



Innovation in research and engineering education:  
key factors for global competitiveness  
*Innovación en investigación y educación en ingeniería:  
factores claves para la competitividad global*

# APLICACIÓN DE UN LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA SÍSMICA Y SU IMPACTO EN LA EDUCACIÓN

Daniel Gómez P., Eimar Sandoval V., Peter Thomson, Johannio Marulanda C.

Universidad del Valle  
Cali, Colombia

## Resumen

Este artículo describe el desarrollo de un laboratorio virtual para proporcionar un medio *online* para realizar simulaciones en el área de la Ingeniería Sísmica. El uso de las tecnologías de información y telecomunicaciones (TICs), específicamente los laboratorios virtuales, se ha consolidado en la última década como una valiosa herramienta de apoyo para el ejercicio docente en diferentes áreas de la formación profesional. En la actualidad se encuentran implementaciones que van desde la virtualización de prácticas en ciencias básicas hasta la experimentación virtual en temas específicos de ingeniería. Si bien los mayores desarrollos en este campo se han alcanzado en otras latitudes, en los últimos años, local y regionalmente, se han dado pasos hacia la incorporación de estos escenarios de enseñanza-aprendizaje en la actividad académica universitaria nacional. Para este Laboratorio Virtual de Ingeniería Sísmica se diseñaron prácticas virtuales para el aprendizaje con la implementación de módulos que proporcionan un medio para simulaciones interactivas en línea, destinados a proporcionar una comprensión conceptual de temas relacionados con la Ingeniería Sísmica. Se plantean estos escenarios como un medio para fortalecer las experiencias académicas e investigativas del estudiante, dentro y fuera del aula. Se realizaron encuestas a estudiantes y profesores de varios cursos del Programa Académico de Ingeniería Civil y del énfasis en Ingeniería Civil de la Maestría en Ingeniería de la Universidad del Valle, antes y después de la implementación del laboratorio, para evaluar su impacto en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Los resultados de las encuestas muestran buena receptividad por parte de los actores del proceso y alta efectividad para la comprensión de conceptos y la visualización e interpretación de resultados.

**Palabras clave:** TIC; laboratorio virtual; ingeniería sísmica

## Abstract

*This paper describes the development of a virtual laboratory created to provide an online environment for simulations in the field of Earthquake Engineering. During the last decade, the use of*

*information and communications technologies (TICs), and specifically virtual laboratories, has become a valuable tool for supporting teaching in different areas. Presently, implementations can be found ranging from virtualization in basic sciences to virtual experimentation in specific engineering topics. While further developments in this field have been achieved worldwide, important steps have been taken in recent years towards the effective incorporation of these teaching-learning scenarios in the Colombian academic community. For the Earthquake Engineering Virtual Laboratory described in this paper, virtual learning exercises were designed with the implementation of modules that provide the means for interactive online simulations, with an emphasis on providing conceptual comprehension of issues related to Earthquake Engineering. These scenarios are proposed as a means to strengthen academic and research experiences of students both inside and outside the classroom. A survey was conducted among students and professors of undergraduate and graduate level civil Engineering courses at the Universidad del Valle, Colombia, both before and after the implementation of the laboratory, in order to evaluate its impact on teaching and learning processes. Results of the survey show high levels of acceptability among the users regarding the effectiveness of the virtual laboratory in aiding the understanding, visualization and interpretation of concepts.*

**Keywords:** ICT; virtual laboratory; earthquake engineering

## 1. Introducción

El Área de la Ingeniería Sísmica abarca una gran cantidad de campos de conocimiento, como mecánica de sólidos, dinámica estructural, sismología, geotecnia, geología, análisis estructural, y diseño de estructuras, por lo que es una necesidad la preparación integral de los estudiantes de ingeniería en la apropiación de los conceptos sobre el comportamiento de estructuras sísmo resistentes, y su comprensión del impacto en la reducción de pérdidas humanas, daños materiales y costos en infraestructura. La enseñanza con componente práctica en ingeniería es indispensable para complementar el ejercicio docente teórico con experimentación que permita la aplicación de conceptos y la verificación de resultados analíticos. Las prácticas de laboratorio permiten al estudiante manipular materiales, instrumentos y máquinas, así como aportar su iniciativa y originalidad, desarrollando pensamiento crítico, pero en las condiciones tradicionales de enseñanza es difícil la incorporación adecuada de los recursos prácticos debido a que no siempre se cuenta con las instalaciones o equipos necesarios (Gómez et al, 2011). Es aquí donde entran en juego los laboratorios simulados o virtuales mediante las tecnologías de la información y comunicación (TICs) (Valencia, 2001). Una de las características que mejor define un laboratorio virtual es la interacción, ya que el usuario hace realmente un experimento: sólo se progresa si se suministra al programa informático los datos que necesita para hacer las transformaciones deseadas (Fontarnau et al, 2013).

