

VISION INTEGRAL DE LOS ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO

Luis E. Yamin¹, Camilo Phillips², Santiago Arámbula³ y Omar D. Cardona⁴

RESUMEN

El artículo presenta un resumen de las actividades que se llevan a cabo en los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo para centros urbanos. Se presenta una metodología de análisis con especial énfasis en la integración de los modelos analíticos desde el reconocimiento geológico y neotectónico básico hasta la evaluación final del riesgo y sus aplicaciones. Se describen los métodos analíticos y experimentales utilizados para el estudio de actividades tales como la evaluación de la amenaza sísmica; estudios sismogeotécnicos y caracterización de las propiedades estáticas y dinámicas de los suelos; estudios de la respuesta sísmica de los diferentes depósitos de suelo; elaboración de los mapas de microzonificación sísmica; estudios de vulnerabilidad sísmica de las construcciones; estimación del riesgo en términos de parámetros tales como daños y pérdidas económicas, afectaciones personales y parámetros para la retención o transferencia del riesgo; elaboración de un sistema integrado de información geográfica para visualización y análisis de los resultados de amenaza, vulnerabilidad y riesgo; diseño y puesta en marcha de redes acelerográficas a bajo costo y aplicaciones en la prevención, preparación y planes de atención de emergencias en caso de desastre. Especial énfasis se da a la integración horizontal de los diferentes modelos analíticos en las diferentes disciplinas involucradas en un análisis general de riesgo y en las capacidades y potenciales de aplicaciones futuras en los procesos generales de gestión del riesgo a nivel de centros poblados. La presentación se enfoca hacia el caso de aplicación en algunos municipios del Departamento del Valle del Cauca.

Gestión general del riesgo sísmico en el Valle del Cauca

Una de las actividades principales de las Corporaciones Regionales al igual que de las Alcaldías de los Municipios de Colombia se centra en el fortalecimiento de la capacidad de gestión general del riesgo en todas sus modalidades y ámbitos, incluyendo la intervención de la vulnerabilidad, los programas de prevención y los planes de atención y preparación para los desastres. Para lograr este propósito resulta fundamental identificar y reconocer el riesgo existente y las posibilidades de generación de nuevos riesgos desde la perspectiva de los desastres naturales. Esto implica dimensionar o medir el riesgo con el fin de determinar la efectividad y eficiencia de las medidas de intervención sean estas tanto correctivas como prospectivas.

La evaluación y seguimiento del riesgo es un paso ineludible para su reconocimiento por parte de los diversos actores sociales y los órganos de decisión responsables de la gestión. Es decir, es necesario hacer manifiesto el riesgo, socializarlo e identificar sus causas. En consecuencia, dicha evaluación y seguimiento debe realizarse utilizando herramientas apropiadas e idóneas que faciliten la comprensión del problema y orienten la toma de decisiones.

Dentro de las amenazas naturales más importantes en la zona andina de Colombia se pueden mencionar la amenaza sísmica y todos sus efectos complementarios (licuefacción, deslizamientos de taludes, fallamientos superficiales, tsunamis, etc), la amenaza volcánica, los huracanes y vientos fuertes, las avalanchas, las inundaciones, las sequías, el granizo, las descargas eléctricas, los incendios y otros. De estas amenazas, la que más impacto puede llegar a causar en un sitio determinado es la sísmica por su gran potencialidad de daño extendido en zonas geográficas grandes.

¹ Profesor Asociado de Ingeniería Civil y Ambiental, Director del centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico- CITEC, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
Dirección: Carrera 65B No. 17A-11
Teléfono: 339 4949 - 405 5810 Ext. 5000
e-mail: lyamin@uniandes.edu.co

²Ingeniero Investigador, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, e-mail: c-philli@uniandes.edu.co

³Ingeniero Investigador, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, e-mail: sarambul@uniandes.edu.co

⁴Ingeniero Asesor, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, e-mail: ocardona@uniandes.edu.co

Para alcanzar los anteriores objetivos generales se hace indispensable contar con la información técnica que permita estimar la amenaza sísmica en la zona de estudio. Simultáneamente se deben desarrollar estudios de vulnerabilidad de la infraestructura expuesta con base en lo cual se puedan establecer escenarios de riesgo específicos. A continuación se presenta la aplicación de los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo para el caso de tres municipios del Valle del Cauca: Palmira, Tulúa y Buga.



Foto aérea Palmira



Foto aérea Tulua



Foto aérea Buga

Antecedentes: amenaza y riesgo sísmico en el Valle del Cauca

La zona sur occidental del país se ha visto sometida en los últimos años a una serie de eventos sísmicos de alta capacidad destructiva con graves afectaciones a la población y a la infraestructura de la región.

