

DESARROLLO DE SISTEMAS DE CÓMPUTO PARA EL PROCESAMIENTO DE SISMOS: UN RETO A SUPERAR

COMPUTER SYSTEMS DEVELOPMENT FOR EARTHQUAKES PROCESSING: A CHALLENGE TO OVERCOME

Abigail Zamora Hernández^{1*}, Félix F. González-Navarro²,
Gloria González-López³, Mario G. Ordaz-Schroeder⁴

^{1,2,3}Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California UABC.
Calle de la Normal Sin Número Esq. Insurgentes Este. Mexicali, B. C. México
Fax: (52) (686) 566 41 50 y 565 44 31 Ext. 107

⁴Instituto de Ingeniería, UNAM. Circuito Escolar Sin Número
Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, Ciudad de México, D. F. México

^{1*}Autor de correspondencia: abigail.zamora@uabc.edu.mx, ⁽²⁾fernando.gonzalez@uabc.edu.mx,
³ines.gonzalez@uabc.edu.mx, ⁴MOrdazS@iingen.unam.mx

Zamora Hernández, Abigail; González-Navarro, Félix F.; González-López, Gloria & Ordaz-Schroeder, Mario G. (2014): *Desarrollo de sistemas de cómputo para el procesamiento de sismos: un reto a superar*. GEOLOGÍA COLOMBIANA, Vol. 37. Bogotá, Colombia. pp 111-123.

Manuscrito recibido: 23 de noviembre de 2012; aceptado: 11 de abril de 2013.

Resumen

La sociedad y gobierno de los países que frecuentemente sufren sismos requieren información completa y oportuna de los mismos, con el fin de tomar decisiones adecuadas para prevenir y mitigar los daños que ocasionan. El procesamiento automatizado de registros sísmicos es de gran importancia y parte de su efectividad recae tanto en el equipamiento de detección sísmica, como en el software para el tratamiento de datos recopilados. En este trabajo se exponen los sismos de mayor impacto en América Latina, con el recuento de sus pérdidas materiales y humanas, así como el desarrollo de la ingeniería sísmica en México. Se hizo el análisis de 22 aplicaciones de software para el procesamiento de datos sísmicos, desarrolladas en América y Europa de 1970 a la fecha. Para cada una de éstas se inspeccionaron los siguientes parámetros: características de proceso, país de origen, costo, plataforma y sistema operativo que requieren, lenguaje de programación con el que fueron elaborados y si comparten la filosofía de código abierto. El objetivo es examinar los diferentes tipos de programas de cómputo utilizados en el estudio de los sismos para determinar la pertinencia del desarrollo de uno nuevo. Los resultados revelan que la mayoría de los programas de software han sido creados en Estados Unidos, donde el estudio de los sismos es una actividad consolidada y aunque en América Latina varios países están bajo amenaza sísmica, su contribución en la producción de estos programas es casi nula. Se observa que entre mayor es el costo del software, incorpora más funciones y capacidades. Así mismo, se advierte que la plataforma de trabajo que predomina es la de las computadoras personales. Cabe mencionar que también se encontraron aplicaciones desarrolladas para apoyar otras áreas del estudio de los sismos, como: la visualización de sus puntos de ocurrencia, los orientados a dar alertas a la población, aquellos que se emplean para el cálculo de daños por sismo o para simulaciones. Con base en lo anterior, se considera indispensable promover la colaboración entre las diferentes ramas de la ciencia y los especialistas en creación de software, con el fin de desarrollar aplicaciones propias, que respondan a las necesidades específicas de los usuarios de América Latina. De esta manera se evitaría invertir grandes sumas de dinero por la adquisición de herramientas de software y a la vez, frenar el uso de tecnología importada.

Palabras clave: Aplicaciones, Procesamiento, Sismos, Software.

Abstract

The Government and societies in countries which usually suffer earthquakes need complete and opportune information about them, to make the right decisions in order to prevent and mitigate the damage they cause. Automated processing of seismic records is very important and its effectiveness lies in both, the seismic detection equipment and software for treatment of gathered data. This work expose those earthquakes with a huge impact in Latin America including the mention of human and material losses and it is also described the development of seismic engineering in México. An analysis of 22 software applications for seismic data processing was made, all of them developed in America and Europe, from 1970 to the date. For each of them, the following parameters were analyzed: processing characteristics, country of origin, cost, platform and operating system that require, the programming language employed for developing them and if they share open source philosophy. The purpose is to analyze different types of computing programs used in earthquakes study for determining relevance of developing a new one. Results reveal that the most of software programs have been created in the United States, where the study of earthquakes is a consolidated activity; although in Latin America several countries suffer seismic menace, their contribution in production of this type of programs is almost zero. It was observed that software with higher cost has also the most functions and capacities. In addition, platform predominant is that of personal computers. It is remarkable that also some other applications were found. These were developed to support some other areas of earthquakes study, such as displaying occurrence points, warnings to population, and those used to calculate earthquake damage or simulations. Based on the above, it is considered essential to promote the collaboration between all different branches of science and specialists in software creation, for developing own applications in order to attend specific needs from Latin America users. This would avoid investing a lot of money for imported technology.

Keywords: Applications, Earthquake, Processing, Software.

Extended Abstract

Latin America (LA) is located in a highly seismic area known as the Ring of Fire, so all countries along the Pacific coast repeatedly suffer the onslaught of earthquakes. Notable earthquakes are those in Chile, Colombia, Haiti, Mexico and Peru. It is not possible to predict when earthquakes will occur, so it is necessary to study them for finding ways to prevent the recurring material and human losses in future events. In this document is presented some information about costs related to the strongest earthquakes occurred in LA, including number of victims and the economical estimation of material damage.

The study of earthquakes starts with installation of seismic detection equipment in several zones, to store data about every seismic event. After this, data are transferred to a computer and processed with specialized computing software to obtain complete and detailed information. The evolution of the study of earthquakes in Mexico, pointing out main entities which develop this activity is also presented.