Este artículo describe el desarrollo y la implementación de una herramienta educativa cuyo fin es la ilustración de conceptos de la Ingeniería Sísmica mediante un laboratorio virtual. El laboratorio se concibió inicialmente con tres módulos: módulo de dinámica estructural, módulo de geotecnia y módulo de análisis estructural. Gracias a esta herramienta, las prácticas de laboratorio se llevan a la pantalla del ordenador, permitiendo que cada estudiante de un curso observe y realice la misma o diferentes prácticas. Además, una vez aprendida la técnica, cualquier estudiante podrá repetir independientemente el experimento y sus variantes, tantas veces como desee, brindando un apoyo a la docencia impartida por profesores así como un instrumento que facilita la interacción entre los temas de la Ingeniería Sísmica.

## 2. Laboratorio Virtual de Ingeniería Sísmica

El Laboratorio Virtual de Ingeniería Sísmica (SISMILAB) consta de tres módulos: módulo de Dinámica Estructural, módulo de Geotecnia y módulo de Análisis de Estructuras. Estos módulos se pueden descargar en la página <http://sismilab.univalle.edu.co/>, junto con sus manuales de usuario. En las siguientes secciones se describe cada módulo.

### 2.1 Módulo de Dinámica Estructural

El módulo de Dinámica Estructural se divide en sistemas de un grado de libertad (1GDL) y sistemas de múltiples grados de libertad (MGDL). La aplicación de sistemas de 1GDL permite modelar un sistema Masa-Resorte-Amortiguador, columna o pórtico, y simular la respuesta dinámica ante las diferentes excitaciones: condiciones iniciales diferentes de cero, sin fuerzas externas (vibración libre); aceleración armónica en el suelo o fuerza armónica sobre la estructura; excitación impulsiva (impulso unitario, triangular, cuadrado o rampa); excitación arbitraria (movimiento sísmico). Se diseñó la interfaz gráfica (Figura 1) utilizando el lenguaje de programación del paquete matemático MATLAB (The Mathworks, 2013). La interfaz de la aplicación tiene un diseño amigable para una mejor interacción del usuario con ésta, y está dividida en cuatro paneles: Excitaciones, Propiedades del Sistema, Respuesta y Animación de Respuesta (Modelo 1GDL).