Es así como los eventos ocurridos el 9 de julio de 1766 (evento con epicentro en Guacarí que destruyó las principales iglesias y buena parte de las edificaciones de Buga y daños graves en Palmira, Tulúa y Cali), el 16 de noviembre de 1827 (con gran afectación a toda la región y ocurrencia de deslizamientos y represamiento de ríos), el 31 de enero de 1906 (con efectos importantes en la costa Pacífica principalmente), el 7 de junio de 1925 (con afectaciones a Buga y Cali principalmente) y muchos otros de menor intensidad (más de 70 eventos con algún tipo de afectación a la zona del Valle del Cauca y cerca de 15 eventos con intensidades MSK entre VII y X en los últimos 400 años) demuestran que el Departamento del Valle del Cauca se encuentra ubicado en una zona de alta amenaza sísmica y por lo tanto los planes de desarrollo futuro del mismo deben considerar de manera prioritaria el riesgo sísmico.

En los años recientes se presentaron dos sismos que por sus características se convierten en sismos de referencia que podrían llegar a ocurrir en circunstancias que generarían un alto impacto en varios municipios del Valle del Cauca:

* El sismo del 25 de enero de 1999 con magnitud de 6.2 grados en la escala de Richter, causando la muerte de centenares de personas y daños graves en las ciudades de Armenia y Pereira, al igual que en varios municipios cercanos incluidas las poblaciones del Norte del Valle del Cauca. Este evento generó pérdidas del orden de \$ 2.4 billones de pesos (US \$ 1.600 millones).

* El sismo ocurrido el día 15 de Noviembre de 2005 con magnitud 7.2 (Mw) en la zona de Pizarro en la costa Pacífica Colombiana, a unos 180 km de distancia de la ciudad de Cali, con graves efectos en una serie de edificaciones de esta ciudad. Se reportaron cerca de 4000 damnificados y pérdidas económicas del orden de \$ 2 millones de dólares.



Armenia, Sísimo Armenia 1999



Cali, Sísimo Pizarro 2004



Popayán, Sísimo Popayán 1983

Amenaza sísmica en Palmira, Tuluá y Buga

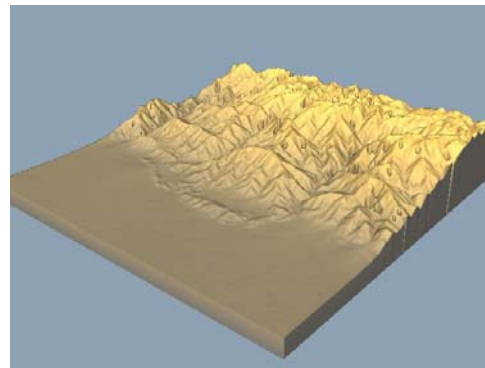
Los estudios de microzonificación sísmica evalúan desde el punto de vista técnico y científico la amenaza sísmica en las áreas urbanas de los municipios estudiados. Mediante modelos probabilísticos se integra la amenaza generada por cada una de las fuentes sismogénicas identificadas a nivel regional y se definen las leyes de atenuación para diversos tipos de fuentes sismológicas. Por otro lado se estudian las propiedades dinámicas no lineales de los suelos característicos de la ciudad mediante ensayos dinámicos de campo y laboratorio. Se desarrolla un modelo de evaluación no-lineal de funciones de transferencia de los depósitos de suelo para obtener espectros de Amplitudes de Fourier (EAF) a nivel de la superficie de terreno. Con base en los EAF a nivel de la superficie del terreno se construyen los espectros de amenaza uniforme conforme a la teoría clásica de la amenaza. Los espectros conforman la base para la reglamentación de diseño sismo resistente de las ciudades. Simultáneamente se realizan análisis de sensibilidad de las diferentes variables involucradas. En la referencia ___ se presentan los detalles de la metodología de cálculo utilizada en los análisis.

Las figuras siguientes resumen las principales etapas de los análisis:

- 1) Caracterización geológica, geomorfológica, neotectónica y sísmica.

