en el área afectada por la falla San Ramón en Puente Alto

Se realizaron entrevistas semiestructuradas a cinco profesionales especialistas en riesgo sísmico: un ingeniero civil, profesor del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la U. de Chile, una geóloga y un geólogo, ambos profesores del Departamento de Geología Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la U. de Chile, y una geóloga y un geólogo, ambos del Servicio Nacional de Geología y Minería

Se formularon preguntas con el fin de corroborar el ancho del buffer definido como área de posible ruptura de la falla; los niveles de aceleración del terreno en el buffer y fuera de este; y establecer la eventual existencia de multiamenazas que pudieran importar nuevas áreas de riesgo. Esta información permitió establecer distintos niveles de amenaza.

Se elaboró un mapa preliminar de las áreas susceptibles de remoción en masa, considerando como tales aquellas áreas en que las aceleraciones esperables ante un terremoto en la FSR superen los 0,3 g., y posean pendientes superiores al 30°. Lo anterior, a partir de la información contenida en la base de datos DEM Alos Palsar de la Región Metropolitana, y del Geoportal IDE Chile, del Ministerio de Bienes Nacionales. Mediante geoproceto GIS, del programa QGIS, se calcularon las pendientes y estas se simbolizaron por rangos.

Luego, en la imagen satelital Google Earth del año 2022 se incorporó la traza actualizada de la FSR (Easton et al., 2022), el buffer de 300 metros, los polígonos de las áreas susceptibles de remoción en masa predefinidas y una línea paralela a 5 km al poniente de la traza de la falla, todos en formato kmz. Con esta actividad se generó un mapa con áreas afectadas por la FSR en Puente Alto, según niveles de amenaza 1 a 4, de mayor a menor.

Objetivo 2. Identificar los factores incidentes en la reducción del riesgo sísmico por fallas corticales

En las entrevistas semiestructuradas realizadas a los profesionales especialistas individualizados en la actividad 1, y a un arquitecto especialista en planificación urbana, se efectuaron consultas relativas a los factores incidentes en la vulnerabilidad y los criterios generales para su regulación revelados en el marco teórico.

Sobre la base de estas entrevistas y de estudios sobre infraestructura crítica contenidos en la resolución 178, de 2018, de la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (Resolución N.º 178, 2018, p. 27 a 30); la Norma Chilena Oficial NCh4330f.1996 "Diseño sísmico de edificios", (NCh4330f.1996, INN, 1996, p. 19 y 20); la Resolución N.º 8.954, de 2013, del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, "Edificaciones estratégicas y de servicio comunitario", NTM 003 (Resolución N.º 8.954, 2013); y el documento *Propuestas para el mejoramiento de las condiciones de resiliencia de las ciudades chilenas. Equipamiento crítico*, del Consejo Nacional de Desarrollo Urbano (CNDU, 2019), se elaboró una matriz de infraestructura crítica clasificada por tipo de uso de suelo y nivel de criticidad.

Esto permitió obtener un listado preliminar de usos de suelo —conforme a la OGUC— de criticidad alta, media, baja y nula, y un listado de factores de vulnerabilidad incidentes y criterios generales para su regulación, en las diferentes áreas según sus niveles de amenaza.

Objetivo 3. Definir recomendaciones de ajustes al Plan Regulador Comunal de Puente Alto, con el fin de disminuir el riesgo sísmico asociado a la falla San Ramón

Considerando los niveles de amenaza en el territorio, los factores incidentes en la vulnerabilidad y los criterios para su regulación, se analizaron las normas urbanísticas previstas tanto por el Plan Regulador Metropolitano de Santiago como por el PRC de Puente Alto en el área amenazada. En función de lo anterior, se recomendaron ajustes al PRC de Puente Alto, incluyendo un área de riesgo por falla cortical, nuevas zonas con normas urbanísticas más restrictivas y condiciones, y nuevas vías, en el área amenazada.

Resultados

Identificación de los distintos niveles de amenaza en el área afecta por la falla San Ramón en la comuna de Puente Alto

El área de posible ruptura de la falla y el área del piedemonte al oriente de esta se encuentran actualmente ocupadas por una serie de conjuntos habitacionales (Figuras 3 y 4). Además, se prevé la ejecución de otros conjuntos que ya cuentan con permiso de edificación y/o resolución de calificación ambiental favorable. Se calcula que de las aprox. 360 hectáreas del área de potencial ruptura de la falla de la comuna de Puente Alto, aprox. 92 se encuentran actualmente ocupadas (lo que equivale a un 25,5 %) y en ellas habitan aprox. 2.542 personas. De acuerdo con las densidades previstas en el PRC vigente, es posible incluir aprox. 9.634 nuevos habitantes tan solo en el área de potencial ruptura. Los nuevos proyectos, que ocupan aprox. 16 hectáreas, dan cuenta del proceso acelerado de ocupación del territorio, sin considerar la presencia de la FSR.

Además, en esta área de potencial ruptura se emplazan ciertas instalaciones de la planta potabilizadora de Aguas Andinas, que abastece a gran parte del área metropolitana de Santiago y una línea de alta tensión, la que coincide con la traza de la falla San Ramón en más de la mitad de su recorrido por Puente Alto.

Figura 3

Vista panorámica de los conjuntos habitacionales emplazados a lo largo de la falla San Ramón



Nota. Fotografía autora (E. Pontigo).

Sobre la base de los estudios revisados en el marco teórico y de las entrevistas realizadas a los expertos en riesgo sísmico mencionados en la actividad 1 de la metodología, se identificaron cuatro niveles de amenaza.

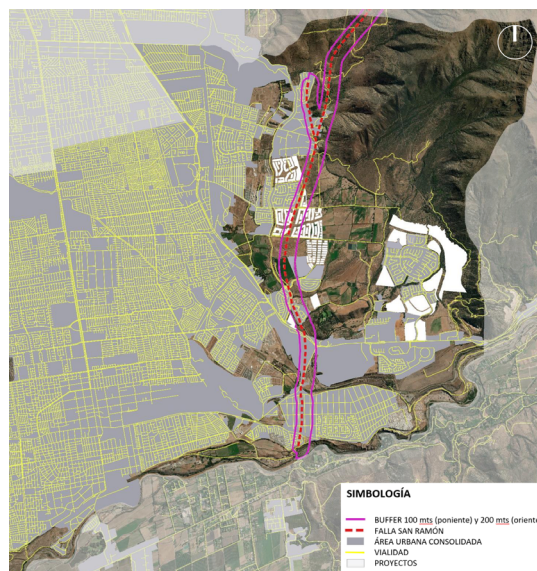
En primer término, se definió como el área con el nivel más alto de amenaza aquella de potencial ruptura de la falla pues en el evento de que se desplace verticalmente el terreno, las edificaciones que se ubiquen sobre esta colapsarán y no se conocen medidas de mitigación que puedan evitarlo. Consultada

sobre el ancho del buffer de 300 metros del área de potencial ruptura la geóloga de la U. de Chile señaló que “este garantiza que la ruptura no alcance a afectar a las personas”, pues además de la falla principal, existen ramificaciones o fallas secundarias que también provocan desplazamientos. Esto fue refrendado por el geólogo de la U. de Chile. Así, para efectos de este estudio, se mantuvo el buffer que tiene un ancho de 100 metros hacia el poniente de la traza y 200 al oriente de esta (1 en la Figura 5), acorde con lo indicado en el citado informe de la Seremi de Vivienda y Urbanismo RM (2012).

