

Recálculo de la relación entre la aceleración pico efectiva y pico para sismos registrados en Costa Rica entre 1983 y 2019

Recalculation of the relationship between effective peak ground and peak ground accelerations for earthquakes recorded in Costa Rica between 1983 and 2019

Diego A. Hidalgo-Leiva*, Víctor Schmidt-Díaz y Aarón Moya-Fernández

Universidad de Costa Rica, Laboratorio de Ingeniería Sísmica

*Autor de contacto: diego.hidalgo@ucr.ac.cr

(Recibido: 21/10/2019; aceptado 7/02/2020)

RESUMEN: En el presente estudio se realiza un cálculo de la relación que existe entre la aceleración pico efectiva (a_{ef}) y la aceleración pico del terreno (PGA), utilizando la base de registros acelerográficos del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica, con registros de eventos entre 1983 y 2019. Se analizan 5 casos específicos, para lo cual se emplean dos criterios en la selección de los registros: i) 2 niveles de aceleración horizontal máxima (2cm/s^2 y 100cm/s^2) y ii) la tecnología de los equipos que registraron el movimiento (Analogico, Digital o una combinación). Los resultados muestran que existe influencia en los valores medios de la relación a_{ef}/PGA , al variar la tecnología de los equipos, sin embargo, no se observan variaciones significativas relacionadas con los límites de aceleración mínima empleados. Se recomienda emplear un valor de la relación de 0,870 en lugar del valor actualmente empleado de 0,800.

Palabras clave: Medidas de intensidad, aceleración pico, aceleración pico efectiva, código sísmico.

ABSTRACT: In the present study, a calculation of the relationship between the effective peak acceleration (a_{ef}) and the peak ground acceleration (PGA) is made. The database of accelerographic records of the Earthquake Engineering Laboratory of the University of Costa Rica, with events recorded between 1983 and 2019 was used. Five specific cases are analyzed. Two criteria are used in the selection of the records: i) 2 levels of maximum horizontal acceleration (2cm/s^2 and 100cm/s^2) and ii) the technology of the equipment that recorded the movement (Analog, Digital or a combination). The results show that there is an influence on the average values of the a_{ef}/PGA ratio, as the equipment technology varies, however, there are no significant variations related to the acceleration limits used. It is recommended that a ratio value of 0,870 be used instead of the currently used value of 0,800.

Keywords: Intensity measures, peak ground acceleration, effective peak ground acceleration, seismic code.



INTRODUCCIÓN

La intensidad con la que un sismo es percibido en un determinado lugar, depende de múltiples factores, como el tipo de suelo en el que se ubican las estructuras, la distancia hasta la fuente del sismo, el tipo de falla que originó el evento, la orientación de la estructura respecto al origen de la señal, entre otros. Las medidas de intensidad sísmica (MIS) son variables que cuantifican la intensidad del evento con un determinado conjunto de parámetros preestablecidos. Dichas medidas se pueden correlacionar con el daño esperado en las estructuras, por lo que las medidas de intensidad sísmica son empleadas no solo para determinar el nivel de sacudida sísmica, sino también para el diseño y/o evaluación de obras civiles nuevas o existentes.

El mayor reto a la hora de analizar las MIS obtenidas a partir de registros sísmicos reales, es la cuantificación de la gran dispersión que por lo general poseen, lo que hace difícil ajustar modelos numéricos para predecir el valor que podrá tomar en eventos futuros. Es por dicha razón, que se considera necesario realizar un análisis estadístico el cual permita modelar no solo los valores esperados, sino además la dispersión resultante.

En Costa Rica, la norma de diseño sismorresistente ha empleado dos MIS distintas en sus diferentes versiones. En el Código Sísmica de Costa Rica (CSCR) del año 74 (CFIA, 1974) y CSCR-86 (CFIA, 1986) se usó la aceleración horizontal máxima (*PGA* por sus siglas en inglés), mientras que en el CSCR-02 (CFIA, 2002), el CSCR-10 (CFIA, 2011) y en su última actualización del 2014 (CFIA, 2016) se usa la aceleración pico efectiva (a_{ef}).