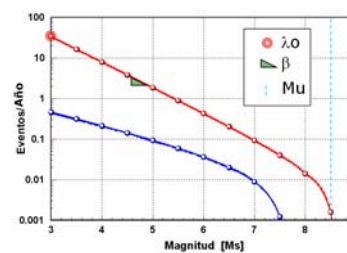
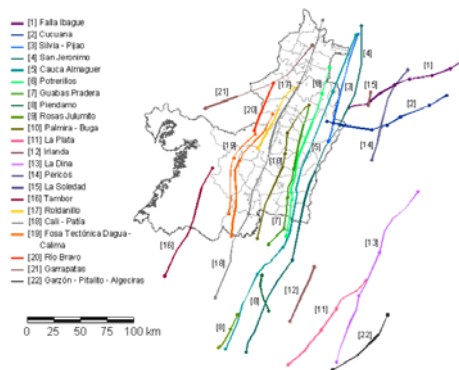


*Margen izquierdo
Río Guadalajara*

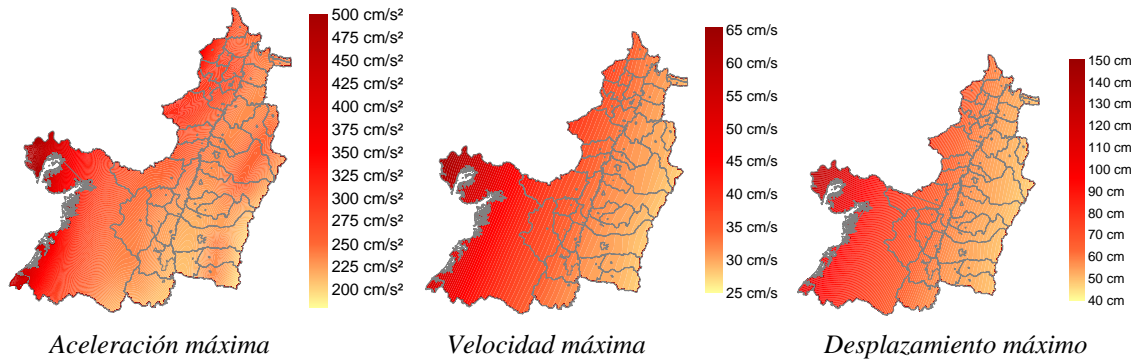


*Imagen 3-D Morfología
de la región*

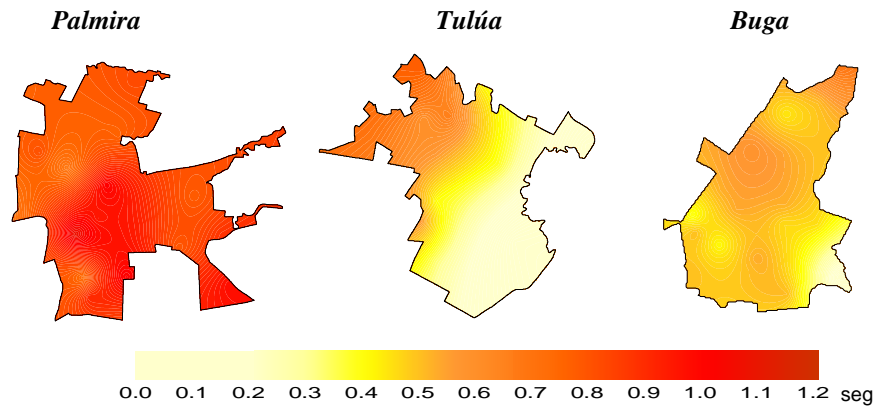
- 2) Identificación y caracterización de todas las fuentes sismogénicas activas y potencialmente activas de la zona.



- 3) Valoración de la amenaza sísmica en términos de aceleraciones máximas, aceleraciones espectrales, velocidad o desplazamientos máximos a nivel de terreno firme.



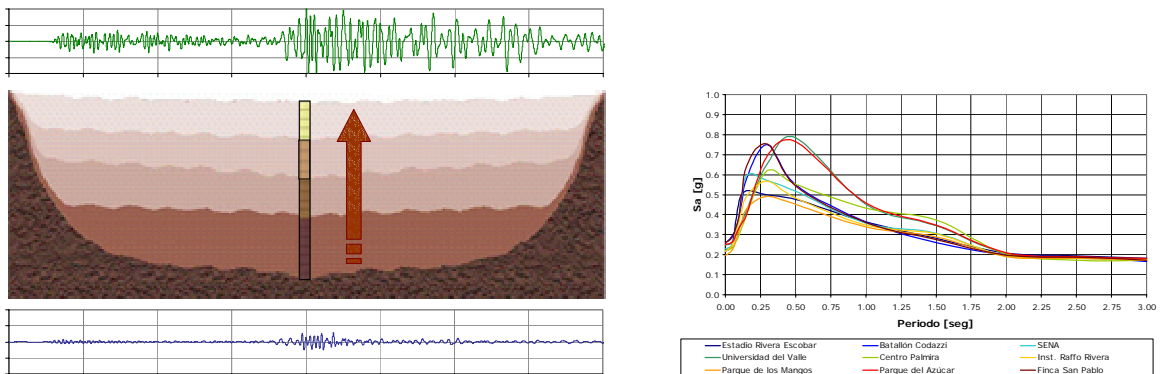
4) Caracterización de la respuesta dinámica de los depósitos de suelo locales mediante vibraciones ambientales.