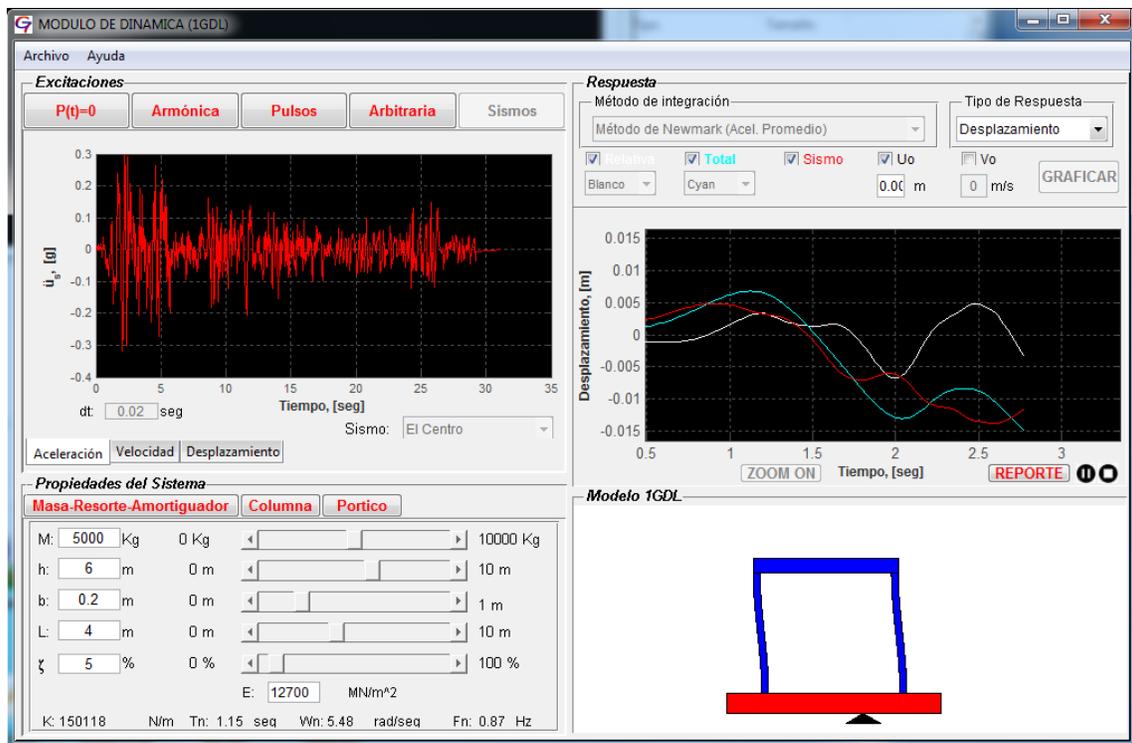


Figura 1. Interfaz gráfica para sistemas de 1GDL.

En el Panel de Animación de la Respuesta (Modelo 1GDL), el usuario escoge el tipo de modelo de simulación, entre el sistema Masa-Resorte-Amortiguador, Columna y Pórtico, los cuales simulan una estructura de 1GDL, variando las propiedades seleccionadas en el Panel de Propiedades del Sistema, antes y durante la simulación, visualizada también en el Panel de Respuestas, donde se

grafican las respuestas totales o relativas en desplazamiento, velocidad o aceleración del modelo. La respuesta se calcula con alguno de los métodos de integración numérica programados, escogido por el usuario: Newmark (aceleración promedio o lineal), interpolación de la excitación o diferencia central (Chopra, 1995).

En la aplicación para sistemas de MGDL el usuario puede dibujar el sistema estructural que desee modelar mediante una interfaz interactiva programada en lenguaje html5 y JavaScript, con el fin de acceder y utilizarlo *online*, (Figura 2). Para el diseño de esta interfaz se utilizó la librería de JavaScript Raphaël.js (Baranovskiy, 2012), para lograr las animaciones y las librerías Matrix.js, LUdecomposition.js, QRdecomposition.js y EVdecomposition.js (Coxhead, 2013) para los cálculos con matrices. Los tipos de excitación dinámica que se pueden aplicar son: desplazamiento armónico en el suelo y fuerza armónica sobre la estructura; condiciones iniciales diferentes de cero, sin fuerzas externas (vibración libre); y excitación sísmica (sismos de Armenia, El Centro, Loma Prieta, México, Páez).

