

LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LAS CIUDADES Y EL PLANEAMIENTO URBANO

(Patricio Tapia Gutiérrez, Depto. Ing Civil UCN)

I.- INTRODUCCIÓN

La sismicidad es una característica del planeta tierra que no se puede remediar, se tiene que vivir con ella, aceptarla como una realidad que supera por largo tiempo el andar del hombre en la tierra. Es precisamente este mismo personaje el que se ha encargado de construir un entorno vulnerable, ya que resulta extremadamente caro diseñarlo con vulnerabilidad nula. Sismicidad y vulnerabilidad van de la mano cuando se trata de evaluar el daño debido a la ocurrencia de terremotos. En todas las regiones del planeta, con menor o mayor grado, existe una sismicidad. En algunos casos ésta es tan alta que a no mediar el hecho que no existe un entorno vulnerable, las catástrofes serían de proporciones. Las ciudades, al ser vulnerables, cuando se encuentran en una región con alta sismicidad, pasan a ser un entorno con peligro sísmico. La lección es fácil, la sismicidad no puede ser controlada y a pesar de que mucho se ha avanzado en el estudio de esta materia, la ocurrencia de terremotos sigue siendo espacial y temporalmente no previsible en forma exacta, lo que obliga a que el enfoque de arquitectos e ingenieros apunte hacia el mejoramiento de la vulnerabilidad. En la mayoría de los casos, la disminución de la vulnerabilidad del entorno de ciudad no se logra incrementando fuertemente la resistencia estructural de las edificaciones, las líneas vitales o la infraestructura de transporte, sino que haciendo más coherente la concepción de todo aquello que con su accionar hace que la ciudad funcione y se desarrolle.

Los planteamientos antes descritos son perfectamente válidos para otros tipos de catástrofes, como aluviones, tsunamis o deslizamientos. Cada uno incrementa el riesgo de vivir en una ciudad vulnerable. Los estudios de vulnerabilidad en general entregan las herramientas básicas para preparar los planes de acción, que deben enfocarse hacia la mitigación aun cuando resulte más caro y requiera de mayor esfuerzo, tiempo y dedicación, de tal forma de romper los esquemas en una sociedad (compuesta por la población y los entes gubernamentales) para la cual es más cómodo actuar en la emergencia.

II.- SISMICIDAD E HISTORIA SISMICA

2.1.- Fuentes sísmicas

Desde la segunda mitad del siglo pasado se ha reconocido como principal fuente generadora de sismos a la tectónica de placas, que se puede visualizar pensando que la corteza del planeta no es continua y que se encuentra quebrada en varias partes. Como a su vez la corteza se encuentra sobre un estrato semi-líquido, el movimiento relativo de estas cáscaras se ve favorecido. Una vez que se vence la resistencia friccionante de las asperezas que durante algún tiempo impidieron el desplazamiento entre placas, se produce una liberación brusca de energía conocida como terremoto. La Zona Andina del continente sudamericano está dentro del cinturón del circunpacifico, que es reconocido mundialmente como la región sísmica más activa del planeta, ya que en ella ocurre el 85% de los terremotos.

Pero no es sólo la tectónica de placas la generadora de los grandes movimientos sísmicos, muchos de ellos también se producen por movimiento de fallas, siendo en otros países la mayor fuente generadora de sismos. Existen fallas a la vista y otras ocultas. Existen a su vez fallas activas y fallas inactivas y también existen fallas principales y secundarias. La peor combinación posible es una región que esté afecta a un fenómeno de subducción de placas y en ella se encuentren fallas principales o ramificaciones activas. La posible amplificación del movimiento superficial, que es el que finalmente interesa, puede resultar en una catástrofe de proporciones.

2.2.- Caracterización de los sismos

Siendo el parámetro más conocido, la magnitud por sí sola puede generar gran controversia en la caracterización de los sismos. Para representar las características y consecuencias de un movimiento sísmico por lo menos se debe hablar de magnitud, distancia epicentral y profundidad. Estos tres parámetros unidos a las condiciones de sitio (estudio geotécnico) explican el porque de los daños observados en los sismos y entregan las primeras herramientas para mitigar. Ya que las estructuras (fundamentalmente edificios) sufren los efectos del sismo en el sitio y no en su fuente, se hace necesario estudiar la respuesta del suelo de fundación, la que puede variar en función de la densidad, rigidez y

espesor de los estratos, de la presencia de estratos rocosos y agua y finalmente de singularidades que modifiquen la respuesta como pueden ser quebradas, taludes y otros accidentes topográficos.