Se propone definir como el segundo nivel de amenaza, las zonas susceptibles a remociones en masa ante la potencial activación de la FSR, considerando como tales aquellas áreas en donde las aceleraciones esperables ante un terremoto en la FSR superen los 0,3 g., y que además presentan pendientes superiores a 30° (2 en la Figura 5), y que se ubican a 5 km de la falla según lo sugerido por la geóloga de la Universidad de Chile. Al respecto el ingeniero civil entrevistado explicó que, si bien la norma sísmica chilena incluye la variable tipo de suelo “lo que no está incorporado es la pendiente y la generación de rodados o de movimientos en masa asociados a la vibración”. Estas áreas requieren ser precisadas en un estudio de riesgo que considere los demás factores condicionantes de las remociones en masa, lo que excede el alcance de esta investigación.

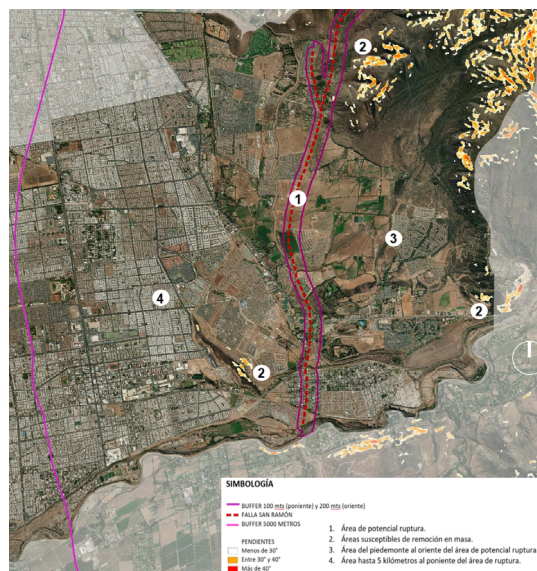
Como un tercer nivel de amenaza se estableció el área que va desde la traza de la falla hasta el límite urbano oriente (3 de la Figura 5), pues se contiene en los 5 kilómetros al oriente del área de potencial ruptura. Esta distancia —la más conservadora— fue la sugerida por el geólogo de la U. de Chile, quien señaló que “en los 5 kilómetros más cercanos se va a superar por creces lo que estipula la norma sísmica para esa zona en este caso”. En dicha área, las aceleraciones esperadas —PGA entre 58 % g y 70 % g— en caso de que se produzca un terremoto asociado a la FSR, superan las aceleraciones previstas para la zona sísmica 2 de la NCh433 (INN, 1996) aplicable en toda la comuna de Puente Alto.

Figura 4
Mapa de vías más consolidado urbano



Nota. Elaboración propia a partir de base de datos conectividad IDE Minvu (2022) y Censo 2017.

Figura 5
Niveles de amenaza del área afecta a la Falla San Ramón



Nota. Elaboración propia a partir de Easton et al. (2022), Seremi de Vivienda y Urbanismo RM (2012) e IDE Chile (2022).

Por último, se incluyó como un cuarto nivel de amenaza, el área emplazada a 5 km al poniente del área susceptible de ruptura (4 de la Figura 5), en la cual se prevén aceleraciones –PGA entre 47 % g y 58 % g– menores que las del área emplazada al oriente, pero también superiores a aquellas previstas para la zona sísmica 2.

Identificación de los factores incidentes en la reducción del riesgo sísmico por fallas corticales

De lo señalado por los especialistas entrevistados, es posible inferir que en el área de potencial ruptura es necesario limitar al máximo la posibilidad de edificar y que fuera de esta área la principal herramienta para mitigar el riesgo sísmico por falla cortical sería una norma de diseño sísmico especial que considere las aceleraciones máximas previstas.

En cuanto a la regulación de las áreas en las que estas aceleraciones superarían las previstas en la norma de diseño sísmico vigente, y a falta de una norma de diseño sísmico apropiada, los entrevistados sugieren restringir las actividades peligrosas, aquellas con alta carga de ocupación, las requeridas para la recuperación de la catástrofe, y aquellas cuyos ocupantes puedan presentar dificultades en caso de evacuación. Esto es consistente con lo indicado en el marco teórico respecto de la necesidad de regular la infraestructura crítica, no obstante, no existe un consenso en términos de cómo se clasifica este tipo de infraestructura.

Con el fin de determinar qué actividades o usos de suelo caben en esta definición se revisaron los documentos normativos y/o indicativos de la regulación chilena mencionados en el objetivo 2 de la Metodología.

Se optó por la definición de niveles de criticidad de la infraestructura –alta, media, baja y no crítica– consignados en la citada “Metodología para la elaboración de Plan de Continuidad Operacional, de los organismos del Sistema Nacional de Protección Civil” (Resolución N.º 178, 2018, pp. 27-30), a saber:

Alta: Corresponde a aquella infraestructura necesaria para permitir la prestación continua de aquellos servicios esenciales e impostergables para la vida, salud y sostenibilidad inmediata de la población, sin el empleo de infraestructura auxiliar de apoyo o de respaldo. Además, tiene incidencia en el compromiso vital de la población.

Media: Corresponde a aquella infraestructura necesaria para permitir la prestación continua de aquellos servicios esenciales e impostergables para la vida, salud y sostenibilidad inmediata de la población, pudiendo emplear infraestructura auxiliar de apoyo o de respaldo, y pudiendo experimentar interrupciones parciales o totales.

Baja: Corresponde a aquella infraestructura necesaria para permitir la prestación básica de aquellos servicios esenciales postergables para la vida, salud y sostenibilidad de la población o pudiendo ser sustituida por infraestructura auxiliar de apoyo o de respaldo.

No crítica: Corresponde a aquella infraestructura que brinda servicios postergables, cuya interrupción o cese de funcionamiento no compromete el bienestar de la población.