In this work 22 software applications for seismic data processing were analyzed; they were developed in America and Europe from 1970 to date. For each, following parameters were reviewed: country of origin, functions, platform, operating system, cost, programming language used to develop them, and if they share open source philosophy. According to results, it will be determined if it is relevant developing new support tools for seismic data processing.

Table 1 (Applications for earthquakes processing) shows in chronological order the software applications including their name, creator organism and country of origin. These data indicate that during the first 30 years, twelve programs were created and ten in last ten years. In spite of LA has several countries under seismic menace, it only contributes with two programs.

In regard to the programming language used for applications developing, Figure 1 (Applications platforms) shows that all applications can be implemented in personal computers, but only 13 can do it in other type of computing architectures as workstations.

The Table 3 (Computer programs and their cost) exhibits prices for each application. The most (10) does not require license payment. Three have an implicit cost because they require additional software for functioning and they do have a cost. The other applications (9) must be acquired by mean of a license.

This analysis concludes that the most of the countries in American continent which suffer earthquakes are developing countries that in every seismic event must face high costs, both economical and those in human lives. Governments in these countries rely on several institutions, both educative and research for the study of the earthquakes. They have the ability to develop own low cost technology, for attending specific and actual needs of users.

INTRODUCCIÓN

La predicción de sismos es una de las aspiraciones mas anheladas por los científicos de diferentes disciplinas involucradas en su estudio, como geofísicos, sismólogos e ingenieros de otras áreas. Su objetivo es dar alarma del daño potencial del terremoto, con suficiente anterioridad para permitir una respuesta apropiada al desastre (Betbeder-Matibet 2008). América Latina (AL) es particularmente susceptible a desastres por sismos, como los mega terremotos que han ocurrido en México, Haití, Perú y Chile, que han llevado a los científicos a analizar las causas de los severos daños, con el fin de encontrar formas de prevenir las recurrentes pérdidas materiales y humanas en futuros eventos (Castaños y Lomnitz 2012).

Se ha observado que antes de que ocurra un fuerte sismo, se presenta una serie de pequeños sismos, conocidos como precursores (Hough 2010). Por medio de la instalación de múltiples equipos para detectar estos movimientos, se recopilan diferentes datos acerca de los eventos que surgen y se analizan con detalle para determinar características y comportamiento. El número de instrumentos de registro sísmico, como acelerómetros y acelerógrafos, se ha incrementado rápidamente, y por ende la cantidad de datos obtenidos. Esto requiere mayor procesamiento y buena organización de los datos (Havskov y Ottemoller 2010).

Muchos fabricantes incluyen software en sus equipos, pero en ocasiones es solo para pasar del instrumento hacia la computadora. Los eventos sísmicos se registran en sismogramas, a partir de los cuales se obtienen diversos datos de cada evento: latitud, longitud, profundidad, hipocentro, su proyección hacia la superficie o epicentro y el comportamiento de las ondas sísmicas. A estos sismogramas se les deberá aplicar otro tipo de procesamiento, para ofrecer resultados más complejos y precisos (Havskov y Ottemoller 2010). Por lo anterior, en este trabajo se detalla el estudio de 22 aplicaciones de software empleadas para el procesamiento sísmico, con la finalidad de determinar la conveniencia de la creación de una nueva, con base en las necesidades existentes.

METODOLOGÍA

El trabajo inicia con el estudio de grandes sismos ocurridos en años recientes en AL: el de México que

sirvió como detonante de la ingeniería sísmica, el de Haití por ser el que más vidas ha cobrado, seguido por el de Chile que produjo además un Tsunami y finalmente el de Japón, por ser el más costoso de la historia. Se describen los principales daños causados, citando decesos y costos asociados.

Posteriormente, se analiza el avance de la ingeniería sísmica en México, que a raíz del sismo devastador de 1985, detona su desarrollo formal. Se incorporan a la tarea múltiples instituciones académicas y gubernamentales que adquieren equipos para el registro sísmico y computadoras para acelerar la obtención de resultados. En esta época se presenta el auge de tecnología de cómputo, lo que contribuye al procesamiento automatizado de datos. Por lo anterior, el uso de computadoras no solo es imperante sino que su eficacia depende también de la elección adecuada de un sistema de cómputo, que permita aplicar diversas funciones a los datos recopilados en cada evento sísmico.

Finalmente, se efectúa el análisis de 22 aplicaciones de software especializadas en esta tarea y creadas en un período de 40 años. Con el fin de evaluar la conveniencia de su uso se revisaron los siguientes criterios: país donde fueron creadas, funciones que realizan, el costo que implica utilizarlas, las plataformas de cómputo donde pueden emplearse, incluyendo los sistemas operativos que requieren, además de determinar si comparten la filosofía de código abierto.

RESULTADOS

1. Impacto socioeconómico de los sismos

El 19 de septiembre de 1985 un terremoto de magnitud (M_w) 8.1 sacudió México. Se calcula que el monto de pérdidas totales ascendió a 4.100 millones de dólares. Entre los rubros más afectados están los edificios de la administración pública (34%), vivienda (15.7%) y salud (15.4%). Una de las primeras medidas adoptadas durante el proceso de reconstrucción fue el diseño de estándares más estrictos de construcción; estos generaron a su vez nuevos códigos de construcción, poniendo como exigencia la revisión de los parámetros de sismo-resistencia de todos los edificios públicos (Bitrán 2001).

El 12 de enero de 2010 se presentó un sismo en Haití (M_w 7.1) donde fallecieron alrededor de 270.000 personas (Alfaro y Van Hissenhoven 2010). Se contabilizaron 350.000 heridos, la destrucción del 60% de la infraestructura del gobierno, daños en unas 200.000 casas y más 1.5 millones de personas damnificadas; las pérdidas ascendieron a 7,800 millones de dólares aproximadamente, equivalente al 120% de su producto interno bruto en 2009 (Arévalo *et al.* 2011). El aspecto más impactante de este terremoto es que puso en evidencia la completa ausencia de diseño sísmico en las construcciones, desde casas informales hasta edificios recientes en el centro de la capital: Puerto Príncipe. Fierro y Perry (2010) afirman que no existe ningún tipo de licenciamiento ni código de construcción para arquitectos, constructores o ingenieros.