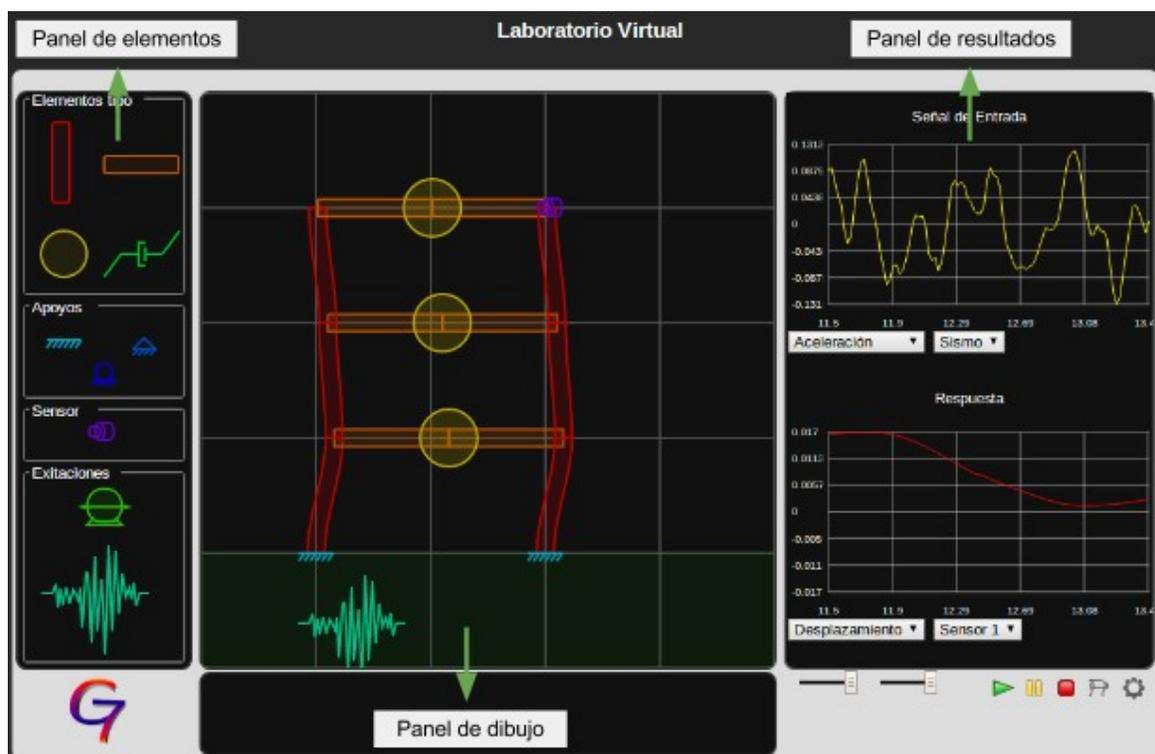


Figura 2. Interfaz gráfica para sistemas de MGDL.

La interfaz consta de tres paneles: panel de elementos, panel de dibujo y panel de resultados. En el primer panel están los elementos con los cuales se realiza una configuración estructural: elementos tipo columna, viga, masa y amortiguador, y las condiciones de borde en los apoyos. Para excitar la estructura se tienen dos elementos, un motor que produce vibraciones a la estructura y un sismo simulado que imparte movimiento en los apoyos. Por último, para indicar el grado de libertad en el que se desea graficar la respuesta, se tiene el elemento tipo sensor. En el panel de dibujo se realiza la configuración estructural arrastrando los elementos del panel de elementos, según se requiera conocer la respuesta ante determinada excitación. En el caso de que la excitación provenga de un sismo, se cuenta con un menú *popup*, en la parte inferior, para seleccionar el sismo, entre los cuales están el Sismo de Armenia, El Centro, Loma Prieta, México y Páez. En el caso de que la excitación sea un motor que

vibra, el menú permite ingresar la amplitud de la fuerza y la frecuencia de excitación del motor. Por último, está el panel de resultados en el que se observan las gráficas de la carga aplicada y el desplazamiento, velocidad o aceleración de la estructura, en el grado de libertad en que se encuentra el sensor.

## 2.2 Módulo de Geotecnia

El módulo de geotecnia está conformado por dos aplicaciones realizadas en el paquete matemático MATLAB. La primera aplicación evalúa la interacción estática suelo-estructura en cimentaciones superficiales. La segunda aplicación calcula de la variación de las ondas sísmicas debido a los efectos locales del sitio. La aplicación “Interacción Estática Suelo- Estructura” (IESE) (Figura 3) tiene como finalidad el análisis y la comparación de los diagramas de solicitaciones internas en una cimentación superficial cuando la flexibilidad del suelo es o no considerada. El método que no considera la flexibilidad del suelo se conoce como Método Rígido o Convencional. Cuando la flexibilidad del suelo es tenida en cuenta, es decir, se considera la IESE, se utiliza el Método de Winkler mediante resortes independientes o Método Continuo. Estos métodos pueden ser aplicables a zapatas aisladas, combinadas o a losas de cimentación (Kramer, 1996).

