



Gestión del Riesgo

Manizales - Colombia

Contrato interadministrativo No. 179-2012
***“Aunar Esfuerzos Para Mejorar La Gestión Del Riesgo Mediante El
Conocimiento Y El Desarrollo De Sistemas De Información En El Municipio
De Manizales”***

Informe Final

DICIEMBRE 2014



**AUNAR ESFUERZOS PARA MEJORAR LA GESTIÓN DEL RIESGO MEDIANTE EL
CONOCIMIENTO Y EL DESARROLLO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN EN EL
MUNICIPIO DE MANIZALES, CONTRATO INTERADMINISTRATIVO NO.
179/2012**

**ORDEN CONTRACTUAL MENOR DE CONSULTORÍA PARA REALIZAR LA REVISIÓN TÉCNICA Y
EMITIR CONCEPTO SOBRE LA MODELACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA CONSIDERANDO LOS
EFECTOS DE SITIO PARA LA ARMONIZACIÓN DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA CON LAS
NORMAS NSR-10 – CON 26-2014**

INFORME FINAL

MARIO GUSTAVO ORDAZ SCHROEDER

**Director: Omar Darío Cardona Arboleda
Coordinación: María del Pilar Pérez
Dora Catalina Suárez Olave**

**INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES**

**MANIZALES
DICIEMBRE 2014**

INTRODUCCIÓN

El presente documento es un informe sucinto de las actividades de revisión y asesoría llevadas a cabo por el autor en el marco del proyecto “Aunar esfuerzos para mejorar la gestión del riesgo mediante el conocimiento y el desarrollo de sistemas de información en el municipio de Manizales”, en lo referente a la actividad técnica “Armonización de la microzonificación sísmica con las normas NSR-10 e implicaciones económicas y de seguros”.

En particular, se detallan las actividades de revisión y asesoría realizadas en los siguientes tres aspectos:

- Cálculo de espectros de amenaza uniforme para diferentes periodos de retorno en roca.
- Cálculo de las funciones de transferencia para la consideración de los efectos de sitio en las zonas de suelo homogéneo identificadas; revisión de los parámetros FA Y FV.
- Modelación del riesgo sísmico que utiliza el Sistema R™ y definición de estrategias de aseguramiento del conjunto de edificaciones públicas y privadas de Manizales.

Finalmente, se detallan otras actividades de asesoría llevadas a cabo en el contexto del proyecto.

1. REVISIÓN DEL CÁLCULO DE ESPECTROS DE AMENAZA UNIFORME PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO EN ROCA REALIZADO PREVIAMENTE PARA MANIZALES

Esta actividad consistió principalmente en asesorar el desarrollo y revisar los resultados del estudio de reevaluación de la amenaza sísmica para Manizales, cuya ejecución obedece a las siguientes razones:

- La necesidad de contar con un estudio de microzonificación sísmica armonizado a la normativa nacional, de manera que su utilización sea directa dentro de lo estipulado en la Norma Colombiana NSR 10.
- La existencia de un mayor número de registros acelerográficos a nivel nacional, a partir de los cuales es posible definir un modelo de atenuación de movimiento fuerte para ser aplicado en la evaluación de la amenaza.
- La oportunidad de aplicar una metodología novedosa que permite calcular la respuesta dinámica del suelo en cualquier punto dentro de la ciudad, y consecuentemente realizar cálculos de amenaza sísmica a nivel de superficie.
- Mayor experiencia y sensibilidad sobre la utilización de los espectros de diseño.

A este respecto, hago notar lo siguiente:

Se trata de un estudio adecuadamente realizado, siguiendo normas y métodos congruentes con el estado del arte en esta materia. El software empleado para los cálculos es adecuado, puesto que se trata de un programa (CRISIS) conocido en el medio y utilizado por numerosos grupos en el mundo.

El estudio inicia tomando como base estudios anteriores llevados a cabo por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) y el proyecto GSHAPE. Sin embargo, el antecedente más directo de este estudio es el más recientemente llevado a cabo por la AIS, en 2009-2010.