El sábado 27 de febrero de 2010 Chile se vio sorprendido por un sismo (M_w 8.1), que causó un tsunami. Fue percibido desde la Región de Antofagasta, ubicada al norte del país hasta la Región de Los Lagos a 2,200 km al sur. Afectó a 13 millones de personas, aproximadamente el 80% de la población (López y Santana 2011). El sismo causó 524 muertes y 31 personas desaparecidas, de las cuales 150 se debieron al tsunami. Este terremoto indica que se trató de una liberación extraordinaria de energía del interior de la corteza terrestre, constituyéndose en el quinto sismo de mayor magnitud que se ha registrado en la historia de la humanidad (Romero *et al.* 2011).

Se destruyeron 81,444 viviendas, de un total de 370.051 que sufrieron daños considerables y afectaron la infraestructura de escuelas, caminos, puentes, aeropuertos y vías férreas. En relación con los hospitales, 135 (73% del total del país) fueron afectados, 10 quedaron completamente destruidos y 33 severamente dañados, pero recuperables. Los costos para la reconstrucción en el sector salud sumaron alrededor de \$251 millones de dólares (López y Santana 2011).

El terremoto de Tohoku, Japón en marzo de 2011 (M_w 9.0), tuvo una sacudida sísmica intensa y el impacto del tsunami desencadenó simultáneamente colapso de infraestructuras, inundaciones, incendios, pérdidas de miles de vidas humanas, interrupción de los servicios básicos (acueducto, energía eléctrica, comunicaciones), emergencia por posible radiación ionizante y afectación a la economía global. Japón atravesó la crisis más grande desde la segunda guerra mundial; de manera preliminar se estimó que los costos de este evento superaron los 300.000 millones de dólares (Sánchez y Clavijo 2011). El balance de víctimas era de más de 12.000 fallecidos y 15.000 desaparecidos.

A esas cifras, enormes para un país desarrollado, hay que sumar otras no menos impresionantes: 165.000 personas alojadas en refugios, 260.000 hogares sin agua corriente, 170.000 viviendas sin electricidad y 70.000 personas evacuadas del perímetro de 20 km alrededor de la central de Fukushima (Bustelo 2011).

Es claro que se ha tratado de la tragedia natural más costosa de la historia. A finales de marzo, el gobierno japonés estimó la destrucción de capital físico (infraestructuras, fábricas y viviendas), en una cifra situada entre 198.000 y 308.000 millones de dólares, entre el 3.3% y el 5.2% del PIB. Hay que tener en cuenta que esa estimación se refiere únicamente a los daños en el capital y excluye la merma en la producción (Bustelo 2011).

América Latina posee un condicionante geológico-espacial que produce en la región, terremotos con grave riesgo sísmico. Estos fenómenos se deben a la convergencia de placas tectónicas que generan una zona de subducción. En el continente americano, las placas de Cocos, Nazca y Caribe chocan permanentemente con la placa continental, produciendo gran inestabilidad en las costas del Pacífico y la región del Caribe (Dehays 2002).

La franja de sismicidad más importante en el continente americano se encuentra en la periferia del Océano Pacífico y comprende Patagonia y Chile en América del Sur, Centroamérica, parte occidental de México, Estados Unidos, Canadá y Alaska. Así mismo, es una zona sísmica que se caracteriza por actividad volcánica intensa, perteneciente al Cinturón de Fuego del Pacífico, o simplemente Cinturón Circunpacífico (CENAPRED 2008).

En estas zonas, los países que pueden destacar como lugares donde ocurren mayormente los eventos sísmicos son: México, Guatemala, El Salvador, Haití, Nicaragua, Colombia, Ecuador, Perú, Chile y Argentina.

2. Estudio de los sismos en México

El primero de abril de 1904 se reunieron en Estrasburgo, Francia, dieciocho países, entre ellos México, con el fin de crear la Asociación Sismológica Internacional y mejorar la instrumentación sísmica a nivel mundial. Para cumplir con los compromisos adquiridos en esa reunión, el gobierno mexicano decreta la fundación del Servicio Sismológico Nacional (SSN), el 5 de septiembre de 1910 el cual queda a cargo del Instituto Geológico Nacional. De esta manera entre los años 1910 y 1923 se instalan en el país las primeras nueve estaciones sismológicas. En 1929 el SSN pasó a ser parte de la Universidad Autónoma de México (UNAM) y desde 1948 su central

quedó adscrita al Instituto de Geofísica de la UNAM (Alcántara y Valdés 2010).

A raíz del sismo de 1985, en México se establece un profundo cambio con relación al estudio del fenómeno y a la forma de medirlo. Hoy en día la infraestructura de observación sísmica del país es mucho mejor, pero existen regiones con poca o nula cobertura instrumental, lamentablemente con el potencial para que se generen sismos intensos, o que sin tenerlo se puedan ver afectadas. De tal manera que los esfuerzos futuros de corto y mediano plazo deberán enfocarse en contar con una Red Sísmica Mexicana de cobertura nacional (Alcántara y Valdés 2010). Esto implica no solo la instrumentación de las zonas más proclives a sufrir estos eventos, sino también la inversión en tecnología para la obtención, análisis y procesamiento de datos que los sismos proporcionan, con el objetivo de generar mayor conocimiento.

Las actividades anteriores son efectuadas en su mayoría por dependencias gubernamentales y entidades académicas de las regiones más afectadas, entre las que se puede mencionar a el Servicio Sismológico Nacional (Valdés y Quintanar 2010), la Universidad Autónoma de México (Sandoval *et al.* 2012), el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (Fregoso y García 2011), el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED 2008) y la Universidad Veracruzana (Riquer *et al.* 2010), entre otros.

Esto explica por qué los recursos se destinan principalmente a la adquisición de equipos de instrumentación, mientras que otros conceptos, como el software para el procesamiento de los datos, pasan a segundo plano. De ahí la importancia de generar aplicaciones especializadas de bajo costo, acordes con las necesidades de los usuarios.