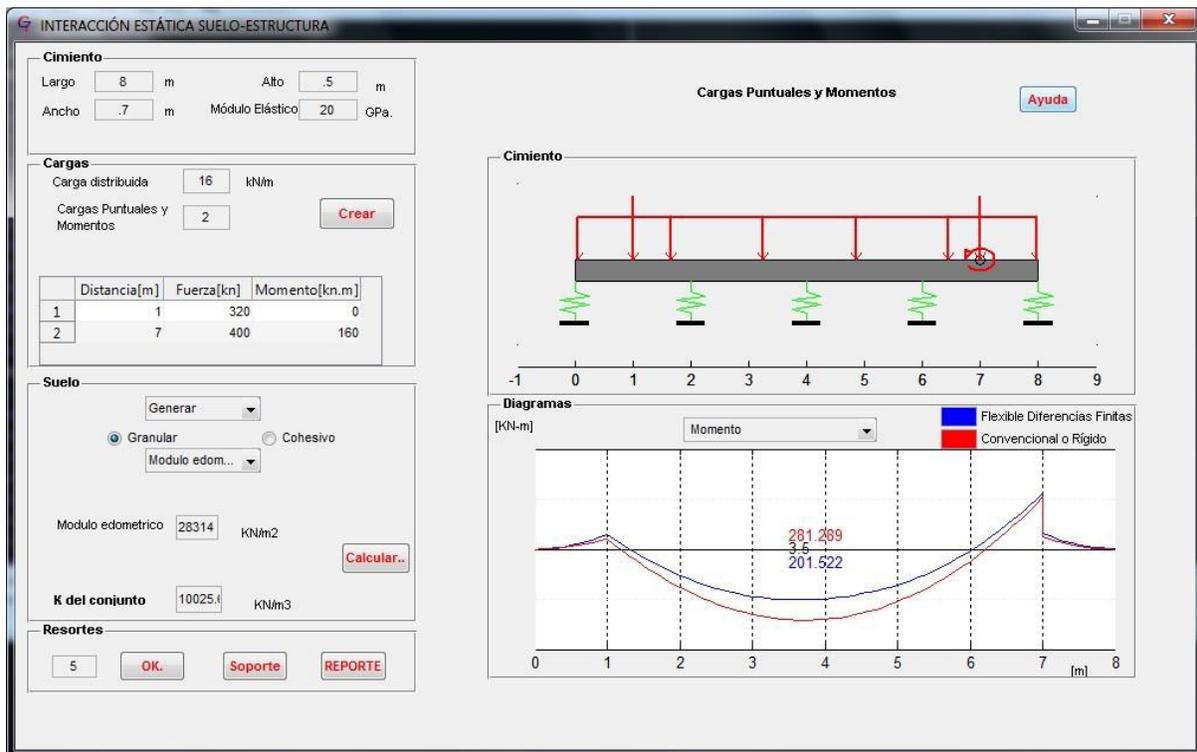


Figura 3. Interfaz gráfica de la aplicación Interacción Estática Suelo-Estructura.

Mediante la modelación de la rigidez y las propiedades geométricas de la fundación, de las características esfuerzo-deformación del suelo de fundación, y de las cargas aplicadas sobre el cimiento, se obtienen diagramas de cargas, cortantes y momentos cuando se considera o no la IESE. Con estos diagramas cada usuario puede sacar sus propias conclusiones sobre las diferencias que existen cuando en el diseño estructural se considera o no la IESE, para diferentes tipos de suelos, cargas y cimientos. Entre otras, la aplicación cuenta con ayudas para determinar las propiedades esfuerzo-

deformación para diferentes tipos de suelo.

La aplicación “Efectos Locales de Sitio” (Figura 4) tiene como finalidad analizar la respuesta dinámica de un estrato de suelo ante diferentes solicitaciones sísmicas. Con el conocimiento de las características del sismo que llega a la roca o que se registra en superficie, y a partir de la densidad y de las propiedades dinámicas del suelo y de la roca (altura del estrato, peso unitario seco, velocidad de onda cortante, amortiguamiento), se conoce la amplificación o atenuación de las ondas sísmicas para diferentes estratos. Se considera un análisis lineal del sistema con propagación de ondas en la dirección vertical, debido a que la mayoría de las veces los perfiles de suelo cuentan con estratos organizados horizontalmente, a causa de los procesos geológicos de deposición y formación del suelo. La aplicación muestra los resultados de la respuesta del estrato de suelo en aceleración, velocidad, esfuerzo cortante y desplazamiento, para cuatro condiciones: suelo uniforme no amortiguado sobre roca rígida, suelo uniforme amortiguado sobre roca rígida, suelo uniforme amortiguado sobre roca elástica, y suelo uniforme estratificado sobre roca elástica.