En otros países, como en Estados Unidos de América, se han implementado diferentes medidas de intensidad a lo largo del tiempo. El ASCE 7-16 (ASCE, 2017) utiliza los mapas elaborados por el Servicio Geológico de dicho país (USGS, por sus siglas en inglés), los cuales fueron obtenidos de un estudio de amenaza o peligrosidad sísmica que utilizó los modelos de atenuación publicados por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER por sus siglas en inglés) en el 2008 (Power et al., 2008): Estos a su vez emplean una medida de intensidad que toma en cuenta las diferentes orientaciones en las que el sensor pudo estar colocado a la hora de registrar el sismo (independencia de orientación), llamada GMRotI50 (Boore, Watson-Lamprey y Abrahamson, 2006). Dicha medida es similar a la media geométrica (GM por sus siglas en inglés) de las dos direcciones ortogonales (usualmente Norte-Sur, Este-Oeste), la cual es adoptada frecuentemente en los modelos de atenuación sísmica disponibles a nivel mundial (Douglas, 2003).

Por lo general, se prefiere que la MIS sea la variable dependiente en los modelos de atenuación o que al menos se pueda computar una transformación entre los diferentes modelos de atenuación para considerarla como variable dependiente (Beyer y Bommer, 2006). Para el caso de Costa Rica, la aceleración pico efectiva (a_{ef}) se calcula aplicando una constante de calibración, la cual se determinó con la relación promedio observada entre el valor de la *PGA* y la a_{ef} para eventos previamente registrados.

En Costa Rica, el único estudio sobre la relación entre la a_{ef} y *PGA*, fue presentada por Laporte (2006), quien trabajó con un conjunto de registros sísmicos de Centroamérica obtenidos entre 1966 y 1996. El valor promedio reportado de la relación entre ambas MIS es de 0,80. Dicha relación fue estimada con registros en su mayoría analógicos y de baja intensidad sísmica, por lo que podría presentar variaciones al ser estimada con mayor número de datos o con registros digitales con mejor resolución.

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

La presente investigación muestra el cálculo de la relación entre la a_{ef} y la *PGA* obtenido a partir de los registros del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (LIS-UCR) hasta abril del 2019, considerando diferentes niveles de intensidad sísmica, así como la separación de dos bases de datos en las que se considera la combinación de los registros analógicos y digitales, así como el cálculo solo con los registros digitales y solo con los analógicos.

Las relaciones entre medidas de intensidad sísmica sirven para cuantificar las variaciones observadas entre eventos sísmicos o entre estaciones que registran el mismo evento. Al considerar que todas las señales son registradas (usualmente por convención) en las direcciones Norte-Sur, Este-Oeste y vertical, se genera una dependencia de la respuesta del sensor y su orientación. Con el objetivo de eliminar dicha dependencia, es posible realizar la combinación lineal de respuestas temporales ortogonales en el plano horizontal, para así poder obtener historias temporales para cualquier orientación deseada sobre el plano.

Anteriormente se han realizado estudios similares para diferentes medidas de intensidad sísmica (Boore et al., 2006; Pinzón, Pujades, Hidalgo-Leiva y Díaz, 2018; Stewart et al., 2011), sin embargo, nunca se ha implementado dicha metodología para la estimación de la aceleración pico efectiva y su respectiva relación con la aceleración pico.

Se empleará una base de datos con registros acelerográficos obtenidos y procesados por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (LIS-UCR), que compila registros tanto digitales como analógicos. Se obtendrán relaciones para todas las posibles orientaciones sobre el plano horizontal, para finalmente obtener valores medianos, promedios y su respectiva dispersión.

A continuación, se hace una descripción paramétrica de la base de datos empleada y los diferentes criterios de selección empleados para generar sub-grupos de registros con características específicas. Posteriormente se realiza el cálculo de la relación PGA y a_{ef} .

LA BASE DE DATOS LIS-UCR Y SELECCIÓN DE REGISTROS

El LIS-UCR, fue creado en la década de los 80 y es la única institución en Costa Rica que se dedica en forma exclusiva al registro y procesamiento de señales sísmicas en aceleración para su estudio e investigación. Actualmente el LIS cuenta con una red de acelerógrafos digitales con más de 120 estaciones de campo libre.