3. Sistemas de cómputo para el procesamiento de sismos

Es de gran relevancia el software empleado para procesar los eventos sísmicos. Elegir cuál es el más adecuado para el usuario depende de muchos factores, comenzando por conocer cuáles son las características y alcances de las aplicaciones disponibles hasta la posibilidad de desarrollar un sistema propio.

Se hizo el estudio y análisis de 22 aplicaciones de software utilizadas desde 1970 a la fecha. Si se hace un estudio cronológico del software para el procesamiento de sismos, se observa que en un período de 20 años comprendido entre 1971 a 1991, se crearon tres aplicaciones. En los siguientes 10 años se desarrollaron nueve programas de software, que representan el 41% de la producción total y en la siguiente

década surgieron 10 nuevos productos, consiguiendo ser la época de mayor producción, con el 45%. Es necesario notar que a partir de 1990 desciende el costo de los equipos de cómputo y a la vez se multiplican los lenguajes de programación, estos hechos impulsaron en gran medida los avances que se hicieron en este sentido (Tabla 1).

Este análisis ha tomado en consideración solo las aplicaciones de software desarrolladas en países de América y Europa. No se incluyeron otros (por ejemplo, India y Japón), pues se carece de información relativa a su uso y aplicación en México y AL. Examinando la Tabla 1 se nota que Estados Unidos se destaca como el mayor generador de software con nueve aplicaciones, seguido de Canadá con tres. AL tiene participación escasa y contribuye sólo con dos productos. Del resto de países participantes, se percibe la presencia de un solo programa de software para cada uno de los siguientes: Alemania, Francia, Italia, Noruega, Suiza y el Reino Unido.

A continuación, se procedió a analizar el tipo de funciones que las aplicaciones desarrollan, las cuales se clasificaron en dos grupos: las básicas y las especializadas. Las funciones básicas son aquellas que realizan la mayoría de los programas y tienen que ver con la obtención de los datos iniciales, la corrección de errores de captura y la aplicación de algunos filtros típicos. Se realizó un examen de las funciones de mayor complejidad en las aplicaciones, como son: el cálculo de Espectro, Transformada de Fourier, cálculo de espectro de potencia y respuesta, entre muchas otras incluidas en la Tabla 2.

Se hace notar que existen estudios que requieren procesamiento específico en ciertas áreas, como las orientadas a la ingeniería petroquímica o de exploración minera, para las que solo se puede hacer uso de uno o dos sistemas de software (como son Seisware y Promax).

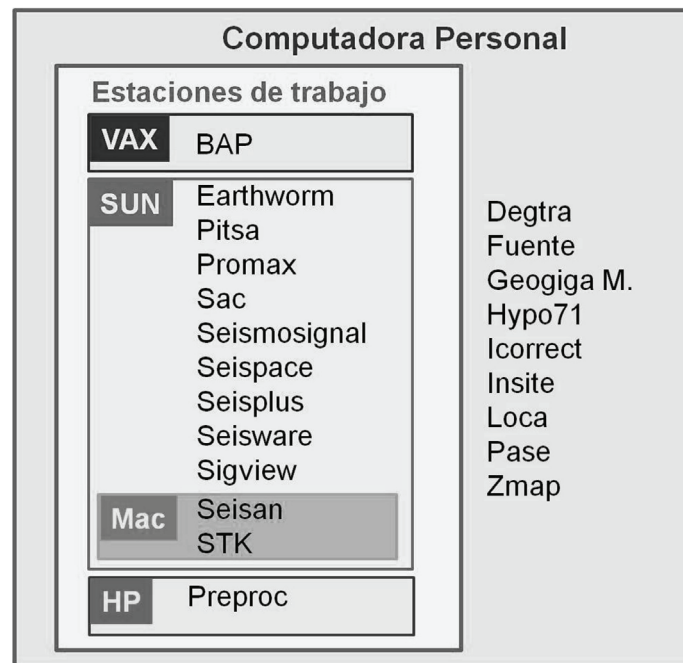
Otro criterio de análisis contempla el lenguaje de programación empleado para el desarrollo de las aplicaciones. Como resultado del descenso en el costo de los equipos de cómputo, creció su diversidad y en consecuencia, se diversificaron también los sistemas operativos. La programación de las aplicaciones pasó de ser una tarea exclusiva de los científicos dedicados al estudio de los sismos, a una en la que deberían participar los especialistas en cómputo. Debían incluirse soluciones matemáticas y de cálculo, además de incorporar nuevos requerimientos como interfaces gráficas amigables y el uso de dispositivos de apoyo como el ratón. De esta manera, se logra facilitar a los usuarios no familiarizados con las computadoras y mucho menos con la programación, el uso y explotación de las capacidades del software.

Tabla 1. Aplicaciones para el procesamiento de sismos
Table 1. Applications for earthquakes processing

Año	Nombre	Creador	Origen	Referencias
1971	Hypo71	USGS	EU	(Lahr, 2012)
1985	Pase	PUCP	Perú	(Quiun, 1985)
1990	Preproc	ISOP	EU	(Orfeus, 2012)
1992	BAP	USGS	EU	(Converse, 1992)
1993	Earthworm	USGS	EU	(Instrumental, 2012)
1993	Sac	Lab. Lawrence Livermore	EU	(US, 2012)
1994	Pitsa	Universidad de Munich	Alemania	(Synapse, 2012)
1994	Promax	Landmark-Halliburton	EU	(Halliburton, 2012)
1994	Seispace	Landmark-Halliburton	EU	(Halliburton, 2012)
1994	Zmap	Stefan Wiemer	Suiza	(Centro, 2012)
1997	Seisware	Seisware International Inc.	Canadá	(Seisware, 2012)
2001	Seisan	Universidad de Bergen	Noruega	(Geotechnical, 2012)
2002	Degtra	UNAM	México	(Ordaz, 2004)
2002	Fuente	UPM	España	(Fundación, 2012)
2002	Loca	UPM	España	(Fundación, 2012)
2002	Seismosignal	Seisrosoft	Italia	(SeismoSoft, 2012)
2002	STK	Dominique Reymond	Francia	(SourceForge, 2012)
2003	Seisplus	LLC	EU	(Geotechnical-2, 2012)
2003	Sigview	SignalLab	EU	(SignalLab, 2012)
2005	Geogiga M.	Geogiga Technology	Canadá	(Geogiga, 2012)
2008	Icorrect	Univ.Oeste de Ontario	Canadá	(Engineering, 2012)
2012	Insite	Applied Sesimology Cons.	Reino U.	(ASC, 2012)