Considerando dichos criterios —relativos a la continuidad de servicio en caso de desastre, la peligrosidad, la potencial aglomeración o la dependencia de sus ocupantes—, los listados de infraestructura crítica por nivel de criticidad de los documentos citados, lo indicado por los especialistas entrevistados y la clasificación de los usos de suelo en la OGUC, se proponen los siguientes niveles de criticidad de las edificaciones según su uso de suelo, destino, calificación actividad y/o nivel (Tabla 1).

Tabla 1
Niveles de criticidad del uso de suelo

Residencial	
Criticidad	Destino
Alta	Establecimientos de larga estadia para adultos mayores.
Media	Hogares de acogida, centros de protección de menores, complejos de viviendas tuteladas, albergues.
Baja	Vivienda, hospedaje (incluye hoteles, residenciales, cabañas, hosterías y similares).
Actividades productivas	
Criticidad	Destino
Alta	Peligrosas (según artículo 4.14.2. de la OGUC).
Baja	Insalubres o contaminantes, molestas e inofensivas (según artículo 4.14.2. de la OGUC).
Infraestructura	
Criticidad	Destino o calificación
	De transporte
Alta	Peligrosa (según artículo 4.14.2. de la OGUC).
Media	Terminales de transporte terrestre, centros de control de autopistas, aeropuertos, aeródromos estaciones ferroviarias, estaciones de metro, estaciones intermodales, y recintos marítimos o portuarios (puertos, terminales portuarios y similares).
	Sanitaria
	Peligrosa (según artículo 4.14.2. de la OGUC).
Alta	Plantas de captación, distribución o tratamiento de agua potable o de aguas servidas, y centros de control de empresas sanitarias.
Media	Plantas de almacenamiento y tratamiento de aguas lluvia, rellenos sanitarios, vertederos, plantas de tratamiento de residuos sólidos, y estaciones exclusivas de transferencia de residuos.ergues.
	Energética
	Peligrosa (según artículo 4.14.2. de la OGUC).
Alta	Centrales de generación o distribución de energía, centrales de generación o distribución de gas, centros de control de empresas de servicios energéticos, centros de telecomunicaciones y respaldo informático, y emisoras de telecomunicaciones.
Equipamiento	
Criticidad	Destino o calificación
	Científico
Baja	Establecimientos destinados principalmente a la investigación, divulgación y formación científica, al desarrollo y transferencia tecnológica y a la innovación técnica.

Tabla 1 (Continuación)

Niveles de criticidad del uso de suelo

Comercio	
Media	Estaciones de servicio automotor con venta minorista de combustibles líquidos. Centros comerciales, grandes tiendas, supermercados y mercados.empresas sanitarias.
Baja	Restaurantes, fuentes de soda, bares, discotecas, estaciones de servicio automotor sin venta minorista de combustibles líquidos y centros de servicio automotor.de residuos sólidos, y estaciones exclusivas de transferencia de residuos.ergues.
Culto y cultura	
Media	Catedrales, templos, sinagogas, mezquitas; salas de concierto o espectáculos, cines, teatros, auditorios y centros de convenciones. Canales de televisión, radio y prensa escrita.
Baja	Museos, bibliotecas, santuarios, centros culturales, galerías de arte, y exposiciones o difusión de toda especie.
Deporte	
Alta	Gimnasios e instalaciones deportivas de nivel regional o nacional (con carga de ocupación superior a 5.000 personas, según artículo 4.8.2. de la OGUC).
Media	Instalaciones deportivas de nivel comunal (con carga de ocupación superior a 1.000 personas e inferior a 5000, artículo 4.8.2. de la OGUC).
Baja	Instalaciones deportivas de nivel vecinal (con carga de ocupación hasta 1.000 personas, artículo 4.8.2. de la OGUC).
No crítica	Canchas y multicanchas.res.
Educación	
Alta	Establecimientos destinados principalmente a la formación o capacitación en educación superior, técnica, media, básica, básica especial y prebásica.
Media	Centros de capacitación, de orientación o de rehabilitación conductual.
Equipamiento	
Criticidad	Destino o calificación
Esparcimiento	
Media	Centros de capacitación, de orientación o de rehabilitación conductual.
Baja	Parques zoológicos, parques de entreteniones, juegos mecánicos y electrónicos.
Salud	
Alta	Hospitales, servicios de urgencia, centros reguladores y bases de servicio de atención médico de urgencias, clínicas, policlínicos, consultorios, postas, centros de rehabilitación, centros de sangre, centrales de almacenamiento de vacunas y centros de provisión/adquisición de medicamentos de uso crítico
Baja	Centros comunitarios de salud familiar y de salud mental familiar.
No crítica	Cementerios, crematorios.
Seguridad	
Alta	Unidades policiales, cuarteles de bomberos. Cárceles, centros de detención.

Tabla 1 (Continuación)

Niveles de criticidad del uso de suelo

Servicios	
Alta	Oficinas y centros de operaciones de emergencia, salas de crisis, complejos aduaneros.
Media	Centros de distribución/adquisición de alimentos esenciales básicos, Secretarías Regionales Ministeriales de Salud, Servicios de Salud, Instituto de Salud Pública.
Baja	Oficinas, centros médicos o dentales, notarías, instituciones de salud previsional, instituciones públicas, administradoras de fondos de pensiones, compañías de seguros, correos, telégrafos, centros de pago, bancos, financieras; y servicios artesanales, tales como reparación de objetos diversos.
Espacio público	
Criticidad	Actividad y/o nivel
No crítica	Sistema vial, a las plazas, parques y áreas verdes públicas, en su calidad de bienes nacionales de uso público.
Espacio público	
Criticidad	
No crítica	Parques, plazas y áreas libres destinadas a área verde, que no son Bienes Nacionales de uso público.

Nota. Elaboración propia con base en Resolución N.º 178 (2018), INN (1996), Resolución N.º 8.954 (2013), CNDU (2019) y artículo 2.1.33. de la OGUC.

Los entrevistados también proponen fijar anchos mínimos de vías que garanticen la circulación en el caso de que colapsen las edificaciones a sus costados, contemplar zonas seguras, zonas de reunión, zonas de acopio de escombros, y exigencias de estándares constructivos a las redes vitales —de agua potable, alcantarillado, electricidad y telecomunicaciones, entre otras—, como por ejemplo el soterramiento de las instalaciones eléctricas. Respecto de la materialidad de la estructura soportante, recomiendan preferir el hormigón armado y la albañilería confinada con ladrillo sólido y evitar la albañilería armada.

En ese contexto, se presentan los siguientes criterios generales para la regulación de las diferentes áreas según sus niveles de amenaza.