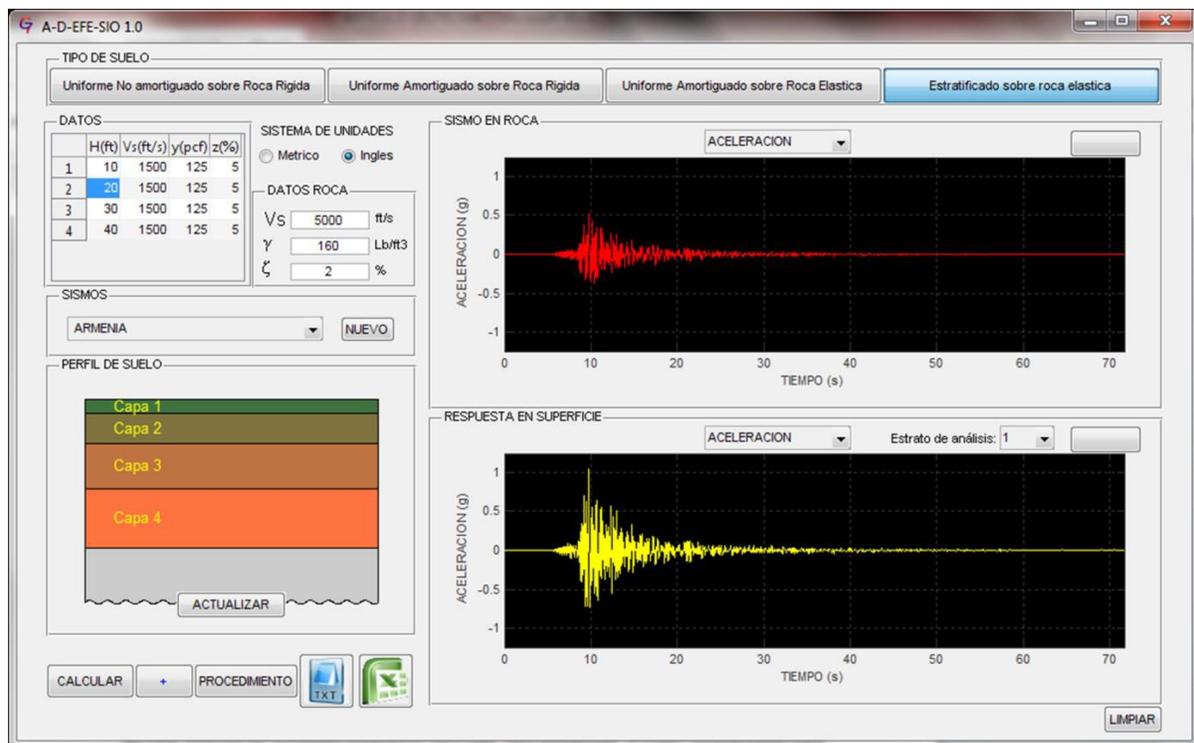


Figura 4. Interfaz gráfica de la aplicación Interacción Estática Suelo-Estructura.

### 2.3 Módulo de Análisis de Estructuras

El módulo de Análisis de Estructuras permite la creación de ejemplos de estructuras simples (vigas y pórticos) sometidas a cargas estáticas y simulaciones en dos direcciones (Figura 5). El usuario puede crear vigas de hasta 10 luces y pórticos planos de hasta 2 luces y 4 niveles. Los nudos y elementos pueden estar sometidos a cargas puntuales (fuerzas o momentos concentrados) y los elementos a cargas distribuidas (constantes o trapezoidales). El análisis estructural puede realizarse por varios métodos (Leet y Uang, 2006; Kardestuncer, 1975): Distribución de momentos, Deformaciones o Matricial. Los resultados finales del análisis estructural son los diagramas de momentos, cortantes y

normales en los elementos y las reacciones en los apoyos. El módulo incluye, además, una herramienta para el análisis de esfuerzos en un elemento diferencial en el plano. Adicional a los resultados finales, el módulo genera un reporte en formato HTML con los datos de entrada suministrados por el usuario y el procedimiento que efectuado para resolver el análisis, de acuerdo con el método elegido.