Tabla 2. Funciones específicas para el procesamiento de datos sísmicos
Table 2. Specific functions for processing seismic data

Funciones Específicas	Nombre
Correlación cruzada y de espectros de respuesta lineal y no lineal	Degtra
Espectro de Fourier y/o respuesta	BAP, Geogiga Microtremor, Icorrect, Seismosignal, Seisplus, Sigview, STK
Espectro de frecuencia	Insite, STK
Espectro de potencia y de respuesta elástica	Seismosignal
Intensidad de Arias	Degtra, Seismosignal
Magnitud de un sismo	Loca
Magnitud del manto/momento sísmico/ transformada de Hilbert	STK
Tiempos pico y amplitudes	Earthworm
Velocidad y desplazamiento de serie de tiempo	BAP
Descomposición espectral/ Evaluación de funciones de transferencia	Seisware
Hipocentros, magnitudes y primeros movimientos de sismos locales.	Hypo71, SeisPlus
Operaciones de integración/derivación	Degtra, STK
Extracción de ondeletas	Seisware
Integración, derivación, cálculo de espectros de amplitud de Fourier	Degtra, Geogiga Microtremor, Seisplus, Sigview, STK
Transformada rápida de Fourier FFT	Degtra, Pase, Sac, Seisplus, Sigview
Series de tiempo de aceleración de movimientos del suelo	Degtra, Icorrect
Tomografía de refracción	Geogiga Microtremor
Procesamiento de reflexión/refracción/ de ondas de superficie	Geogiga Microtremor

Figura 1. Plataformas de las aplicaciones**Figure 1.** Applications platforms

Mención aparte requiere la filosofía de finales de los 90's sobre la creación de software conocido como de código abierto (*open source*, en inglés), que manifiesta los beneficios de compartir el código entre usuarios interesados, para que puedan contribuir con revisiones, correcciones y mejoras al mismo, de manera que el software evolucione rápidamente.

En la actualidad hay múltiples arquitecturas de cómputo y diversos sistemas operativos para las mismas, ambos son factores de peso y deben considerarse con detenimiento antes de elegir la aplicación de procesamiento de sismos que mejor se adapte al usuario. Si el financiamiento no es un impedimento, se pueden adquirir equipos de mayor tamaño como las estaciones de trabajo. Para este tipo se emplean sistemas operativos como SUN Solaris o HP UX. Cuando los recursos financieros son limitados,

se puede optar por el uso de computadoras personales, que utilizan sistemas operativos como Windows o MAC, en la categoría de sistemas con licencia o Linux y sus derivados, en la categoría de software libre. Esta descripción se muestra de manera gráfica en la Figura 1.

Es importante tener en cuenta que al elegir determinada plataforma y sistema operativo, se debe cubrir el costo de la licencia de este último así como la del software para el procesamiento de sismos, adicional al devengado por el equipo de cómputo donde se implantará. Dependiendo de los recursos disponibles, se puede optar por adquirir software que tiene derechos de autor o licencia y debe ser comprado, o emplear software libre o de código abierto, para modificarlo y adaptarlo a los requerimientos propios (Tabla 3).

Tabla 3. Programas de cómputo y su costo

Table 3. Computer programs and their cost

SOFTWARE					
Con costo	Nombre	Precio	Sin costo	Nombre	Lenguaje de desarrollo
	Insite	(Sin especificar)		Bap 1.0	Fortran
Promax ←	(Sin especificar)	Degtra	Fortran, Vfortran		
Seispace ←	(Sin especificar)	Earthworm ←	C, Oracle		
Zmap	MatLab® \$2000 €	Fuente	MatLab®		
Seisplus ←	(Sin especificar)	Hypo71	Fortran		
Geogiga -		Icorrect	Fortran, Compaq Vfortran		
Microtremor	(\$490 USD)	Loca 1.0	MatLab®		
Seismosignal	(\$60€)	Pase	Fortran 77		
Seisware	(\$9,500 CAD)	Pitsa	C		
Sigview	(\$ 139 USD – 1 PC \$1,290 USD – 1 sitio)	Preproc	C		
← Software de Código Abierto (<i>Open Source</i>)			Sac	C, Fortran	
		Seisan	C, Fortran		
		STK ←	GTK+		

Algunos usuarios, como los que se dedican a la exploración y explotación petrolera y minera, disponen del capital necesario para invertir en toda la infraestructura que requieren, pero hay otros, como algunas instituciones académicas o gubernamentales, que no cuentan con grandes fondos y deben ahorrar en todos los rubros posibles. En la Tabla 3 se muestran las opciones que brindan las 22 aplicaciones bajo estudio, con relación al software con algún costo, derivado de la licencia propia, por el uso de algún otro lenguaje con licencia, como bases de datos asociadas (Oracle, por ejemplo), aplicaciones específicas como MatLab®, o el propio entorno de desarrollo para el caso de los ambientes visuales. En el caso particular de los que pertenecen al grupo de software de código abierto, permiten al usuario desarrollar algunas funciones para resolver problemas específicos, así como acceder a los grupos de trabajo colaborativo que brindan soporte en el desarrollo de esas aplicaciones.

Cabe aclarar que algunas de las aplicaciones que no demandan algún tipo de cobro, tampoco ofrecen al usuario soporte técnico o la posibilidad de modificar el código para adaptarlo a sus necesidades particulares. En la Tabla 3 no se especifica el costo de cuatro productos de software, debido a que durante la investigación no se tuvo acceso a esta información. Los productos de mayor costo y actualmente vigentes, disponen de poderosas interfaces gráficas que facilitan la presentación de resultados, así como de múltiples funciones específicas, que no poseen la mayoría de los programas.