5) Investigación geotécnica que incluye perforaciones profundas y ensayos de caracterización de campo y laboratorio.



6) Estudio de respuesta dinámica de perfiles típicos de suelos.



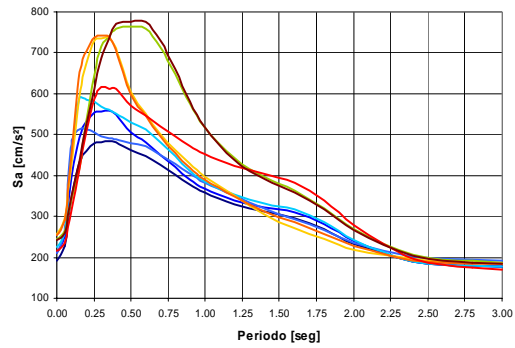
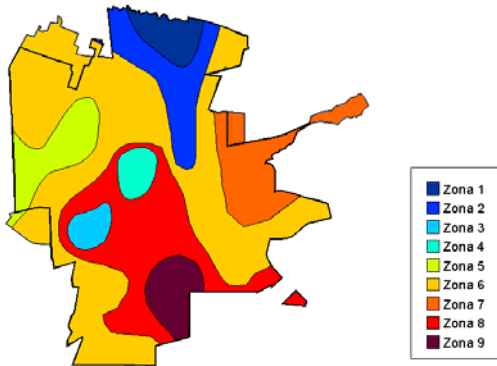
Microzonificación sísmica

Los resultados de la evaluación de la amenaza sísmica a nivel local en cada uno de los municipios permiten definir los espectros para el diseño sismoresistente para toda la infraestructura por construir en los municipios.

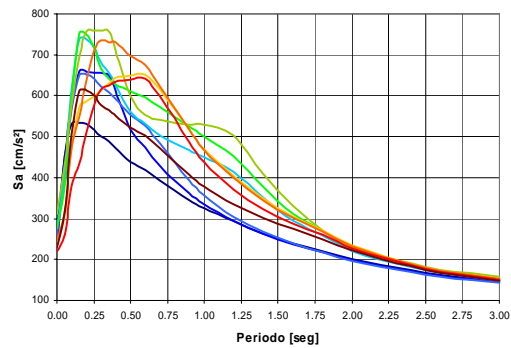
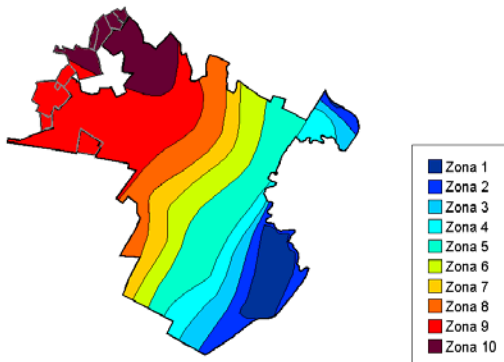
Los espectros pueden plantearse en términos de aceleración, velocidad o desplazamiento, para diferentes niveles de amortiguamiento estructural y para diferentes períodos de retorno. Igualmente se cuenta con los espectros de diseño a nivel de roca base o en la superficie del terreno.

En particular se cuenta con los espectros de diseño para edificaciones bien sea en la roca base o a nivel de la superficie del terreno definidos para un período de retorno de 475 años y para un amortiguamiento estructural con respecto al crítico del 5%, de acuerdo con la Ley 400 de 1997 (Norma NSR-98).

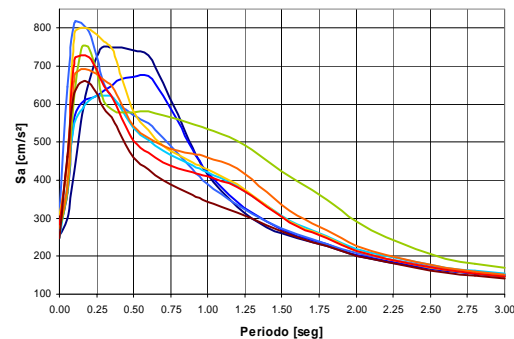
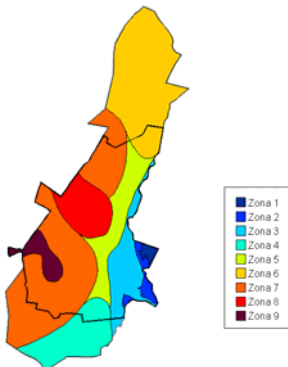
Palmira