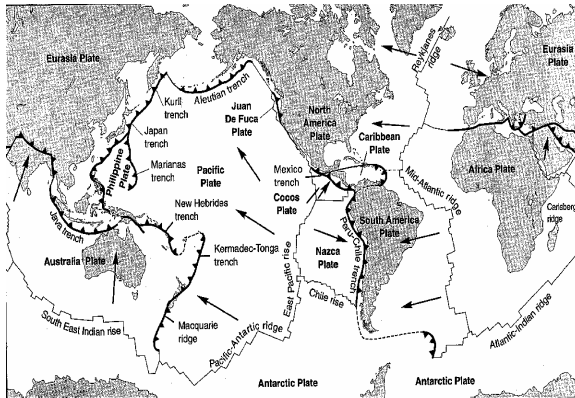


Fig.1.- Actividad de Placas Tectónicas

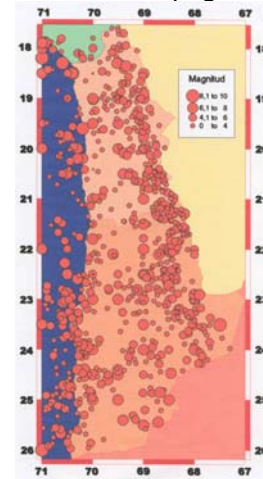


Fig.2.- Sismicidad Norte de Chile

2.3.- Condiciones de sitio

La respuesta en el sitio de análisis del movimiento del suelo se ve atenuada por la distancia epicentral. Factores ligados íntimamente a la estructura geomorfológica del suelo pueden producir amplificaciones puntuales de la aceleración, velocidad o desplazamiento y por ende una amplificación de la intensidad.

El daño final producido por un terremoto depende, como se dijo anteriormente, tanto de la vulnerabilidad de las estructuras como de la sismicidad de una región. Esta última debe resumirse en parámetros de movimiento del suelo, que es en definitiva el sostén de las estructuras. Obviamente la ubicación de estructuras vulnerables en un sitio sísmicamente peligroso, aumenta la probabilidad de daños de las estructuras. Es el caso de las viviendas alojadas en los cerros de ciudades costeras, correspondientes a asentamientos humanos que le han robado terreno al cerro y ante cada sismo sufren los embates de este por recuperar su espacio. Los sectores altos de las ciudades son sitios explotables desde el punto de vista arquitectónico debido a la belleza de su vista pero deben también responder a la condición ingenieril de sitios seguros. Los riesgos de deslizamiento pasan a un segundo plano cuando en la ciudad reina el miedo por los terremotos, tsunamis y aluviones, pero es un peligro latente que mucho tiene que ver con el crecimiento de las ciudades y la necesidad de terrenos para ocupación humana.

Por el lado costero aparece la otra variable de riesgo, que corresponde a la inundación por marejadas o tsunamis. Los terrenos de playa son muy apetecidos por el gran valor turístico que poseen y en estricto rigor debe ser un lugar de la comunidad. Pero en ciudades con pocas playas atractivas, la autoridad no tiene muchos argumentos para evitar la ocupación del borde costero. Pero el mar se encarga de recordar que esos terrenos son parte de su dominio y que su ocupación debe estar apoyado por estudios de vulnerabilidad. Afortunadamente en ciudades con una abrupta caída del continente mar adentro es poco probable la ocurrencia de tsunamis con enormes olas, pero si es factible la inundación por olas de baja altura pero de gran velocidad y energía. Conociendo esta características de los bordes costeros se pueden diseñar obras acordes con la realidad geomorfológica, que también se conjuguen con los intereses superiores de la ciudad. En el borde costero se debe proyectar pensando en que puede ocurrir un evento sísmico que provoque un tsunami. Y las soluciones no incrementan fuertemente el costo de los proyectos originales



Fig. 3.- Casas en taludes

III.- VULNERABILIDAD DE LA EDIFICACION

3.1.- Generalidades.-

La vulnerabilidad de las edificaciones depende de las características de los materiales que la componen y del sistema estructural como un ente global. Se reconocen materiales de buen comportamiento sísmico y estructuraciones que por su costo son ampliamente utilizados, presentando un comportamiento sísmico adecuado.