Se utiliza el catálogo del Servicio Geológico Colombiano (SGC, antes INGEOMINAS), complementados con los catálogos del United States Geological Survey (USGES) y el

Global Earthquake Model (GEM). Este último, desarrollado muy recientemente, es quizá el catálogo de mayor calidad producido para eventos grandes en el mundo. Adicionalmente, el catálogo de fallas con actividad comprobada, utilizado en el desarrollo del modelo sismotectónico que se presenta, proviene también del SGC, y es el conjunto de fallas activas de mayor calidad producido para el país.

En este estudio se han utilizado relaciones de atenuación nuevas, que fueron creadas *ex profeso* como resultado de los trabajos de otro componente de este proyecto, por lo que este revisor se referirá a ellas más adelante. Se trata de relaciones de atenuación construidas utilizando un procedimiento novedoso y que, en términos generales, y a reserva de discutir algunos aspectos técnicos al respecto, pueden considerarse más apropiadas que las que se han utilizado en estudios anteriores. En virtud de las reglas consignadas en la NSR 10, es necesario incluir en los estudios de amenaza el cálculo de frecuencias de excedencia de valores de la velocidad máxima del terreno. Las relaciones de atenuación utilizadas son apropiadas para esto, por lo que el cálculo de las frecuencias de excedencia mencionadas ha sido llevado a cabo con éxito.

Los resultados del estudio de amenaza para Manizales cumplen, a mi juicio, con el espíritu de lo señalado por las Normas Colombianas. Su presentación es adecuada, coherente con lo que se acostumbra a nivel mundial, y de buena calidad. Destaca en particular el esfuerzo que se ha hecho para presentar los resultados de este proyecto -y de otro similar, al que me referiré más adelante- en una aplicación Web orientada a hacer posible la consulta general -la socialización- de estos resultados. Hasta donde alcanza el conocimiento de este revisor, esta es la primera vez que en América Latina se utiliza esta magnífica forma de comunicación -una aplicación Web- para que una autoridad de a conocer resultados oficiales de amenaza sísmica; los ejecutores del proyecto merecen una felicitación por esta primicia.

Además de las actividades de revisión y asesoría a las que me he referido en el párrafo anterior, llevé a cabo las siguientes actividades adicionales, todas ellas relacionadas con los cálculos de amenaza sísmica:

- Capacitación en el uso del programa CRISIS para el cálculo de amenaza sísmica; asesoría en las mejores alternativas para su utilización.
- Asesoría en la aplicación del programa CRISIS en un estudio para la cuenca del río Chinchiná, asociado al POMCA de dicho río.
- Asesoría y elaboración de recomendaciones para los criterios de diseño por sismo de estructuras en el Aeropuerto del Café.
- Asesoría y elaboración de recomendaciones para el estudio de amenaza sísmica de Colombia.

- Asesoría y elaboración de recomendaciones para la Norma Colombiana de Diseño de Puentes, específicamente en lo relacionado con el estudio de peligro sísmico a nivel nacional. Para divulgar los resultados de este proyecto, sus ejecutores han desarrollado también una novedosa herramienta Web.

2. REVISIÓN DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA LA CONSIDERACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO EN LAS ZONAS DE SUELO HOMOGÉNEO IDENTIFICADAS Y REVISIÓN DE LOS PARÁMETROS FA Y FV

Este componente tuvo los siguientes objetivos:

1. Construir nuevas ecuaciones de atenuación para su aplicación en evaluación de amenaza sísmica
2. Construir un modelo geotécnico para la ciudad de Manizales, con fines de respuesta dinámica
3. Evaluar la respuesta dinámica del suelo en múltiples ubicaciones dentro de la ciudad
4. Calcular las funciones de transferencia del espectro de Fourier en múltiples ubicaciones dentro de la ciudad
5. Calcular la amenaza sísmica a nivel de superficie en toda la ciudad
6. Armonizar la amenaza a las formas espectrales dadas en la NSR 10

Revisaremos a continuación cada uno de ellos, cuyo desarrollo fui asesorando y revisando.