- En específico, para el *área de potencial ruptura*, se plantea:
- Fijar un “área de riesgo” por falla activa.
- Evitar la subdivisión de las áreas no ocupadas, aumentando la superficie predial mínima.
- Evitar la edificación en las áreas no ocupadas, excepto con aquellos usos de suelo sin criticidad.
- Asegurar el acceso-salida, para la evacuación o asistencia de sus habitantes en caso de catástrofe, de los conjuntos habitacionales existentes que cuentan con una sola vía de acceso, proponiendo nuevas vías.
- Permitir solo los usos de suelo de criticidad baja o nula, previstos en el PRC vigente, en los sectores ya habitados.
- Limitar la altura máxima de edificación, la densidad bruta máxima y los coeficientes de constructibilidad y de ocupación de suelo, en los sectores ya habitados de esta área, con el fin de impedir la construcción de nuevas viviendas.

Respecto a las *áreas susceptibles de remoción en masa ante la potencial activación de la falla San Ramón*, se propone:

- Evitar la ocupación con nuevas edificaciones, fijando los usos de suelo Área Verde o Espacio Público en aquellas áreas que el PRC vigente no los contempla.
- Limitar la altura máxima de edificación y el coeficiente de constructibilidad.

Respecto al área del piedemonte al oriente del área de potencial ruptura, se propone:

- Limitar la altura máxima de edificación y la densidad bruta máxima.
- Condicionar los usos de suelo de media o alta criticidad, a un proyecto de cálculo estructural que considere la presencia de la falla.
- Condicionar los demás usos a una estructura soportante de hormigón armado, albañilería confinada con ladrillo sólido, madera o acero.
- Condicionar los loteos con construcción simultánea a anchos mínimos de vías que garanticen la circulación en el caso de que colapsen las edificaciones a sus costados, a la inclusión de zonas seguras y a exigencias de estándares constructivos a las redes vitales, como por ejemplo el soterramiento de las instalaciones eléctricas.

Finalmente, para el área hasta 5 kilómetros al poniente del área de potencial ruptura se propone condicionar los usos de suelo de media o alta criticidad a un proyecto de cálculo estructural que considere la presencia de la falla, y a ciertos tipos de estructura soportante.

Normas urbanísticas aplicables en el área amenazada por la falla San Ramón

El área amenazada por la FSR se encuentra regulada por el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (Resolución N.º 20, 1994) (Figura 6) y por el Plan Regulador Comunal de Puente Alto (Decreto 423, de 2003) (Figura 7).

Figura 6

Plan Regulador Metropolitano de Santiago, área amenazada por la falla San Ramón

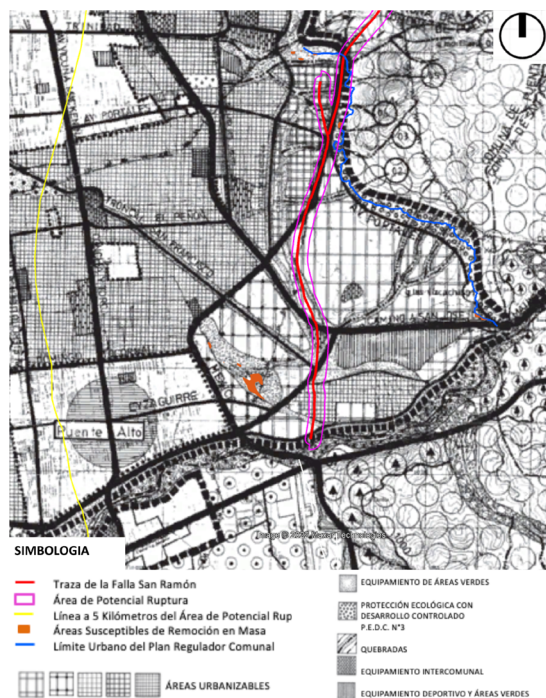


Figura 7

Plan Regulador Comunal de Puente Alto, área amenazada por la falla San Ramón



Nota. Elaboración propia a partir de Easton et al. (2022), Seremi de Vivienda y Urbanismo RM (2012) e IDE Chile (2022).

Nota. Elaboración propia a partir de Plan Regulador Comunal de Puente Alto vigente.

El *área de potencial ruptura* contiene las siguientes zonas: “Avenidas Parque”, H2, H3 y H5 todas denominadas “Residencial y Equipamiento”, R1 “Zonas de Protección Ecológica con Desarrollo Controlado (P.E.D.C. N.º 3), según Artículo 8.3.1.2 del P.R.M.S.”, R2 “Riesgo de Origen Natural de Inundación de Quebradas y Cauces Artificiales, según Artículo 8.2.1 del P.R.M.S.; y parte del Sistema de Áreas Verdes Metropolitano, según Artículo 5.2 del P.R.M.S.”, INF1 “Zona de Resguardo de Infraestructura Sanitaria; Fuentes de Abastecimiento y Plantas de Tratamiento de Agua Potable; Plantas de Tratamientos de Aguas Servidas, según Artículo 8.4.2, letras a) y b) del P.R.M.S.” e INF-2 “Zona de Resguardo de Infraestructura Energética, según Artículo 8.4.3, letra b) del P.R.M.S.”.

Las *áreas susceptibles de remoción en masa* se encuentran en las zonas H5 y R1, ya mencionadas, y AV1 “Cerros Islas”, y el *área del piedemonte al oriente del área de posible ruptura* se regula por las aludidas zonas H2, H5, R1 y R2, y E(i)2 “Equipamiento de Esparcimiento, Culto y Cultura (preferentemente)”, E(i)3 “Autódromo Las Vizcachas”, HET1 “Residencial y Equipamiento de Esparcimiento (preferentemente)”, y AV2 “Plazas y Áreas Verdes Comunes e Intercomunales”. Por último, en el *área hasta 5 kilómetros al poniente del área de potencial ruptura* se incluyen las zonas H1, H2, H3, H4, H6, INF1, E(c)1, E(c)2, E(i)1, E(i)3, E(i)4, HE(m)1, HE(m)2, IM2, AV1, AV2, R1, R2, R4, y II.

Recomendaciones de ajustes al Plan Regulador Comunal de Puente Alto

Con el fin de disminuir el riesgo sísmico asociado a la falla San Ramón se proponen las siguientes recomendaciones para ser incluidas en la Ordenanza Local del PRC de Puente Alto (ver figura 8).

Área de Potencial Ruptura. Se propone reconocer el área de riesgo por falla geológica “R7” en el buffer de 100 metros hacia el poniente y 200 metros hacia el oriente de la traza de la FSR, en la cual las normas urbanísticas aplicables a los proyectos que cumplan con los requisitos establecidos en el artículo 2.1.17. de la OGUC, corresponderán a las de la zona del plan en que se encuentre emplazado el proyecto.