Pero estudios más profundos de los materiales corresponden a investigaciones recientes, producto de la aparición de nuevas tecnologías. El problema de las ciudades en cuanto a su vulnerabilidad no debe buscarse solamente en los componentes nuevos que van rellenando y desordenando el entorno urbano, cuando la planificación de la ciudad no ha sido la adecuada. La vulnerabilidad hay que buscarla también en la historia, porque además está decir que los materiales usados actualmente son mucho más adecuados, porque son el producto de la adopción de tecnologías nuevas y del aprendizaje de terremotos pasados. Pero las antiguas estructuras no presentan esta cualidad. Si bien es cierto pudieron haber sido influenciadas por agentes externos, estos no necesariamente obedecieron a una concepción sismoresistente del habitar en la ciudad. Y ahí están esas estructuras, generalmente en el centro de las ciudades, luchando por permanecer en un lugar que les es hostil, viendo crecer a la ciudad hacia arriba, aferrándose a un pasado que no las respalda, sin la suerte de otras, a lo mejor de similar calidad y antigüedad, y que por el hecho de ser patrimonio o monumento nacional, permanecen y seguirán permaneciendo en el lugar, con la misma o mayor vulnerabilidad de las menos favorecidas.

3.2.- Materiales y estructuraciones vulnerables

La ductilidad es un término poco conocido y esto se debe en gran medida a su gran variedad de definiciones. La más usada es aquella que la define como una razón entre la capacidad de deformación de ruptura del material y la deformación correspondiente al límite del comportamiento elástico. Todos los materiales tienen algún grado de ductilidad y en ingeniería sísmica se debe preferir aquellos que presentan un apreciable valor de este parámetro, ya que permite una mayor liberación de energía y por ende una mayor capacidad de deformación de los elementos. La capacidad de deformación sin romperse es una cualidad muy deseada en los materiales utilizados sísmicamente. De no poder proporcionar la suficiente ductilidad a una determinada estructura, debe pensarse en proporcionar una adecuada rigidez y resistencia, ya que si se dispone de materiales que no pueden incursionar en el rango plástico del comportamiento, debe evitarse que se superen los límites elásticos.

El usar materiales adecuados sísmicamente no garantiza que el todo estructural se comporte satisfactoriamente. La estructuración se refiere a la forma de disponer los elementos resistentes de tal forma que el conjunto funcione adecuadamente. La práctica chilena ha siempre preferido la estructuración en base a muros por sobre la de marcos, otorgando una excesiva, pero a su vez deseada rigidez lateral a los edificios. En realidad en la ingeniería sísmica se debe propender a estructuraciones más seguras y no a aquellas mejor calculadas. Una buena estructuración inicial redundará en que el trabajo posterior de detallamiento sea expedito y lógico.

Sin embargo un estudio de vulnerabilidad sísmica tomando en cuenta la estructuración en planta sería muy extenso. Por esta razón se debe optar por estudiar configuraciones estructurales más simples, utilizando los llamados "tipos estructurales". Los más comunes en Chile son los muros albañilería y los muros de hormigón armado. Se reconoce ampliamente las bondades de estos materiales cuando son ejecutados en forma correcta. De entre los dos el más dependiente de las condiciones locales es la albañilería. Es un material común que por su masificación presenta una vulnerabilidad que está íntimamente ligada al poco control en su ejecución. Esto involucra otra variable a considerar en el estudio de la vulnerabilidad. La calidad de la construcción puede incluso definirse como otro "tipo estructural", uno que posee la misma disposición de elementos pero tanto la calidad de sus materiales como la calidad de su ejecución se aleja de los valores y prácticas normales y constituyen un factor de riesgo que hay que considerar y cuantificar.

El gran problema de las ciudades de países en vías de desarrollo es la autoconstrucción, entendiéndose a ésta como la ejecución de obras en que no se usan los materiales adecuados y no se realiza un

adecuado control de los procesos constructivos. Este "tipo estructural" abunda en las poblaciones periféricas, especialmente en aquellas producto de ocupaciones ilegales y que han visto regularizada su situación solamente del punto de vista legal. Obviamente existe una limitante económica muy fuerte para solucionar el otro aspecto, que es el que interesa para el mejoramiento de vulnerabilidad.

La vulnerabilidad de un determinado tipo estructural se representa generalmente por curvas que reflejan el daño promedio probable esperado de acuerdo a la intensidad sísmica. Esta intensidad puede ser representada por un parámetro de uso masivo como es la Intensidad Modificada de Mercalli, o por un parámetro de movimiento del suelo como aceleración o velocidad máxima.