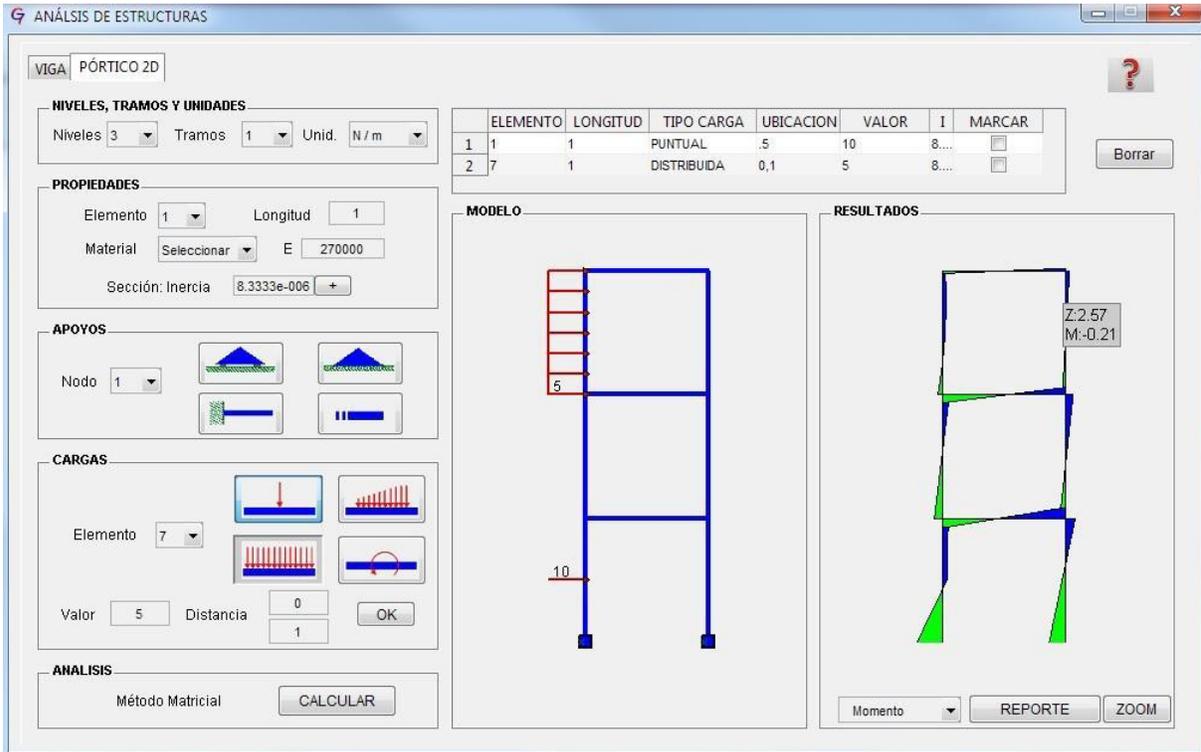


Figura 5. Interfaz gráfica para análisis estructural de vigas y pórticos.

La herramienta para análisis de esfuerzos en un elemento diferencial en el plano realiza el análisis de esfuerzos unitarios de un elemento de tamaño infinitesimal en una sección transversal sometida a esfuerzos normales y cortantes para diferentes ángulos del plano en el cual inciden dichos esfuerzos. El elemento de tamaño infinitesimal se esboza como un cubo o paralelepípedo rectangular, para facilitar la comprensión del análisis.

### 3. Evaluación del impacto

Se realizaron encuestas a estudiantes y profesores de varios cursos del Programa Académico de Ingeniería Civil y del énfasis en Ingeniería Civil de la Maestría en Ingeniería de la Universidad del Valle, antes y después de la implementación del laboratorio, para evaluar su impacto en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Las encuestas valoran la percepción del estudiante y el profesor sobre la facilidad para la comprensión de conceptos y la visualización e interpretación de resultados con la metodología tradicional del curso y, además, la contrasta con la percepción después de usar el Laboratorio Virtual. Las primeras encuestas se realizan después de la primera mitad del semestre y las segundas luego de asignar y evaluar un taller que los estudiantes deben resolver usando el laboratorio.