Tuluá



Buga



Red de acelerógrafos de la CVC

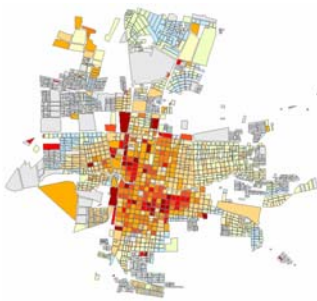
Para efectos de calibración de los modelos analíticos desarrollados y con el fin de contra con información de mejor calidad para los análisis futuros de respuesta dinámica de la zona se hace necesaria la instalación de una serie de instrumentos que permitan monitorear en forma continua la ocurrencia de eventos sísmicos en la zona. La instrumentación en el presente caso consiste en la instalación de una red de acelerógrafos conformada por un total de 7 equipos distribuidos en los municipios estudiados. Se trata de acelerógrafos de movimiento fuerte que pretenden registrar los niveles de aceleración en el tiempo que se presentan ante el paso de las ondas sísmicas en una ubicación particular. Los sitios seleccionados son los siguientes:

- Palmira: Recrear - Parque del Azúcar
Instituto Técnico Industrial Humberto Raffo Rivera
- Tuluá: Parque Infantil Julia Carpeta
Empresa de Mercado Público Mertuluá
- Buga: Instituto Educativo Agrícola de Guadalajara Buga
Almacenes Generales de Depósito de Café S.A
Aguas de Buga S.A. ESP.



Vulnerabilidad de las construcciones

Mediante un reconocimiento detallado de las construcciones de cada uno de los municipios se adelanta la caracterización general de tipos estructurales y sus funciones de vulnerabilidad correspondientes. Cada uno de los municipios se zonifica de acuerdo con los tipos constructivos dominantes.



Mapa de número de pisos

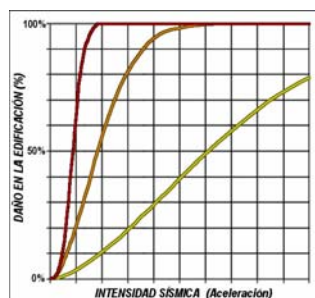
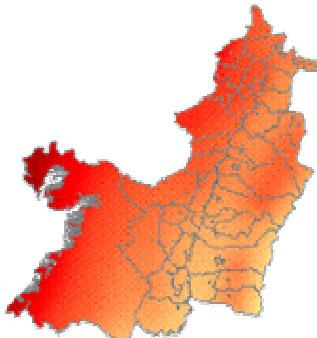


Mapa de tipo estructural



Mapa de estrato socioeconómico

Los diferentes sistemas constructivos dominantes se caracterizan desde el punto de vista de su vulnerabilidad sísmica.

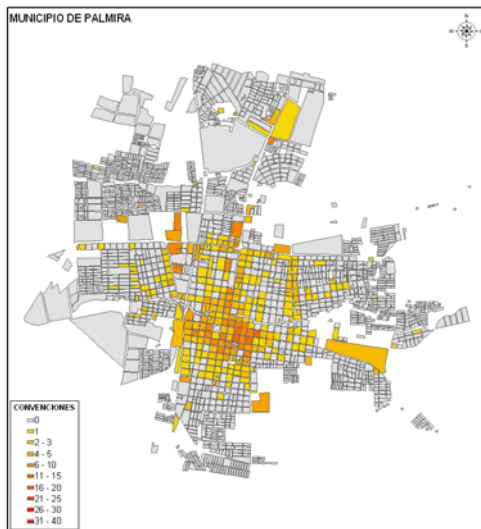


Riesgo Sísmico

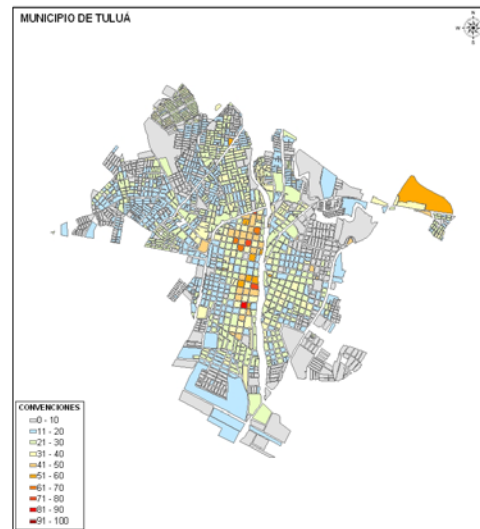
Para la evaluación del riesgo sísmico se plantean varios escenarios de análisis. Para cada uno de ellos se evalúan las pérdidas económicas esperadas, la población afectada en términos de viviendas, el número esperado de heridos y el número esperado de víctimas para la ocurrencia del sismo en las horas del día o de la noche. Estos resultados permiten dimensionar el riesgo para conformar las bases para la elaboración de los planes de prevención, preparación y atención de situaciones catastróficas.