En síntesis, se puede decir que las aplicaciones bajo estudio se crearon entre 1970 y 2011. En la primera

década solo aparece un producto; en los 80's la producción sigue siendo muy escasa, pues solo se generan dos programas más. Es a partir de la tercera década que se incrementa de manera notable el número de aplicaciones, siendo ocho los registrados en los 90's y once en el último período. Respecto al origen de las aplicaciones, Estados Unidos destaca como el principal productor con el 41% del total, Canadá con el 13% y AL con el 10%. Respecto a Europa, España es el que tiene mayor participación (13%); de manera global el continente aporta el 36% de todos los productos.

Con respecto al costo de las aplicaciones, casi la mitad del software revisado involucra algún desembolso asociado. El 40% demanda el pago de licencia, contra un 60% que no lo requiere. Si se opta por el procesamiento únicamente con aplicaciones sin costo, entonces deberán emplearse varias para poder complementarse entre sí. Con relación a las características de procesamiento, son justamente las aplicaciones que se adquieren mediante una licencia las que más funciones realizan, incluyendo tareas de mayor complejidad y la capacidad de potentes despliegues gráficos de alta calidad.

Relativo al lenguaje de programación utilizado para crear el software, de las nueve aplicaciones que requieren pago de licencia, solo una informa que ha sido elaborada con MatLab®, las demás no proporcionan información sobre este rubro. Concerniente a las trece aplicaciones que no requieren pago, la mayoría utiliza para su creación lenguajes también sin costo, excepto dos aplicaciones que de manera similar emplean MatLab®, así como otra que requiere Oracle® para la creación de su base de datos.

Al considerar la plataforma de trabajo, se aprecia que todas las aplicaciones de software pueden implantarse en computadoras personales, pero sólo 13 pueden también hacerlo en arquitecturas superiores como las estaciones de trabajo; éstos son equipos de mayor potencial de procesamiento y almacenamiento, pero también de mayor costo. La plataforma no solo se limita al equipo físico, sino que además incluye al sistema operativo, lo que implica agregar el costo respectivo.

CONCLUSIONES

América Latina es una zona con alto nivel de sismicidad y naciones como México, Guatemala, Colombia, Perú, Argentina y Chile, entre otros, sufren sismos con regularidad. Los gobiernos de estos países deben enfrentar continuamente los costos asociados a este tipo de tragedias, por lo que el estudio de los sismos es parte de sus planes de desarrollo y se apoya en muchas ocasiones en diversas instituciones académicas. Estas deben invertir en equipos de registro sísmico para así instrumentar el mayor número de zonas posibles. Una vez recopilados los datos es necesario procesarlos con rapidez, por lo que las herramientas de cómputo deben ser capaces de ofrecer resultados precisos y concretos, para facilitar la toma de decisiones en los planes de protección civil.

Debido a que los recursos orientados a investigación no son siempre suficientes, el disponer de programas de cómputo potentes no se había considerado un área prioritaria. Durante décadas se optó por emplear aplicaciones libres o gratuitas. Ante el inminente incremento del volumen de datos recopilados sobre sismos, se hace patente la necesidad de desarrollar software para atender los progresivos requerimientos de velocidad y procesamiento. Diversas instituciones han participado en el desarrollo de programas de cómputo, pero sin lograr que esta actividad se consolide en AL. En este estudio se hace evidente, que el tiempo aproximado para generar un programa de software aplicado al procesamiento de sismos, es de casi dos años. Esto significa que si son insuficientes los esfuerzos encaminados al estudio de los sismos en sí, aún más lo son, aquellos específicamente dedicados a la creación de software para esta área.

Algunos de los factores que han intervenido para que esta situación prevalezca son: la acelerada evolución de los equipos de cómputo y la reducción en sus costos. Esto simplifica su adquisición y conlleva a la producción masiva de datos a procesar, casi de manera inmediata. Lo anterior demanda el empleo de software

especializado que integre funciones sistematizadas, con potentes interfaces gráficas para facilitar su manejo y la generación de información en diversos formatos, que facilite la compatibilidad con otras aplicaciones y plataformas.

Este software puede obtenerse de dos formas: por medio de la adquisición del mismo o a través del desarrollo de uno propio. La adquisición implica un desembolso económico que no todas las instituciones pueden afrontar. La segunda opción parece ser la más viable. No obstante, esta tarea ya no puede ser efectuada por los especialistas en sismos quienes solían elaborar sus propios programas; ahora deben apoyarse en los especialistas en el desarrollo de software. Sin embargo, esta colaboración no es tan sutil como se esperaría pues existe una brecha que dificulta la implementación de las soluciones que se requieren.

Para resolver esta situación se deben atender diferentes aspectos, entre los que destacan: ampliar los recursos asignados a las dependencias de investigación, facilitar la colaboración entre los expertos de cómputo y los de otras ramas de la ciencia, con el fin de favorecer el desarrollo de nuevos algoritmos en la solución de problemas conocidos. Estimular la educación de los sismólogos en el uso de tecnologías y metodologías de cómputo y fortalecer la colaboración interdisciplinaria, con el fin de expandir la infraestructura necesaria para el procesamiento del cada vez mayor volumen de datos sísmicos generados. Con ello no solo se promueve la generación de nuevo conocimiento, sino que se puede ofrecer a la sociedad nuevas soluciones a problemas añejos, cuyos efectos implican grandes pérdidas a la nación que las sufre.

Hay avances, pues día a día surgen nuevas aplicaciones de software para diferentes ramas del estudio de los sismos, como: el estudio de sus efectos en monumentos históricos (Ucol 2013), la simulación de su impacto (Agencia 2012), la cuantificación del riesgo urbano (Revista 2010) y varios más enfocados a la difusión de ocurrencia de eventos en zonas específicas, como las ciudades de Chile (By Martin 2011), Baja California (Todos 2012), la Ciudad de México (CNN 2012, Sandoval *et al* 2012) o de todo el mundo (Wolton.Net 2007).