En todos los sectores *no edificados* de esta área de riesgo —con excepción de aquellos que cuentan con un permiso de edificación o una resolución de calificación favorable a octubre de 2022—, con el fin de evitar su ocupación se proponen nuevos parques comunales —zona AV2 del PRC— o áreas verdes que no son Bienes Nacionales de Uso Público —nueva zona AV—, exigiéndose en ambos casos un coeficiente de constructibilidad de 0,01, el agrupamiento aislado y una altura máxima de 7 metros y 2 pisos, con el fin de impedir la edificación de los equipamientos siempre admitidos en dichos usos de suelo. La zona AV2 se modifica en el sentido de no admitir la infraestructura de “vialidad y aguas lluvia”, con el fin de ajustarse a lo previsto en el artículo 2.1.30. de la OGUC.

En los sectores *ya edificados* —y en aquellos que cuentan con un permiso de edificación o una resolución de calificación favorable a octubre de 2022— se procura mantener solo los usos de suelo de baja o nula criticidad actualmente permitidos en cada zona del PRC, y se ajustan las demás normas urbanísticas previstas incidentes en la reducción del riesgo por falla geológica:

1. Las zonas H2 y H3 —que pasan a denominarse H2A— se modifican en el sentido de permitir solo los usos de suelo de criticidad baja o nula, se aumenta la superficie predial mínima a 10.000 m², se disminuye la altura máxima a 7 metros y 2 pisos, y se disminuye la densidad bruta máxima a 40 habitantes por hectárea lo que implica, en la práctica, que se admita una sola vivienda en los predios existentes, toda vez que estos en su mayoría tienen aproximadamente 1.000 m² y ya cuentan con una vivienda.

2. La zona H5 —que pasa a denominarse H5A—, se cambia en el sentido de permitir solo los usos de suelo de criticidad baja o nula, se aumenta la superficie predial mínima a 10.000 m² y se disminuye la altura máxima a 7 metros y 2 pisos. En la zona correspondiente a una parcelación, que se designa H5A-1, se propone una densidad bruta máxima de 8 habitantes por hectárea, lo que implica, en la práctica, que se admita una sola vivienda en los predios existentes, pues estos en su mayoría tienen aproximadamente 5.000 m² y ya cuentan con una vivienda.
3. La zona R2 —nueva R2A—, se altera en el sentido de prohibir la infraestructura de “Vialidad y Aguas Lluvias”.
4. La zona INF-1 se modifica en el sentido de circunscribir su extensión al terreno ocupado por la Planta de Tratamiento de Agua Potable Las Vizcachas, pues, a pesar de tratarse de un uso de suelo de alta criticidad, el artículo 8.4.2, letra a), del PRMS —instrumento de planificación territorial de nivel superior— obliga a incluir esa planta en el plan regulador comunal como área de restricción por protección de infraestructura.
5. Los terrenos que no pertenecen a la planta mencionada, ocupados por el balneario Municipal de Puente Alto y el recinto Las Vizcachas del Ministerio de Obras Públicas, se designan como zonas de “equipamiento intercomunal” y “equipamiento de áreas verdes” en el plano RM-PRM-92-1A.2 del PRMS. Por ello, a estas áreas se le asignan las zonas AV2 y E(i)3A “Equipamiento Recreacional y Deportivo”, en la cual se permiten usos de suelo de baja y nula criticidad.

Áreas susceptibles de remoción en masa ante la potencial activación de la falla San Ramón y áreas aledañas en la parte baja. Como fuera explicado, la única área susceptible de remoción en masa que precisa restringir sus normas urbanísticas se encuentra incluida en el área de potencial ruptura. Por tratarse de un sector no ocupado se propuso como área verde —nueva zona AV—, restringiéndose el coeficiente de constructibilidad y la altura máxima, con el fin de impedir la edificación de los equipamientos siempre admitidos en dicho uso de suelo.

Área del piedemonte al oriente del área de potencial ruptura. En toda el área del piedemonte o “bloque superior”, emplazada entre el área de riesgo por falla geológica y el límite urbano oriente del PRC, en las zonas E(i)3 —nueva E(i)3B—, HET1, E(i)2, H2 —nueva H2B—, y H5 —nueva H5B— se propone limitar los usos de suelo admitidos a aquellos de nula criticidad.

De acuerdo con el artículo 184 de la Ley General de Urbanismo y Construcciones en lo que atañe a la posibilidad de otorgar incentivos en las normas urbanísticas aplicadas en la medida en que se cumplan ciertas condiciones que induzcan o colaboren en la sustentabilidad urbana, los usos de suelo de baja criticidad se admiten, siempre que su estructura soportante sea de hormigón armado, albañilería confinada con ladrillo sólido, madera o acero, y los usos de mediana y alta criticidad, se permiten condicionados a la presentación de proyectos de cálculo estructural que consideren los estudios sobre la FSR (Decreto N.º 458, 1976, artículo 184). Los loteos con construcción simultánea se condicionan a vías con un perfil que garantice la circulación en el caso de que colapsen las edificaciones a sus costados, sin fondos de saco; a la inclusión de zonas seguras; y a instalaciones eléctricas soterradas.

Además, en las zonas en que el PRC no fija una altura máxima, esta se establece en 14 metros y 4 pisos.