Escenario Típico Hipotético

Escenario sísmico (Superficial cercano)	Valores
Periodo de retorno (años)	500
Magnitud (Ms)	5.3 – 5.8
Distancia epicentral (Km)	17 – 21
Profundidad (Km)	11 – 15
Aceleración máxima representativa (g) en terreno firme	0.12 – 0.15
Edificaciones afectadas	45% - 50%
Edificaciones destruidas	5% - 20%
Número de heridos	1% - 3.5
Número de muertos	0.5% - 1.5%



Número de muertos

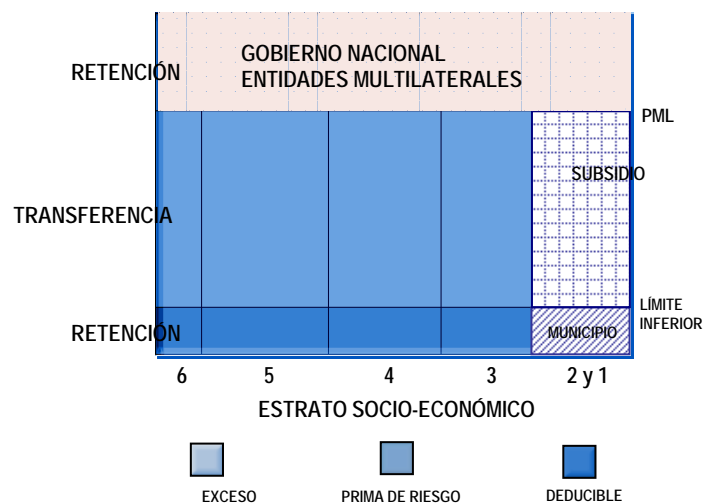


Distribución de daño

Retención y transferencia del riesgo

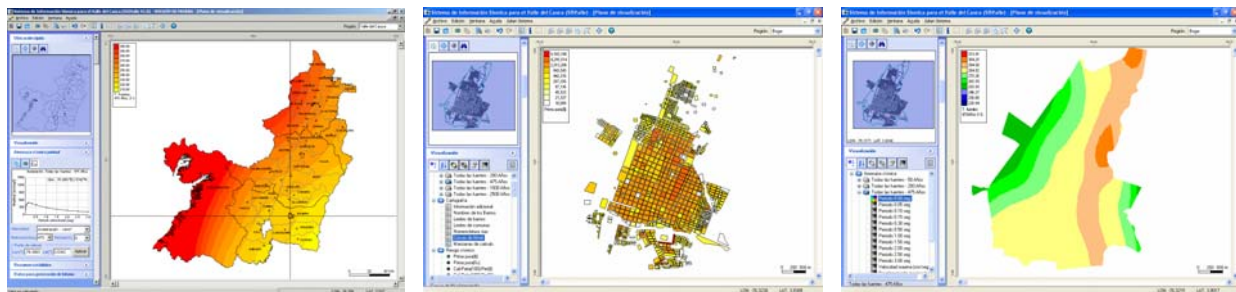
La evaluación del riesgo sísmico permite estimar parámetros como la prima pura de riesgo o la pérdida máxima probable para el portafolio de edificaciones de cada municipio. Con base en dichos resultados se propone una estrategia de retención y transferencia del riesgo sísmico la cual debe ser adoptada por el municipio y puesta en marcha en el corto plazo.

El objetivo de esta estrategia es contar con un sistema parcial de protección financiera para toda la población en caso de sismo de alto poder destructivo



Sistema de información sísmica, SISValle v1.1.

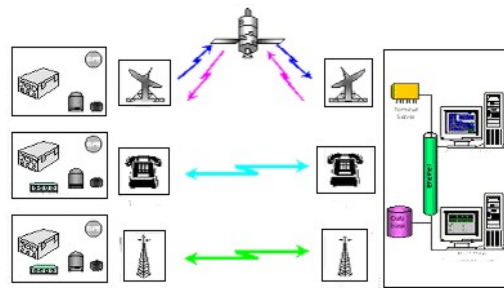
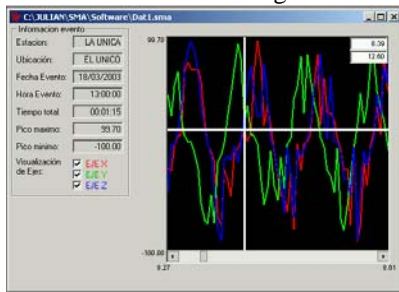
Para el manejo de la información sísmica de los municipios se entrega el sistema de información sísmica **SISValle V1.1**. Se trata de un sistema que permite visualizar toda la información cartográfica básica, no solo de los municipios estudiados sino de todo el Valle del Cauca. Se incluye información general de amenazas para todo el Departamento e información particular de vulnerabilidad y riesgo para los tres municipios estudiados. En particular el sistema calcula y reporta los espectros para diseño sismoresistente de cualquier predio en cualquiera de los municipios, de acuerdo con los requerimientos de la NSR-98 (ley 400 de 1997) y los resultados de los estudios de microzonificación.