1. Nuevas ecuaciones de atenuación

Se trata de nuevas relaciones de atenuación construidas a partir de relaciones de atenuación para el espectro de amplitudes de Fourier, posteriormente convertidas a ordenadas del espectro de respuesta utilizando teoría de vibraciones aleatorias. En términos generales, esto tiene la ventaja de producir leyes de atenuación cualitativamente correctas, puesto que los modelos paramétricos del espectro de Fourier tienen bases físicas. Este enfoque ha sido usado con éxito en la ingeniería sismológica desde finales del siglo pasado, y en Colombia se uso, por primera vez a juicio de este revisor, en 2000.

Las relaciones de atenuación planteadas de esta manera tienen, de entrada, un cierto número de parámetros libres que deben ser determinados de tal manera que se minimicen ciertas medidas del error entre las ordenadas predichas por la relación de atenuación y las ordenadas determinadas a partir de registros acelerométricos obtenidos en Colombia.

Se trata, en esencia, de un problema de minimización, que fue resuelto en este caso de manera muy original: mediante el uso de algoritmos genéticos. Este procedimiento, que se describe profusamente en el informe correspondiente, consiste en establecer ciertas analogías entre el proceso de minimización, al genética y la selección natural, entendida como la satisfacción de cierta función objetivo, que en nuestro caso consiste en minimizar, digamos, el error estándar.

En el proceso de determinación de parámetros se emplearon 206 acelerogramas, 87 asociados a 22 temblores corticales y 119 asociados a 15 terremotos de subducción. No es una base de datos muy grande, por lo que los resultados podrían resultar debatibles, pero es la base de datos con que se cuenta en Colombia. A pesar de ello, los resultados obtenidos son satisfactorios; las nuevas relaciones de atenuación son adecuadas para su uso en la evaluación de amenaza.

2. Modelo geotécnico

Se desarrolla un modelo geotécnico de la ciudad de Manizales, adecuado para la medición de efectos de sitio, utilizando información que proviene de diferentes fuentes: la geología superficial, 23 perforaciones exploratorias y algunas secciones geológicas de mayor profundidad.

El método de análisis está basado en la generación de estratigrafías sintéticas a partir de la información geológica y geotécnica más algunas suposiciones sobre la variación geoestadística (o geo-estocástica) de algunas propiedades del suelo tanto en lo horizontal como en función de la profundidad.

Se utilizan modelos no lineales de la degradación del módulo de rigidez de los suelos obtenidos de la literatura.

El procedimiento usado permite, en principio, tener perfiles estratigráficos sintéticos - probabilistas- para cualquier punto de la ciudad de Manizales; en la práctica, se generó una malla de 50 x 50 nodos, que incluye 20 estratigrafías sintéticas por nodo. Los efectos de amplificación de estos perfiles se calculan como se señala en el inciso siguiente.

3. Respuesta dinámica

El cálculo de la respuesta dinámica se hace suponiendo propagación vertical de ondas SH, incluyendo efectos no lineales con el llamado método no lineal equivalente o SHAKE. Se utilizan como movimientos de entrada acelerogramas representativos de los producidos por eventos corticales y por eventos de subducción.

4. Funciones de transferencia

Se determinan funciones de transferencia (en el dominio del espectro de Fourier) para distintos niveles de intensidad del sismo de entrada. Esto es correcto, puesto que las funciones de transferencia serán usadas en cálculos de amenaza sísmica probabilista, que implica evaluar la respuesta ante eventos de entrada con intensidades pequeñas y grandes.

5. Amenaza en la ciudad a nivel de superficie

Para llevar a cabo estos cálculos, se determinan, a partir de las relaciones de atenuación en roca (para el espectro de Fourier), y las funciones de transferencia obtenidas para cada nodo de la malla geotécnica, relaciones de atenuación para el espectro de Fourier en suelo y, posteriormente, relaciones de atenuación para el espectro de respuesta. Estas leyes de atenuación (muchas de ellas) se introducen al programa CRISIS para evaluar la amenaza sísmica a nivel de superficie, incluyendo los efectos de amplificación local, para así obtener espectros de peligro uniforme.