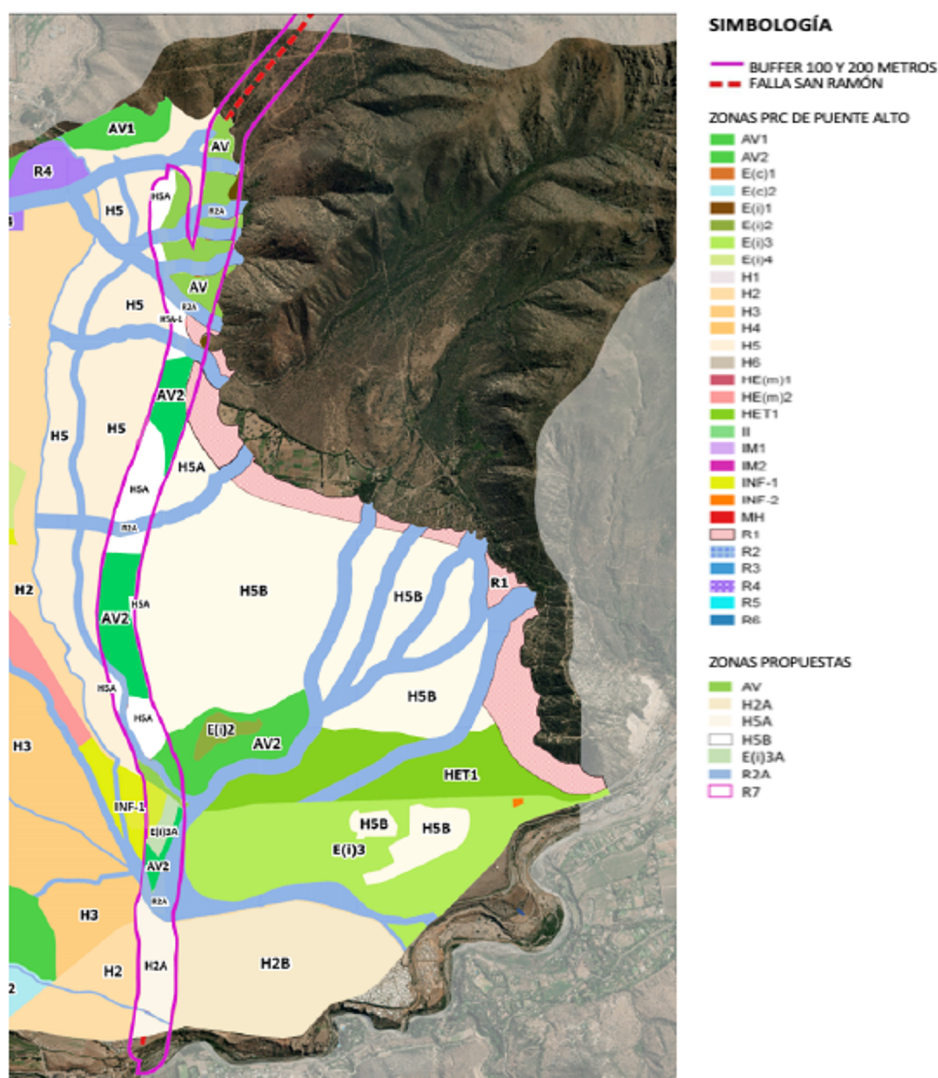
Área hasta 5 kilómetros al poniente del área de potencial ruptura. Se propone limitar los usos de suelo admitidos a aquellos de nula criticidad; permitir los usos de suelo de baja criticidad, en la medida

en que su estructura soportante sea de hormigón armado, albañilería confinada con ladrillo sólido, madera o acero; y admitir los usos de mediana y alta criticidad, condicionados a la presentación de proyectos de cálculo estructural que consideren los estudios sobre la FSR.

En seguida se proponen nuevas vías colectoras, de 20 metros de ancho, como segunda alternativa de evacuación, hacia el poniente, de los conjuntos habitacionales –“La Dehesa La Viña”, “Santa María del Peñón” y “Paso Alto”– emplazados en el área de riesgo por falla geológica: apertura de la prolongación de la vía Las Palmas al poniente hasta av. Las Perdices; apertura de una nueva vía en el límite norte del conjunto habitacional “Santa María del Peñón”, desde av. Paseo Pie Andino, hasta av. Las Perdices; y apertura de la prolongación de la vía colectora “Cerro del Bonete 2 Norte”, y ensanche de esa calle, entre Santa Emilia y av. Camilo Henríquez. Se propone además un puente sobre el canal La Luz en todos los casos.

Figura 8

Ajustes a la zonificación del Plan Regulador Comunal de Puente Alto



Nota. Elaboración propia a partir de Plan Regulador Comunal de Puente Alto vigente.

Conclusiones

En nuestro país la planificación urbana de áreas de riesgo por falla geológica es un tema reciente (Cámara de Diputados, 2021), por lo que se pretende que el enfoque y la metodología propuestos en esta investigación sirvan como insumo a los profesionales encargados de eventuales modificaciones a los planes reguladores de comunas afectadas por fallas geológicas. Este estudio revela que del total de 360 hectáreas del área de potencial ruptura de la falla de Puente Alto, aproximadamente 92 hectáreas se encuentran actualmente ocupadas, y cerca de 16 hectáreas se encuentran comprometidas por proyectos con permisos de edificación y/o autorizaciones ambientales, por lo que urge la actualización de los instrumentos de planificación territorial atingentes al área amenazada por la FSR.

La presente investigación ha demostrado que es posible ajustar el PRC de Puente Alto, evitando la llegada de alrededor de 9.634 nuevos habitantes en el área de amenaza de ruptura y la construcción de infraestructura crítica en el área de potencial ruptura, además de disminuir la vulnerabilidad de las edificaciones en los sectores con aceleraciones mayores a las previstas en la norma sísmica vigente, reduciendo el riesgo sísmico asociado.

Se identificaron los factores incidentes en la vulnerabilidad sísmica asociada a fallas activas corticales, siendo el principal factor el uso de suelo, por lo que se propone una clasificación de los usos de suelo de acuerdo con su nivel de criticidad, derivada de la necesidad de continuidad de servicio en caso de desastre, la peligrosidad, la potencial aglomeración o la dependencia de ocupantes.

Aparecen de criticidad alta ciertos equipamientos de salud –hospitales, servicios de urgencia, centros reguladores y bases de servicio de atención médico de urgencias, clínicas, policlínicos, consultorios, postas, centros de rehabilitación, centros de sangre, centrales de almacenamiento de vacunas y centros de provisión/adquisición de medicamentos de uso crítico–, de seguridad –unidades policiales, cuarteles de bomberos, cárceles y centros de detención–, de servicios –oficinas y centros de operaciones de emergencia, salas de crisis, complejos aduaneros–, de deporte –gimnasios e instalaciones deportivas de nivel regional o nacional–, de educación –superior, técnica, media, básica, básica especial y prebásica–, las actividades productivas y la infraestructura peligrosas, y en el uso residencial los establecimientos de larga estadía para adultos mayores.

Otros factores incidentes reconocidos son la subdivisión predial mínima, la altura máxima de la edificación, la densidad, la materialidad de la estructura soportante de las edificaciones y los estándares de la urbanización referidos a la accesibilidad y a las redes. También se determinan los criterios generales para regular esos factores incidentes en un área amenazada por falla cortical activa, distinguiendo distintos niveles de amenaza.

Así, en primer término, se propone fijar un área de riesgo en el área de potencial ruptura de acuerdo con lo indicado en el estudio geológico pertinente. Se sugiere incorporar los terrenos no ocupados de esta área al sistema de espacios abiertos, fijando un uso de suelo área verde o espacio público, restringiendo la altura máxima y el coeficiente de constructibilidad del equipamiento. En los sectores ocupados se procura impedir la subdivisión predial y la construcción de nuevas edificaciones de uso residencial que impliquen la llegada de nuevos habitantes y de cualquier otro uso de criticidad alta o media, además de asegurar a los conjuntos de viviendas existentes la salida y entrada a dos vías independientes.