Con esto, se puede afirmar que el desarrollo de aplicaciones de software para procesamiento de datos sísmicos, es un área de oportunidad para que las instituciones académicas desarrollen una estrecha colaboración con sus especialistas en cómputo, y con ello incrementar la creación de productos de software.

CONTRIBUCIONES FUTURAS

La Universidad Autónoma de Baja California se encuentra localizada en el estado del mismo nombre y cuenta con tres campus: Ensenada, Tijuana y otro en la capital del estado: Mexicali. El Valle de Mexicali es un sitio con alta sismicidad, debido a las fallas de Cerro Prieto e Imperial, que presentan gran actividad y que dan lugar a un centro de dispersión, donde se ubica el campo geotérmico de Cerro Prieto (Magaña 2011). El movimiento telúrico del 4 de abril de 2010 (M_w 7.2), se considera uno de los eventos sísmicos de mayor relevancia, ya que además de provocar daños al sistema hidráulico y agrícola del Valle de Mexicali, evidenció una vez más el importante potencial geotérmico de la zona, originando la presencia de fumarolas en la Sierra Cucapah (Alvarez *et al.* 2012).

A raíz de esta tragedia surge el interés de participar de manera más activa en el estudio de los sismos y con este fin, se inicia la instrumentación sísmica de la zona. También se plantea el desarrollo de un sistema de software para el procesamiento de registros sísmicos obtenidos. Actualmente se está trabajando en dicha aplicación, por lo que ya se han diseñado algunos algoritmos y procedimientos que se encuentran bajo implementación. Este software será sin costo para que pueda ser accesible a cualquier tipo de público interesado en su uso. Inicialmente, podrá implantarse en cualquier computadora personal, por ser la plataforma de uso más extendido en México y se le ha dotado de una interfaz gráfica amigable con el usuario. Se obtendrá pronto una versión final accesible a la comunidad académica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcántara, L., Valdés, C. (2010): *La observación sísmica en la UNAM y su integración a la Red Sísmica Mexicana*. UNAM Revista Digital Universitaria (Fenómenos geológicos). - **11** (1): 1 - 8.
- Alfaro, A., Van Hissenhoven, R. (2010): *Sismo de Haití: Aspectos sismológicos*. Revista Épsilon - **14**: 113 – 120.
- Álvarez, J., Camacho, J., Gallardo, V., Macías, G., Herrera, D. (2012): *Características geológicas preliminares de la nueva zona termal Cucapah en el Valle de Mexicali, B.C., México*. Geotermia Revista Mexicana de Geoenergía. – **25** (2): 21 – 27.
- Arévalo, A., Montañón, A., Sotelo, I. (2011): *La asociación internacional de fomento en la recuperación de Haití*. (Trabajo) 41 páginas, Universidad de La Sabana, Instituto de Posgrados, Especialización en finanzas y negocios internacionales. Colombia.
- Betbeder-Matibet, J. (2008): *Seismic engineering*. 448 p. First English Edition. USA, John Wiley & Sons.
- Bitrán, D. (2001): *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-99*. 110 p. Serie Impacto Socioeconómico de los desastres en México. CENAPRED.
- Bustelo, P. (2011): *El terremoto de Tohoku (Japón) de marzo de 2011: implicaciones económicas*. Revista del Real Instituto Elcano de Madrid ARI – **72** (2011): 1 - 5.
- Castaños, H., Lomnitz, C. (2012): *Earthquake Disasters in Latin America: A Holistic Approach*. 65 p. México, D.F. Springer Briefs in Earth Sciences.
- CENAPRED. (2008): *Sismos: Serie Fascículos*. 44 p. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Gobierno Federal de México.
- Converse, A. (1992): *BAP: BASIC strong-motion accelerogram processing software*. U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey: Books and Open-File Report 92-296-A – 1 - 180.
- Dehays, J. (2002): *Fenómenos naturales, concentración urbana y desastres en América Latina*. México, D.F: Perfiles Latinoamericanos - (**20**): 177 - 206
- Fierro, E., Perry, C. (2010): *Preliminary Reconnaissance Report 12 January 2010 Haiti Earthquake*. Berkeley, CA, USA. The Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) - 1-12.
- Fregoso, E., García, J. (2011): *A possible seismomagnetic precursor of the El Mayor-Cucapah earthquake (M_w 7, 2) of April 4, 2010, Baja California, México*. Geofísica Internacional - **50**(2): 211 - 225.
- Havskov, J., Ottemoller, L. (2010): *Routine Data Processing in Earthquake Seismology: With Sample Data*. 380 p. Springer.
- Hough, S. (2010): *Predicting the Unpredictable: The Tumultuous Science of Earthquake Prediction*. 272 p. Princeton University Press.
- López, E., Santana, P. (2011): *El terremoto de 2010 en Chile: respuesta del sistema de salud y de la cooperación internacional*. Revista Panamericana de Salud Pública - **30**(2):160 – 166.