Debido a esto, la base de datos disponible posee una combinación de registros analógicos y digitales, que comprenden una ventana temporal entre abril de 1983 y el presente. Los registros analógicos fueron obtenidos entre abril de 1983 y marzo de 2009 por equipos SMA1 de la marca Kinemetrics. Para efectos de este estudio, la base de datos utilizada se extendió hasta abril 2019 y también se consideraron como archivos analógicos los provenientes del equipo “QDR”, que utilizaba un convertidor analógico-digital con una baja tasa de muestreo de 100 muestras por segundo y de baja resolución 10,5-bit (Avery, 2005). En el caso de los registros digitales, se inicia su procesamiento en junio de 1991 con equipos SSA-2 Kinemetrics. En el año 2010 se da un incremento significativo en la densidad de equipos más modernos con acelerógrafos de la marca Reftek e integrando a partir del 2012 los de la marca Guralp y Nanometrics, Todos los registros digitales son triaxiales de 24 bits y poseen una tasa de 200 muestras por segundo. En la figura 1 se observa la cantidad de registros por tipo de equipo al seleccionar registros con valores de aceleración horizontal máxima de al menos 2cm/s^2 . El tratamiento general de los registros y su estandarización en formato *.lis* se puede consultar en Moya (2006).

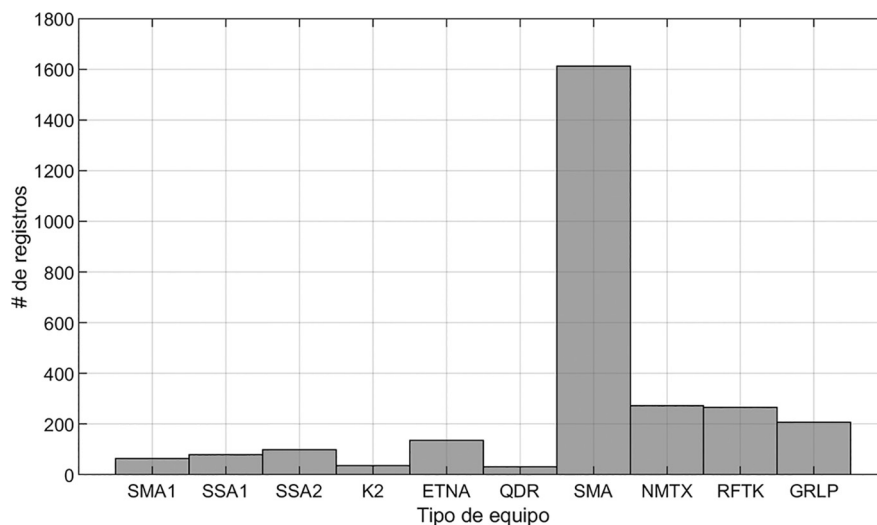


Fig. 1: Histograma de distribución de registros por tipo de equipo disponible en la base de datos del LIS. Los equipos SMA1, SSA1, SSA2, K2, ETNA y QDR son de la marca Kinemetrics; SMA y RFTK son equipos de la marca Reftek; NMTX son equipos de la marca Nanometrics y GRLP son equipos de la marca Guralp. Los equipos SMA1 y QDR se toman como analógicos, los demás son digitales.

Para el presente estudio se prepararon cinco sub-grupos en función de la PGA_h horizontal máxima de los registros (PGA_h) y la tecnología de los equipos. El primer grupo de registros (LIS-AD-01) considera todos los registros (analógicos y digitales) con PGA_h mayor o igual a 2 cm/s^2 (2805 registros de 394 eventos), mientras que el segundo grupo (LIS-AD-02) considera los registros con valores de PGA_h mayores o iguales a 100 cm/s^2 (114 registros de 48 eventos). En el cuadro 1 se caracterizan las bases de datos con registros analógicos y digitales en función de la magnitud M_w , profundidad, distancia epicentral y PGA_h .

En el cuadro 2 se muestran los valores estadísticos de la mediana, el promedio y la desviación estándar, para cada una de las bases de datos al considerar las 4 variables analizadas previamente en el cuadro 1.

Cuadro 1

Caracterización de bases de datos con registros analógicos y digitales en función de magnitud (M_w), profundidad, distancia epicentral y aceleración máxima horizontal. Datos en cantidad de registros para cada intervalo.