En segundo lugar, en aquellas áreas fuera del área de posible ruptura, en las que eventualmente se superarán las aceleraciones previstas por la normativa sísmica vigente, mientras se adecúa dicha norma, se recomienda condicionar las edificaciones destinadas a usos de alta o media criticidad, a la presentación de proyectos de cálculo estructural para las edificaciones y la urbanización que consideren la presencia de la falla. Específicamente en el área de potencial ruptura de Puente Alto, resulta indispensable estudiar el eventual comportamiento de las torres de alta tensión y las instalaciones de la planta potabilizadora de Aguas Andinas existentes, durante un terremoto asociado a la FSR. En tercer lugar, se requieren estudios de amenaza por remoción en masa, especialmente por caída de rocas y deslizamientos, para precisar las áreas que preliminarmente se definieron como susceptibles, en las que también debe restringirse la edificación.

De acuerdo con lo expuesto, se ratifica que el plan regulador comunal es un instrumento de prevención complementario a las normas de diseño sísmico y a los planes reguladores intercomunales –que también fijan “áreas de riesgo”– pues tiene la posibilidad de fijar normas urbanísticas a todos los usos de suelo y condiciones que contribuyan a la sustentabilidad, considerando las particularidades del territorio comunal y de su comunidad (Gobierno Regional Metropolitano de Santiago [GORE], 2021). En ese contexto, en la actualidad resulta indispensable establecer en los instrumentos de planificación territorial las normas urbanísticas y condiciones, que regulen los factores incidentes en la vulnerabilidad de las edificaciones, de acuerdo con el tipo y niveles de riesgo, especialmente cuando ese riesgo, en ciertas áreas, no es factible de mitigar, como el asociado a las fallas geológicas.

Por último, este estudio permitió detectar ciertas limitaciones de la normativa urbanística chilena, y plantear recomendaciones para superarlas. Entre los aspectos más importantes, se requiere con urgencia actualizar la LGUC, en armonía con lo previsto en la Ley N.º 21.364, incorporando las definiciones básicas relativas al riesgo; el rol de los IPT en la reducción del riesgo de desastres; y la relación entre los IPT y los otros instrumentos para la reducción del riesgo de desastres (González et al., 2020), explicitando que el “mapa de amenaza” a que se refiere esa ley es “vinculante” para la elaboración de los IPT.

Así también, se debería establecer la exigencia de que los profesionales especialistas, que elaboren tanto los estudios de riesgo o de amenaza de los IPT como los estudios fundados –que se acompañan a la solicitud de permisos de proyectos que se emplazan en áreas de riesgo–, cuenten con experiencia comprobada en el tipo de riesgos a que se refieren sus estudios, y se encuentren inscritos en un registro del Ministerio de Vivienda y Urbanismo para tales efectos.

Financiamiento

ANID/FONDECYT/ Regular 1230350

Conflicto de interés

Los autores no tienen conflictos de interés.

Declaración de autoría

Elena Pontigo-Arestizábal: Conceptualización, Investigación, Metodología, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Jorge Inzulza-Contardo: Recursos, Conceptualización, Supervisión, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Referencias bibliográficas

- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., & Kausel, E. (2010). The West Andean Thrust, the San Ramon Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29(2), TC2007, 1-34. <https://doi.org/10.1029/2008TC002427>
- Astorga-Gätgens, A. (2013). La definición de usos del suelo en las cercanías de fallas geológicas: explicación del Protocolo Técnico del Decreto Ejecutivo 32967 - MINAE, anexo 3. *Revista Geológica de América Central*, (49), 149-153. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=45437356013>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2016). *Perfil de Riesgo de Desastres Informe Nacional para Chile. División de Medio Ambiente, Desarrollo Rural y Gestión del Riesgo por Desastres*, <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Perfil-de-riesgo-de-desastres-Informe-nacional-para-Chile.pdf>
- Bolton, P. A., Heikkala, S., Greene, M., May, P., & Wolfe, M.R. (1986). Land Use Planning for Earthquake Hazard Mitigation: A Handbook for Planners. *Paper 82*. https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1081&context=fmhi_pub
- Cámara de Diputados. (2021). *Informe de la Comisión Especial Investigadora de los actos del Gobierno sobre permisos de construcción para instalar proyectos inmobiliarios y otras infraestructuras sobre la faja de ruptura superficial a lo largo de la falla geológica de San Ramón (CEI57)*. https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmID=63385&prmTipo=INFORME_COMISION
- Camargo, M., Guerrero, O., Guerrero, O., & Guerrero, O. (2020). Inserción del riesgo natural en la planificación territorial. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 13, 1-15. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cvu13.irnp>
- Consejo Nacional de Desarrollo Urbano. (2019). *Propuestas para el mejoramiento de las condiciones de resiliencia de las ciudades chilenas*. Documento aprobado por el CNDU en su XXI Sesión Plenaria. <https://cndu.gob.cl/download/propuestas-para-el-mejoramiento-de-las-condiciones-de-resiliencia-de-las-ciudades-chilenas/>
- Curihuinca, M. (2020). *Modos de habitar un escenario de riesgo sísmico. El caso de la falla San Ramón en el piedemonte de Santiago, Chile* [Tesis Magíster en Urbanismo, Facultad de Arquitectura, Universidad de Chile]. Repositorio institucional <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/178028>
- Chen, T. L., & Chang, H. S. (2018). The effects of zoning regulations along fault zone areas on land development and property values after the 921 Chi-Chi Earthquake in Taiwan. *Sustainability*, 10(4), 1175. <https://doi.org/10.3390/su10041175>
- Decreto N.º 47 de 1992. Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Promulgado el 16 de abril de 1992. Publicado en el Diario Oficial el 5 de junio de 1992.
- Decreto N.º 423 de 2003. Aprueba el Plan Regulador Comunal de Puente Alto. Municipalidad de Puente Alto. Promulgado el 03 de abril de 2003. Publicado en el Diario Oficial el 25 de abril de 2003.
- Decreto N.º 458 de 1976 [con fuerza de ley]. Ley General de Urbanismo y Construcciones. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Promulgado el 18 de diciembre de 1975. Publicado en el Diario Oficial el 13 de abril de 1976.
- Decreto N.º 4240 de 1968, Ley de Planificación Urbana. Asamblea Legislativa de Costa Rica. <https://www.ucr.ac.cr/medios/documentos/2015/LEY-4240.pdf>