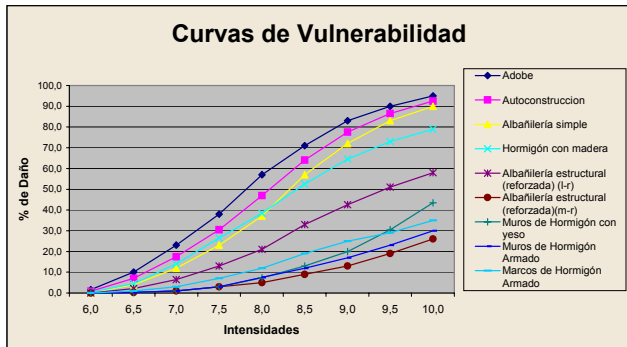


Fig. 4.- Curvas vulnerabilidad diferentes materiales



Fig. 5.- Hormigón y madera



Fig. 6.- Tipo estructural zona centro



Fig. 7.- Autoconstrucción

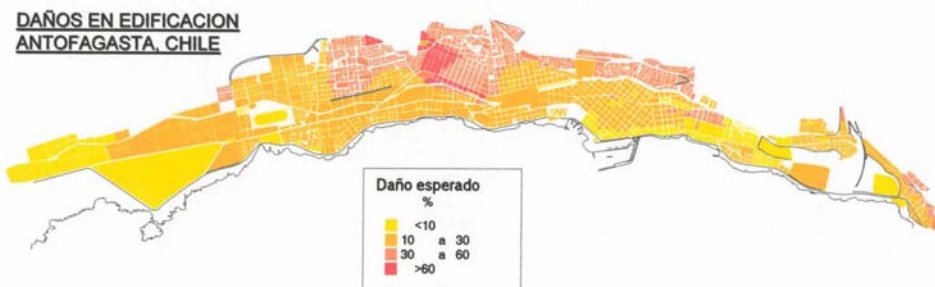


Fig. 8.- Daño esperado en la edificación

3.3.- Servicios esenciales.-

Dentro de la edificación no puede dejarse de lado a aquellas estructuras que por su función necesitan mayor atención. Son aquellas que en el instante de ocurrir las catástrofes pueden aglomerar a muchas personas (colegios) o pueden servir de albergues y de atención de urgencia (colegios y hospitales). También se incluyen los servicios de emergencia como bomberos y fuerza policial.

El estudio de estos servicios debe enfocarse principalmente al aspecto funcional. La correcta disposición de colegios en la ciudad junto con cuidar que su entorno tampoco sea vulnerable, contribuyen a que la funcionalidad de estos recintos sea un aporte y no otra preocupación en el caso de la ocurrencia de un evento sísmico.

Lo mismo puede decirse de los recintos hospitalarios, los cuales deben distribuirse en la ciudad de acuerdo a la población a atender, aunque esto muchas veces se resuelve por asuntos económicos y políticos. Los hospitales y clínicas deben proyectarse como tales, ya que es muy peligroso hacer adaptaciones de edificios que en el pasado cumplían con otra función.