6. Armonización

Los espectros de peligro uniforme obtenidos en el punto anterior son la base para fijar, en armonía con la NSR 10, espectros de diseño. Para ellos, se emplea un procedimiento mediante el cual se ajusta una forma espectral paramétrica (5 parámetros) al espectro de amenaza uniforme calculado en cada sitio. Para garantizar un buen ajuste se minimizan ciertas características clave de los espectros.

A juicio de este revisor, el componente cumple adecuadamente con los objetivos que se planteó. Por una parte, se utiliza una buena mezcla de técnicas convencionales y técnicas novedosas que, aun teniendo ciertos aspectos debatibles, constituye un avance significativo con respecto a los métodos utilizados anteriormente. Por otro lado, el

método empleado y el software desarrollado sientan las bases para una relativamente fácil actualización del estudio, por parte del actual grupo ejecutor o por parte de otro grupo que estudie el problema en el futuro. Adicionalmente, el nuevo modelo geotécnico y de amplificación dinámica de suelos podría sustituir al actualmente incluido en el SISMan LISA.

3. ASESORAR EN LA MODELACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO QUE UTILIZA EL SISTEMA R, QUE PERMITE DEFINIR ESTRATEGIAS DE ASEGURAMIENTO DEL CONJUNTO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS Y PRIVADAS DE MANIZALES

En este inciso se describen las actividades de asesoría y revisión llevadas a cabo en relación con la evaluación del riesgo de las edificaciones de Manizales y las operaciones de transferencia de este riesgo. Se separan las actividades en los dos grandes temas que fueron objeto de asesoría en este componente.

1. Funciones de vulnerabilidad para las clases estructurales representativas de Manizales

El objetivo de este componente fue la identificación y categorización de las clases estructurales representativas existentes en Manizales, a la vez que la identificación de características asociadas a la vulnerabilidad sísmica de cada una de las clases estructurales representativas. En adición se planteaba determinar funciones de vulnerabilidad, en términos de aceleración espectral, para cada una de las clases estructurales representativas.

Los trabajos empiezan con la revisión de estudios anteriores, llevados a cabo desde 2004, basados en catastro e inspecciones. A partir de estos trabajos y la base de datos creada para efectos del presente proyecto, se identifican 12 clases estructurales que caracterizan la edificación de la ciudad. Destaca el sistema estructural "Muros de mampostería semiconfinada" que contiene a más de la tercera parte de las edificaciones de Manizales.

Se procede después a determinar la vulnerabilidad sísmica de cada una de esas clases. Como se sabe, determinar la vulnerabilidad de una estructura consiste en establecer relaciones probabilistas entre la intensidad local del sismo y los daños que experimentaría la estructura. Esta es la definición que se usa en el informe motivo de revisión, que es coherente con el estado del arte en esta materia.

Para determinar la vulnerabilidad de las 12 clases se utiliza un método basado en la estimación de demandas de deformación inelástica; se trata de un método avanzado. Se presentan parámetros que permiten definir la vulnerabilidad en términos del valor esperado y la varianza del daño, condicionados a un cierto valor de intensidad sísmica. Esta manera de definir la vulnerabilidad es adecuada y coherente con el estado del arte, como también lo son, a mi juicio, los valores de los parámetros obtenidos.

Finalmente, se presenta información muy útil, rara vez presentada explícitamente en informes, que consiste en el algoritmo exacto que se usó para clasificar cada estructura de la base de datos en alguna de las 12 clases estructurales identificadas. El algoritmo es razonable y se agradece que se haya hecho explícito, porque esto puede servir para orientar futuros trabajos en esta dirección.