- Easton, G. (5 de julio de 2023). Dr. Gabriel Easton expone sobre la Falla San Ramón en comisión investigadora del Congreso. *Noticias FCFM, Universidad de Chile*. <https://geologia.uchile.cl/noticias/206779/dr-easton-expone-sobre-la-falla-san-ramon-en-comision-del-congreso>
- Easton, G., Boroschek, R., Rebolledo, S., Inzulza, J., Ejsmentewicz, D., Vergara, P., & Giesen, E. (2022). *La Falla San Ramón y la sostenibilidad del piedemonte de Santiago: Recomendaciones para la política pública. Policy Brief*. Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/183864>
- Easton, G., Inzulza J., Pérez, S., Ejsmentewicz, D. y Jiménez, C. (2018). ¿Urbanización fallada? La Falla San Ramón como nuevo escenario de riesgos sísmico y la sostenibilidad de Santiago, Chile. *Revista de Urbanismo*, 38, 1-20. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2018.48216>
- Gobierno Regional Metropolitano de Santiago (4 de noviembre de 2021). *Gobernador Orrego: "Por solicitud del Gobierno Regional se inició modificación al PRMS por falla de San Ramón"* <https://www.gobiernosantiago.cl/gobernador-orrego-por-solicitud-del-gobierno-regional-se-inicio-modificacion-al-prms-por-falla-de-san-ramon/>
- González, L. E., Baeriswyl, S. y Zazo, A. (2020). Resiliencia urbana frente a inundaciones fluviales en Chile: experiencias de San Fernando y Los Ángeles. *Revista de Urbanismo*, 43, 131-150. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2020.57868>
- IDE Minvu (2022). *Área Urbana Consolidada*. [Conjunto de datos]. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. <https://www.ide.cl/index.php/planificacion-y-catastro/item/1845-area-urbana-consolidada>
- IDE Chile (2022). *DEM A los Palsar Región Metropolitana de Santiago* [Conjunto de datos]. Ministerio de Bienes Nacionales. <https://www.ide.cl/index.php/imagenes-y-mapas-base/item/1576-dem-alos-palsar-region-metropolitana-de-santiago>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2017). *Base de datos - Nivel de Manzana y entidades. Censo 2017*. [Conjunto de datos]. Autor. <http://www.censo2017.cl/microdatos/>
- Instituto Nacional de Normalización. (1996). *Diseño sísmico de edificios* (NCh433.Of1996). https://www.preventionweb.net/files/28726_normachilenadisenosismico.pdf
- Instituto Nacional de Normalización. (2003). *Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales* (NCh2369.Of2003). <https://www.ryv.cl/wp-content/uploads/2019/05/NCh2369-2003.pdf>
- Inzulza, J., Easton, G., Gatica, P. y Pérez, S. (2021). ¿Diseño Urbano Resiliente en el Piedemonte de Santiago? Contraste de Escenarios Comunes con Riesgo Sísmico frente a la Falla San Ramón. *Revista Urbana*, 24(43), 96-107. <https://doi.org/10.22320/07183607.2021.24.43.09>
- Inzulza J., Curihuinca, M., Easton, G. y Pérez, S. (2022). Revelando el riesgo sísmico en el piedemonte de Santiago, Chile. Análisis multicriterio para la determinación de vulnerabilidad en la Falla San Ramón (FSR). *Revista de Geografía Norte Grande*, (81), 305-330. <https://revistanortegrande.uc.cl/index.php/RGNG/article/view/22431>
- Kerr, J., Nathan S., Van Dissen, R., Webb, P., Brunson, D., & King, A. (2003). *Planning for Development of Land on or Close to Active Faults. A guideline to assist resource management planners in New Zealand*. Report prepared for the Ministry for the Environment. New Zealand.

- Konagai, K. (2003). An Assumed Scenario for Seismic Fault Zoning –Activities of JSCE/EqTAP Taskforce–. *Japan Society of Civil Engineers, Seismic Fault-induced Failures*, 2, 1-10.
- Laporte, M. (14 al 18 de noviembre de 2006). *Correlación entre las aceleraciones pico y pico efectiva y valores de PGV/PGA y PGA*PGD/PGV2 del banco de datos de movimientos fuertes de América Central*. IX Seminario Nacional de Geotecnia – IV Encuentro Centroamericano de Geotecnistas. San José, Costa Rica.
- Ley N.º 21.364 de 2021 que Establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, sustituye la Oficina Nacional de Emergencia por el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, y adecúa normas que indica. Promulgada el 27 de julio de 2021. Publicada en el Diario Oficial el 7 de agosto de 2021.
- Moris, R., Contrucci, P. y Ortega, A. (2017). El riesgo en la actualización post-desastre de instrumentos de planificación territorial comunales en Chile 2010–2014. *REDER*, 1(1), 85-100. <https://doi.org/10.55467/reder.v1i1.6>
- Orellana, R. (18 de enero de 2022). Cinturón de Fuego del Pacífico: cuna de terremotos y volcanes. *Revista Digitaltrends*. <https://es.digitaltrends.com/tendencias/cinturon-de-fuego-del-pacifico/>
- Pérez, N. (2016). *Peligro sísmico asociado a fallas corticales: caso de estudio Falla San Ramón (33.2°-33.7°S)* [Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile]. Repositorio institucional <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/15637>
- Resolución N.º 20 de 1994. Plan Regulador Metropolitano de Santiago. Gobierno Regional Metropolitano de Santiago. Promulgada el 6 de octubre de 1994. Publicada en el Diario Oficial el 4 de noviembre de 1994. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1011608>
- Resolución N.º 178 de 2018. Aprueba Metodología para elaboración de Plan de Continuidad Operacional. Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior de Chile.
- Resolución N.º 8.954, de 2013. Establece Norma Técnica NTM 003, sobre edificaciones estratégicas y de servicio comunitario. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- Resolution SB 520, 1972. Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act. California State Legislature <https://www.geoforward.com/alquist-priolo-earthquake-fault-zoning-act/>
- Red Sismológica Nacional. (2019). ¿Qué es una falla inversa? Universidad de Costa Rica. Recuperado el 25 de diciembre de 2022, en <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/geologia/5720-que-es-una-falla-inversa#:~:text=Las%20fallas%20inversas%20son%20fallas,un%20acortamiento%20de%20la%20corteza>
- Secretaría Técnica Nacional Ambiental. (2006). Procedimiento técnico para la introducción de la variable ambiental en los planes reguladores u otra planificación de uso de suelo. Norma 32967. Costa Rica.
- Secretaría Regional Ministerial Metropolitana de Vivienda y Urbanismo. (2012). *Riesgo y Modificación PRMS Falla San Ramón*. IDN.º 640-27-LP10 (Informe Etapa 3. Propuesta de disposiciones de carácter normativo regulatorias. Versión enero de 2012). Autor.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2022). *Guía de contenidos exigidos en estudios de peligro de remociones en masa evaluados por SERNAGEOMIN, en el contexto de permisos municipales*. Asistencia Técnica Geológica. <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2022/10/Guia-Usuario-ATG-OPM.pdf>