Fig.9.- Jardín Infantil en zona de inundación

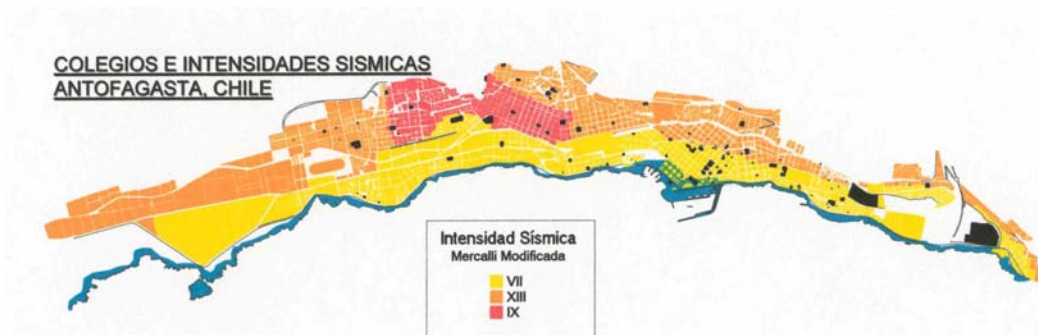


Fig.10.- Colegios de la ciudad

3.4.- Código sísmico y legislación

El código de diseño sísmico es la herramienta del ingeniero para simplificar el análisis de estructuras, basándose en disposiciones que intentan proporcionarles la suficiente resistencia, pero que no garantizan el buen comportamiento de éstas. Puede resultar contraproducente pero la realidad es así. El código entrega disposiciones en cuanto al uso de materiales y estructuraciones, pero el acatamiento de toda la normativa no garantiza que las estructuras tengan un comportamiento satisfactorio frente a la ocurrencia de un sismo. De hecho el código acepta que los edificios sufran daños, inclusive severos, siempre evitando el colapso estructural. Por esta razón la aparición de grietas en algunos elementos estructurales para sismos severos no debe extrañar, ya que la resistencia entregada a la estructura considera que éstas incursionan en un rango de deformación donde es esperable la ocurrencia del daño, y en algunos caso es bueno que así suceda, debido a la conveniente liberación de energía de deformación que las grietas desarrollan.

Los códigos sísmicos han ido evolucionando a medida que ocurren las catástrofes sísmicas. Cada nuevo terremoto, como laboratorio a escala natural, proporciona los parámetros necesarios de ajustes, que permiten mejorar la metodología de análisis y diseño. Pero los códigos sísmicos atacan el problema en forma muy puntual, ya que van directamente dirigidos a la estructura en particular. En aspectos tales como el uso de uno u otro material, o la construcción en determinado sitio, queda a la completa libertad de los diseñadores. Tal vez debiera ser así para generar esa necesaria diversidad de formas y creatividad para resolver los problemas de espacio.

Con el adecuamiento de las disposiciones surge la interrogante de que es lo que pasa con lo construido, y en el caso de la norma chilena (una de las más reconocidas en el concierto internacional) existe un caso preocupante, ya que entre la norma que funcionó hasta 1993 y la que actualmente es oficial existe una diferencia del 250% entre las solicitaciones de diseño para el tipo estructural más común en el país, la albañilería reforzada. Lo único que queda es esperar que la sobrerresistencia que siempre se les proporciona a los edificios sea suficiente para cubrir esa diferencia.

Ideal sería que el código sísmico (ampliado con conceptos de vulnerabilidad) formara parte de las herramientas de toma de decisiones de los organismos encargados de velar por la edificación en la ciudad. Es decir, a los planos reguladores y Ley General de Urbanismo, en el caso chileno, deberían agregarse aspectos de vulnerabilidad y seguridad sísmica. De hecho, el mismo código dentro de sus disposiciones especifica que debiera existir un comité que revisara los diseños sismoresistentes, pero al parecer no existen los medios para implementarlos. Incorporar la vulnerabilidad a los planos reguladores pasa porque se hagan estudio serios que influyan en una decisión tan importante como regular el uso de suelos en la ciudad. Pero debe hacerse, las zonas de riesgo, de la naturaleza que sean, deben ser consideradas en los planos reguladores y el código sísmico debe ser parte de las exigencias de las leyes de construcción.

IV.- VULNERABILIDAD DE LAS LINEAS VITALES E INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE

4.1.- El sistema sanitario

La función fundamental que cumple el sistema sanitario para una comunidad la convierten en un punto obligado de análisis, cuando se evalúa la vulnerabilidad de una ciudad. Las tuberías que conducen el agua potable, sin la cual una ciudad no puede subsistir, tiene que superar una serie de obstáculos, para llegar finalmente al hogar. De hecho el sistema que surte del vital elemento a la capital más importante del norte de Chile, debe atravesar más de 400 km. desde su captación hasta su almacenamiento y posterior distribución. El sistema de tratamiento del agua lamentablemente está ubicado sobre una de las fallas geológicas más importantes de sudamérica.

Los imponentes estanques, que más de alguna preocupación han causado a los habitantes aledaños a su ubicación, tienen la función de distribuir el agua de la manera más simple y barata posible. La conducción final obedece a una red de tuberías con distintas datas de colocación y por ende de diferentes calidades de materiales y grados de mantención. Por pertenecer al subsuelo, no quedan exentas del movimiento superficial que generan los terremotos. Los lugares más vulnerables, en todo caso, son precisamente aquellos que no dependen ni forman parte del sistema sanitario mismo. Corresponden a los sistemas de conducción que no están enterrados y se desarrollan por las laderas de los cerros. Expuestos a rodados y deslizamiento pueden colapsar, generando un efecto secundario como lo son los aluviones artificiales.