- Magaña, A. (2011): *4 de abril Mexicali, después del terremoto*. 199 p. Editorial Las Ánimas.
- Ordaz, M., Montoya, D. (2004): *Programa DEGTRA A4 versión 4.0.8*. Reporte. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Quiun, D. (1985): *Implementación de un sistema para el proceso automático de señales sísmicas*. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Perú. Lima, Perú.
- Riquer, G., Williams, F., Lermo, J., Torres, G., Leyva, R., Guzmán, A., Trejo, F. (2010): *Estudios preliminares de microzonificación sísmica para la ciudad de Coatzacoalcos, Ver.* Memorias de la XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, (1): 241 - 245. Acapulco, Guerrero, México.
- Romero, H., Fuentes, C., Smith, P. (2011): *La Geografía de los Riesgos "Naturales" y el Terremoto de Chile del 27 de febrero de 2010* – En: Bocco, G., Urquijo, P., Vieyra, A. (eds.) *Geografía y ambiente en América Latina*, p. 251-282, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) e Instituto Nacional de Ecología (INE), México.
- Sánchez, J., Clavijo, J. (2011): *Aspectos científicos y lecciones para Colombia luego del sismo de Tohoku, Japón, en marzo 11 de 2011 (M_w 9.0)*. Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia. *Geología Colombiana* - **36** (1) - Edición Especial. 23 - 35.
- Sandoval, H., Alcántara, L., Arroyo, D., Delgado, M., Ordaz, M., Pérez, C., Quiroz, A., Ruiz, A. (2012): *Generación de mapas de intensidades sísmicas en tiempo real para el territorio nacional*. Gaceta del Instituto de Ingeniería de la UNAM. - (78): 14 - 16
- SEISWARE International Inc. (2010). *Corporate Brochure*.
- Valdés, C., Quintanar, L. (2010): *Redes sísmicas. 100 años del servicio sismológico nacional: la importancia de las redes sísmicas en el conocimiento de los sismos y su mitigación*. *Geos* - **30**(1): 163 - 165.
- Agencia de Noticias Punto X Punto. (2012), Crean investigadores Hidalguenses simulador sísmico <http://puntoporpunto.mx/archives/77852> (Último acceso enero 2013)
- ASC Applied Seismology Consultants. (2012). InSite software, <http://www.seismology.org/> (Último acceso septiembre 2012)
- By Martin: Software y Diseño como un todo. (2011), Sismos en Chile for Iphone
<http://www.by-martin.com/productos/sismos-en-chile-para-iphone/> (Último acceso enero 2013)
- Centro de Geociencias de la UNAM. (2012). Una breve introducción al paquete ZMAP y al lenguaje MATLAB, <http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/introZMAP.html> (Último acceso agosto 2012)
- CIGA: Centro de investigación en geografía ambiental (2012). Descarga del libro Geografía y Ambiente en América Latina http://www.ciga.unam.mx/ciga/index.php?option=com_remository&Itemid=462&func=showdown&id=48 (Último acceso octubre 2012)
- CNN México. (2012), Alerta Sísmica del DF, para Blackberry <http://mexico.cnn.com/tecnologia/2012/04/13/alerta-sismica-del-df-para-blackberry> (Último acceso enero 2013)
- Engineering Seismology Toolbox. (2012). Program: ICORRECT, <http://www.seismotoolbox.ca/ICORRECT/ICORRECT.pdf> (Último acceso septiembre 2012)
- Fundación J. García-Siñeriz. (2012). Descargas de Loca 1.0 y Fuente 1.0, <http://www.minas.upm.es/fundacion/jgs/ESP/descargas.html> (Último acceso mayo 2012)
- Geogiga Technology Corp. (2012). Geogiga Microtremor Software, <http://www.geogiga.com/en/index.php> (Último acceso junio 2012)
- Geotechnical Instruments LLC. (2012). SEISAN: The earthquake software - Version 7.2, http://www.geoinstr.com/pub/manuals/seisan_7.2.pdf (Último acceso mayo 2012)
- Geotechnical-2 Instruments, LLC. (2012). Seisplus v4.9: Interactive Seismological Data Processing Package, <http://www.geoinstr.com/pub/manuals/seisplus.pdf> (Último acceso agosto 2012)
- Halliburton. (2012). SeisSpace Software for ProMAX Applications, <http://www.halliburton.com/ps/default.aspx?pageid=874&prodid=MSE::105545143366753#sysreq> (Último acceso agosto 2012)
- Instrumental Software Technologies Inc. (2012). Earthworm 7.3 Released, <http://www.isti.com/earthworm-7-3-released> (Último acceso agosto 2012)
- Pontificia Universidad Católica de Perú. Investigaciones Teóricas en Estructuras en la PUCP. (2012), <http://>

- departamento.pucp.edu.pe/ingenieria/images/documentos/seccion_civil/Civil%20eventos/nvestigacionesTeoricasEnEstructurasSandraSantaCruz.pdf (Último acceso septiembre 2012)
- Lahr, John. (2012). The HYPO71 Earthquake Location Program, <http://www.jclahr.com/science/software/hypo71/8517.html> (Último acceso septiembre 2012)
- ORFEUS: Observatories and Research Facilities for European Seismology. (2012). PREPROC -The IASPEI PC Shareware Library 2nd Edition, <ftp://www.orfeus-eu.org/pub/software/iaspei.pcsl/pcslinfo.txt> (Último acceso junio 2011)
- Revista Andalucía Investiga, Innova Press. (2010), Desarrollan un software que permitirá una respuesta inmediata tras un terremoto <http://www.andaluciainvestiga.com/espanol/noticias/5/9959.asp> (Último acceso enero 2013)
- SeismoSoft. (2012). Earthquake Engineering Software Solutions, <http://www.seismosoft.com/shop/pc/viewPrd.asp?idcategory=&idproduct=10> (Último acceso mayo 2012)
- Signal Lab. (2012). What is Sigview?, <http://www.sigview.com/index.htm> (Último acceso julio 2012)
- SourceForge.Net. (2012). STK : Seismic ToolKit written with GTK, <http://seismic-toolkit.sourceforge.net/> (Último acceso junio 2012)
- Synapse Science Center. (2012). Notes on PITSA 4.5 with PITSA client library, <http://www.synapse.ru/index.php?id=87> (Último acceso julio 2012)
- Todos @CICESE. (2012), Lanza aplicación con información sísmica de RESNOM para iPhone http://todos.cicese.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=373:lanzan-aplicacion-para-iphone-con-informacion-sismica-de-resnom&catid=9:brevia (Último acceso enero 2013)
- UCOL: Universidad de Colima. Dirección General de Información. Boletines de Prensa informativos. (2011), Desarrolla científico universitario software para analizar efectos de sismicidad en edificios históricos <http://www.ucol.mx/boletines/noticia.php?id=11416> (Último acceso enero 2013)
- U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information. (2012). A status report on the development of SAC2000: A New Seismic Analysis Code, <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/110248-6DPzs3/webviewable/110248.pdf> (Último acceso julio 2011)
- Wolton.Net. (2007) Earthquake 3D <http://www.wolton.net/quake.html> (Último acceso enero 2013)