CONCLUSIONES, FUTUROS DESARROLLOS Y APLICACIONES

La realización de los estudios de microzonificación sísmica para los diferentes ciudades y municipios de Colombia debe orientarse hacia una visión más integral del riesgo sísmico. Son varios los aspectos y las áreas de aplicación de los resultados principales de dichos estudios y como tal sus resultados deben orientarse hacia dichas aplicaciones. Los análisis deben orientarse a tres áreas principales que son el conocimiento mismo de los riesgos en términos cuantitativos, las labores de prevención que incluyen entre otros la normalización, reforzamiento de infraestructura e intervención de vulnerabilidad, medidas de preparación para las emergencias que incluye la realización de planes de contingencia y de emergencia en todos los sectores afectados por el evento, preparación para los eventuales programas de rehabilitación y reconstrucción y la adopción de medidas de protección financiera y transferencia del riesgo para minimizar el impacto directo sobre la población y sobre las finanzas de particulares y del estado mismo.

Los estudios desarrollados proporcionan entonces la información básica, entre otras cosas para: adoptar una normativa adecuada de diseño sísmo resistente de toda la infraestructura de los municipios; desarrollar los planes de ordenamiento territorial acorde con las amenazas y riesgos; adelantar planes de intervención de la vulnerabilidad, de contingencia y preparación para emergencias por parte de los organismos operativos de respuesta; y finalmente para contar con esquemas viables de retención y transferencia del riesgo como medida de protección financiera tanto para edificaciones públicas como privadas, elementos fundamentales de la gestión del riesgo sísmico.



Los futuros desarrollos prioritarios recomendados en el tema de gestión de riesgos para los municipios del centro del Valle del Cauca, incluyen los siguientes aspectos generales:

- 1) Continuar con los estudios tendientes a mejorar el conocimiento de la amenaza sísmica de la región en todas sus dimensiones, desde la neotectónica básica, pasando por la geología, la información sísmica, el conocimiento geotécnico y el estudio de la respuesta dinámica real de los suelos de la región ante eventos sísmicos específicos.
- 2) Operación y mantenimiento de la red de acelerógrafos para interpretación de la respuesta dinámica del subsuelo y posterior calibración de los resultados generales del estudio. En el corto plazo se recomienda ampliar en lo posible el número de aparatos que conforman la red.
- 3) Mejoramiento de la información geotécnica y de comportamiento dinámico de los suelos mediante el seguimiento a estudios realizados para proyectos específicos (puentes, edificios, obras importantes) con el alcance y especificaciones requeridas para los estudios de respuesta dinámica.
- 4) Refinamiento y ajuste de la información catastral para minimizar la incertidumbre en la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico. Incluye tipos constructivos, número de pisos, estado de las construcciones, distribución y densidad de la población, georreferenciación y otros parámetros.
- 5) Desarrollo e implementación por parte de cada uno de los municipios de planes concretos de prevención, de preparación para emergencia y de atención durante eventuales sismos catastróficos.
- 6) Implementación de un esquema de retención y transferencia para protección financiera de los bienes públicos y privados del municipio.
- 7) Desarrollo de un sistema para evaluación temprana de daños en caso de sismos a nivel del Departamento basado en toda la información y modelos desarrollados.
- 8) Estudio de otro tipo de amenazas e inclusión en el sistema de información (tales como amenaza de inundaciones, avalanchas, deslizamientos y otros).