El planeamiento urbano debe velar por disponer de la protección necesaria a los asentamiento humanos inmediatamente debajo de los sistemas de conducción superficial de agua potable. Como solucionar esto en ciudades costeras, que se encuentran encerradas por el mar por un lado (punto más bajo) y por la cordillera por el otro (punto más alto), es una situación digna de estudiar y resolver.

4.2.- El sistema eléctrico y de telecomunicaciones.-

Al igual que el sistema sanitario, el sistema de conducción eléctrico es vulnerable, por su necesaria vinculación con el suelo. Las líneas de postación, que proporcionan una no muy agradable estética a la ciudad, también representan un riesgo agregado debido a lo peligroso que resulta la caída de cables en el caso de producirse un evento sísmico. Aunque resulte caro como inversión inicial, el cableado

subterráneo se hace imperiosamente necesario para descongestionar espacialmente a la ciudad y de paso solucionar uno de los grandes temores de los peatones

El sistema de telecomunicaciones, por su carácter en algunos casos virtual, puede pasar inadvertido como un ente físico importante de la vida de una ciudad. Sin embargo basta recordar que los sistemas de transmisión necesitan de puntos altos estratégicos para la instalación de sus equipos, para darse cuenta que el progreso telecomunicacional deja de lado el concepto de armonía urbana y se transforma en una ocupación peligrosa.

La telefonía ha cambiado el aspecto de las calles, porque ahora las personas pueden ser localizadas en pleno centro de la ciudad y la calle se ha transformado en un lugar de comunicación (a distancia).

4.3.- La infraestructura de Transporte

Las vías de las ciudades no están ajenas a sufrir daños debido a terremotos. Las ciudades costeras, con largas avenidas longitudinales que concentran el flujo en esa dirección, en los sectores altos de la ciudad deben convivir con pronunciados taludes, que reclaman su espacio perdido. Lugares donde los terraplenes resultan en algunos casos invitados temporales, dispuestos a partir cuando las condiciones de estabilidad natural así lo requieran.

La congestión por sí sola puede ser una catástrofe para ciudades que crecen rápidamente y sus calles no están preparadas para el nuevo flujo. Frente a esto un terremoto no hace más que confirmar la inadecuada distribución de flujos, la saturación vehicular de los centros de estas ciudades y su semaforodependencia.

Las ciudades costeras también presentan el problema de que la mayoría de los accesos corresponden a cursos de antiguos ríos y por lo tanto son quebradas que ajenas están del hecho que al final de ellas se encuentra una ciudad, la que es alimentada por lo que sus accesos le proveen. La vulnerabilidad de los accesos está ligada a derrumbes e interacción con otra infraestructura, como aducciones por ejemplo, lo que demuestra que la vulnerabilidad de una ciudad es un complejo problema, con una gran número de variables que relacionar.

Los otros medios de transporte como ferrocarril y puerto no están ajenos al daño producto de un terremoto. Debido a su importancia estratégica para una región minera, la combinación ferrocarril y puerto debe ser estudiada cuidadosamente desde el punto de vista de la vulnerabilidad. El daño físico, que puede ser menor, no se compara con el daño funcional y económico que una falla de cualquiera de ellos puede producir.

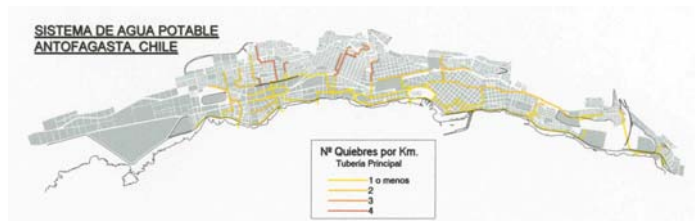


Fig.11.- Vulnerabilidad del sistema de agua potable

V.- CONCLUSIONES

En ciudades y regiones como aquellas de la zona andina la vulnerabilidad sísmica debe ser considerada en el planeamiento urbano. Los organismos encargados de la construcción en la ciudad deben poseer las herramientas adecuadas para asegurar que el crecimiento de las ciudades no represente un riesgo adicional al ya existente debido a la historia constructiva y la ocupación irresponsable. Los estudios de vulnerabilidad, como el establecimiento de zonas de riesgo de daño potencial tanto para las estructuras (edificaciones), como para las líneas vitales de la ciudad, proporcionan una primera herramienta para planificar y su influencia en planos reguladores puede entregar los lineamientos necesarios para el ordenamiento urbano.