2. Evaluación del riesgo de Manizales con fines de seguros y protección financiera de inmuebles públicos y privados. Utilización del Sistema R

Este componente consta de dos actividades principales. La primera consiste en una revisión bibliográfica, conceptual, de las operaciones de transferencia de riesgo. Se examina, por ejemplo, de dónde surge la necesidad de transferir el riesgo, qué tipo de instrumentos existen para ello y qué instrumentos se han usado en el pasado en otros países. El informe termina con recomendaciones generales, no específicas para la ciudad de Manizales, sobre cómo políticas de protección financiera. Se trata de un informe más bien doctrinario, que contiene, en términos generales, información del dominio público.

La segunda actividad de este componente, que este revisor considera la más importante, consiste en la evaluación del riesgo sísmico que enfrentan las edificaciones de Manizales. Esto se hace integrando los resultados de muchos de los componentes de este proyecto, algunos de los cuales fueron motivo de mis actividades de asesoría y algunos no, por lo que no se habla de ellos en este informe.

Se empieza describiendo el esquema actual de aseguramiento de los inmuebles de la ciudad de Manizales y algunos de los cálculos que se utilizaron en su diseño. A continuación, se detalla la metodología usada en los nuevos cálculos de riesgo sísmico, efectuados en esta ocasión con el Sistema R desarrollado por la empresa ERN. Conviene señalar que parte de mis actividades de asesoría en este componente fueron contribuir a capacitar a los ejecutores del proyecto en el uso del Sistema R y en la interpretación de sus resultados, así como en la manera de introducir a dicho sistema las funciones de vulnerabilidad desarrolladas en este proyecto.

El informe está bien presentado y su redacción indica, con contadas excepciones, que los ejecutores del proyecto comprenden bien los detalles del complejo proceso de la estimación moderna de pérdidas por sismo.

Enseguida, se hace un análisis de los posibles mecanismos de aseguramiento, enfocado, al parecer, a convencer a las empresas aseguradoras nacionales de que es conveniente participar en el aseguramiento de la ciudad.

Más adelante se presenta una muy completa descripción cuantitativa de los resultados obtenidos del análisis de riesgo de los inmuebles de Manizales, públicos y privados por separado. Sin lugar a dudas, estos resultados, junto con los de concentración de riesgo – también presentados- serán muy útiles para entender bien el riesgo y estar en capacidad de hacer un diseño correcto de los instrumentos de transferencia de riesgo.

Los resultados de riesgo se presentan desagregados por categoría socioeconómica (“estrato”), tanto en términos absolutos como en términos relativos, por sistema estructural y por uso. Se presentan también mapas con la distribución geográfica de algunas medidas de riesgo.

Se examina, por otra parte, la influencia del deducible en algunas de las medidas clásicas de riesgo y se hace ver, de manera no muy convincente, que el riesgo sísmico de la ciudad ha bajado en la última década.

Se analiza el riesgo corrido por los inmuebles exentos y se estudian posibles esquemas de compensación de primas, en que, en diferentes medidas, algunos ciudadanos subsidian la prima de los exentos.

Finalmente, se estudian los posibles soportes técnicos, legales y operativos de un futuro esquema de aseguramiento, y se hacen recomendaciones al respecto. Se incluye, como Anexo del informe, un documento sumamente útil con una descripción técnica, muy detallada, del proceso general de estimación de pérdidas por sismo.

En términos generales, me parece que los informes, bases de datos y software que han resultado de este componente están hechos con alta calidad y que son congruentes con los estándares que se usan en estudios parecidos en otros países. En particular, me parece que los resultados de riesgo, obtenidos en general y después con desagregaciones minuciosas, son un resultado importantísimo sin el cual fracasaría cualquier intento de diseñar un buen instrumento de transferencia de riesgo para la ciudad. A mi juicio, estos resultados marcan un estándar que otros proyectos futuros similares en Colombia deberían, al menos, igualar.

4. OTRAS ASESORÍAS Y REVISIONES

En adición a lo señalado en los capítulos anteriores, participé también asesorando en las actividades de cálculo de riesgo sísmico de Manizales utilizando CAPRA, tanto en lo referente a edificaciones como en lo que respecta a líneas vitales para Aguas de Manizales.

Participé, además, contribuyendo en la capacitación de personal sobre el uso del sistema CAPRA y la interpretación de sus resultados.