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- Aguilar A., Arboleda J. & Ordaz M.,** 1999. Programa Crisis 99. Programa para calcular el Riesgo Sísmico.
- Alfaro, A.** 1997 Estimación de Periodos Predominantes de suelos en Barcelona a partir de Microtremors. M. Sc Thesis, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España. Informe ICC No. GS091-97.
- Andersen, T.** 2002. Innovative Financial Instruments for Natural Disaster Risk Management. Inter-American Development Bank. Sustainable Development Department. Technical Papers Series.ENV-140.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS,** 1997. Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS,** 2004. Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS,** 2004. Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada.
- Banco Mundial, Departamento Nacional de Planeación - DNP,** 2002. “Retención y Transferencia del Riesgo Sísmico en Colombia – Evaluación Preliminar de una Posible Estrategia Financiera y del Mercado Potencial”, Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos, CEDERI, Universidad de Los Andes. Bogotá DC.
- Finn, W. D. L & Lee, M. K. W.** 1991 . DESRA-2C: Dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential, Univ. of British Columbia, Faculty of Applied Science.
- Gallego M. & Ordaz M.** 1999. Construcción de leyes de atenuación para Colombia a partir de espectros fuente y teoría de vibraciones aleatorias, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Boletín técnico no. 53, Julio de 1999.
- Gallego, M., Yamin, L.E., Tristancho, J.,** 2002. “Zp. Sistema Probabilístico de Información Geográfica de Peligro Sísmico de Colombia”. Revista de Ingeniería No. 16, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes.
- Hashash, Y & Park, D.** 2002. Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in non-linear site response analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22 (2002) 611–624.
- Idriss I. M. & Sun, J. I.,** 1992. SHAKE91.
- Ingeominas,** 2.001. Geología del Departamento del Valle del Cauca. Escala 1:250.000.
- Miranda, E.,** 2001. “Estimation of Inelastic Deformation Demands of SDOF Systems”, Journal of Structural Engineering.
- Ordaz, M, Reinoso E. y Pérez Rocha L. E.** 1996. Criterios de diseño sísmico: consideraciones para suelos blandos, Ingeniería Sísmica, (53) 25-35.
- Ordaz M. & Perez-Rocha L. E.** 1998. Estimation fo strength reduction factors for elastoplastic systems: a new approach, Earthquake Engineering Structural Dynamics 27 – 99-901.
- Ordaz, M.,** 2000. Metodología para la Evaluación del Riesgo Sísmico Enfocada a la Gerencia de Seguros por Terremoto, Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.
- París & Romero,** 1.993. Fallas Activas de Colombia. Boletín Geológico de Ingeominas, Vol.34, No. 2-3, pp. 3 a 25, 1.994. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Paris, G., Machette, M., Dart, R. & Haller, K.** 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia its Offshore Regions. USGS Open-File report 00-0284. Map at 2,500,000 scale and report, 66 pp.
- Pollner, J.** 2001. Managing Catastrophic Disaster Risks Using Alternative Risk Financing and Pooled Insurance Structures. World Bank Technical Paper, No. 495.

Pomonis, A., Sakai, Coburn, A.W., Spence, R.J.S.,1991. "Assessing human casualties caused by building collapse in earthquakes", International Conference on the Impact of Natural Disasters, UCLA.

República de Colombia, 1998. Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes – NSR-98, Ley 400 de 1997. Decreto 33 de 1998.

Sarria, A. 1990. Ingeniería Sísmica, Ediciones Uniandes.

Sarria, A. 1996. Métodos Geofísicos con aplicaciones a la Ingeniería Civil.

Singh, S., K., Lermo, J., Dominguez, T., Ordaz, M., Espinosa, J., M., Mena, E., & Quaas, R., 1988. The Mexico Earthquake of September 19,1985 - A Study of Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone, Earthquake Spectra, Vol.4, No.4.

Universidad de Los Andes - CEDERI, 2002. Retención y Transferencia del Riesgo Sísmico en Colombia – Evaluación Preliminar de una Posible Estrategia Financiera y del Mercado Potencial. Banco Mundial – DNP, Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos - CEDERI, Universidad de Los Andes. Bogotá DC.

Universidad de Los Andes - CEDERI, 2005. Acelerógrafo CMAC-02, Manual del Usuario. Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos - CEDERI, Universidad de Los Andes. Bogotá DC.

Universidad de Los Andes - CEDERI, 2006. Informe Final – Microzonificación Sísmica y Estudios Generales de Riesgo en las Ciudades de Palmira, Tuluá y Buga, Corporación Autónoma Regional del valle del Cauca – CVC, Municipio de Palmira, Municipipo de Tuluá, Municipio de Buga. Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos - CEDERI, Universidad de Los Andes. Bogotá DC.

Universidad de Los Andes - CEDERI, 2006. Sistema de Información Sísmica del Valle del Cauca – SISValle V1.1, Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos - CEDERI, Universidad de Los Andes. Bogotá DC.

Yamin, L.E., Cardona, O. D., Gallego, M., Phillips, C., Arámbula, S., 2004. "Recent Advances in Seismic Microzonation Studies in Colombia: The Manizales City Case", 13th World Conference on Earthquake Engineering – Paper No 2840, Vancouver, Canadá.

Consultar : www.cvc.gov.co