Para la evaluación de los resultados de las encuestas se usó el Índice Alfa de Cronbach (Cronbach, 1951), obteniendo aumento en el porcentaje de aceptación en todas las encuestas realizadas. La percepción sobre el uso del laboratorio se midió durante un semestre, sin embargo, para medir realmente el impacto que tiene sobre el proceso de enseñanza-aprendizaje, debe hacerse seguimiento de varios años.

#### 4. Conclusiones

El Laboratorio Virtual de Ingeniería Sísmica (SISMILAB) es una herramienta de enseñanza-aprendizaje útil para diferentes campos de la Ingeniería Sísmica: Dinámica Estructural, Geotecnia y Análisis de Estructuras. La plataforma de uso libre construida en parte en la *Web* permite la interacción del usuario con modelos representativos de la realidad a través de animaciones y simulaciones en tiempo real, contribuyendo a la comprensión de conceptos y motivando la interpretación de resultados. La evaluación de resultados, a través de encuestas a profesores y estudiantes, muestra buena receptividad y alta efectividad para la comprensión de conceptos y la visualización e interpretación de resultados.

#### 5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación de la Universidad del Valle, RENATA y el Ministerio de Educación Nacional de Colombia, a través del proyecto “Desarrollo e Implementación de un Laboratorio Virtual de Ingeniería Sísmica”.

#### 6. Referencias

- Baranovskiy, D. Raphaël-JavaScript Library. Consultado el 06 de mayo de 2013 en <http://raphaeljs.com/>.
- Chopra, A.K. (1995). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA.
- Coxhead, P. (2011) Javascript Libraries. Consultado el 06 de mayo de 2013 en <http://www.cs.bham.ac.uk/~pxc/web/jslib/index.html#Matrix>.
- Cronbach, L.J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika 16 (3): pp. 297-334.
- Fontarnau, A., Baucells, A., Romero, J. (2013). Universidad Internacional de Cataluña. Laboratorio Virtual. Consultado el 06 de mayo de 2013 en <http://www.uic.es/es/laboratorio-virtual>
- Gómez, D., Thomson, P., Valencia, A., Ramirez, J. (2011). Aplicación interactiva para la educación en Dinámica Estructural. Revista Dyna, Año 78, Nro. 165, pp. 7273.
- Kardestuncer H., (1975). Introducción al análisis estructural con matrices. Graw-Hill, México D.F., México.
- Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA.
- Leet K.M., Uang, C-M, (2006). Fundamentos de análisis estructural. McGraw-Hill, México D.F., México.

- Mathworks (2013). MATLAB. The Mathworks, Inc. Consultado el 06 de mayo de 2013 en <http://www.mathworks.com>
- Valencia, M. (2001). Las Nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicación y el Aprendizaje Activo: Experiencia con el Curso de “Metodologías De Multimedia”. Ingeniería y Competitividad, Vol.1.

### Sobre los Autores

- **Daniel Gómez Pizano:** Ingeniero Civil, M.Sc. en Ingeniería Civil, Profesor Asociado, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, [daniel.gomez@correounivalle.edu.co](mailto:daniel.gomez@correounivalle.edu.co)
- **Eimar Sandoval Vallejo:** Ingeniero Civil, M.Sc. en Ingeniería Civil, Profesor Asistente, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad del Valle [eimar.sandoval@correounivalle.edu.co](mailto:eimar.sandoval@correounivalle.edu.co)
- **Peter Thomson:** Ingeniero Aeroespacial, Ph.D. en Ingeniería Aeroespacial, Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad del Valle, [pethomso@univalle.edu.co](mailto:pethomso@univalle.edu.co)
- **Johannio Marulanda Casas:** Ingeniero Civil, Ph.D. en Ingeniería Civil, Profesor Asistente, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad del Valle, [johannio.marulanda@correounivalle.edu.co](mailto:johannio.marulanda@correounivalle.edu.co)

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería y de la International Federation of Engineering Education Societies

Copyright © 2013 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI), International Federation of Engineering Education Societies (IFEES)