Magnitud M_w			Profundidad (km)			Distancia Epicentral (km)			PGA_h (cm/s^2)		
Rango	LIS-AD 01	LIS-AD 02	Rango	LIS-AD 01	LIS-AD 02	Rango	LIS-AD 01	LIS-AD 02	Rango	LIS-AD 01	LIS-AD 02
<3,0	4	0	<10	311	10	<10	114	15	2-25	2191	0
3,0-4,0	161	0	10-25	1386	67	10-25	344	31	25-50	340	0
4,0-5,0	1088	12	25-50	769	29	25-50	620	23	50-100	160	0
5,0-6,0	1036	38	50-100	277	8	50-100	839	24	100-150	58	58
6,0-7,0	430	32	100-150	32	0	100-150	356	15	150-500	53	53
>7,0	86	32	>150	30	0	>150	532	6	>500	2	2

Cuadro 2

Valor de la mediana, promedio y desviación estándar de las bases de datos con registros analógicos y digitales en función de magnitud (M_w), profundidad, distancia epicentral y aceleración máxima horizontal.

Grupo de registros	Magnitud M_w		Profundidad (km)		Distancia Epicentral (km)		PGA_h (cm/s^2)	
	LIS-AD 01	LIS-AD 02	LIS-AD 01	LIS-AD 02	LIS-AD 01	LIS-AD 02	LIS-AD 01	LIS-AD 02
Mediana	5,0	6,0	20,0	15,0	65,2	32,8	10,1	154,0
Promedio	5,18	6,20	28,5	22,0	88,2	53,7	23,1	192,2
Desv.Est.	0,911	0,987	26,76	17,72	73,98	48,53	49,47	176,7

El tercer grupo (LIS-D-03) emplea solo los registros digitales, los cuales se empezaron a obtener en junio de 1991, con PGA_h mayores o igual a 2 cm/s^2 (2709 registros de 374 eventos), mientras que el cuarto grupo (LIS-D-04) considera los registros digitales con valores de PGA_h mayores o iguales a 100 cm/s^2 (79 registros de 33 eventos). En el cuadro 3 se clasifican las bases de datos con registros analógicos y digitales en función de la magnitud M_w , profundidad, distancia epicentral y PGA_h .

Se muestra adicionalmente en el cuadro 4 el valor de la mediana, el promedio y la desviación estándar para las cuatro variables exploratorias analizadas en las bases de datos con registros únicamente digitales.

Cuadro 3

Caracterización de bases de datos con registros únicamente digitales en función de magnitud (M_w), profundidad, distancia epicentral y aceleración máxima horizontal. Datos en cantidad de registros para cada intervalo.

Magnitud M_w			Profundidad (km)			Distancia Epicentral (km)			PGA_h (cm/s^2)		
Rango	LIS-D 03	LIS-D 04	Rango	LIS-D 03	LIS-D 04	Rango	LIS-D 03	LIS-D 04	Rango	LIS-D 03	LIS-D 04
<3,0	4	0	<10	295	8	<10	109	12	2-25	2185	0
3,0-4,0	157	0	10-25	1336	47	10-25	328	25	25-50	316	0
4,0-5,0	1081	9	25-50	746	20	25-50	583	11	50-100	128	0
5,0-6,0	1002	28	50-100	270	4	50-100	816	15	100-150	42	41
6,0-7,0	394	18	100-150	32	0	100-150	345	11	150-500	35	35
>7,0	71	24	>150	30	0	>150	528	5	>500	2	2

Cuadro 4

Valor de la mediana, promedio y desviación estándar de las bases de datos con registros únicamente digitales en función de magnitud (M_w), profundidad, distancia epicentral y aceleración máxima horizontal.

Grupo de registros	Magnitud M_w		Profundidad (km)		Distancia Epicentral (km)		PGA_h (cm/s^2)	
	LIS-D 03	LIS-D 04	LIS-D 03	LIS-D 04	LIS-D 03	LIS-D 04	LIS-D 03	LIS-D 04
Mediana	5,0	6,2	20,0	14,7	66,1	29,5	9,65	143,4
Promedio	5,15	6,22	28,8	20,23	89,3	53,2	20,7	196,3
Desv.Est.	0,902	1,037	26,93	14,05	74,63	51,4	46,79	186,9

LA ACELERACIÓN PICO Y LA ACELERACIÓN PICO EFECTIVA

La aceleración pico, se determina directamente de las señales sísmicas como el máximo del valor absoluto de las amplitudes de todo el registro. La PGA se da en un único instante en la señal, que no necesariamente será el mismo en las tres direcciones en que se registra el evento. En la figura 2 se muestran los acelerogramas de las tres componentes ortogonales de un sismo con epicentro cercano a Sámara del 10 de octubre del 2012, registrado en la estación de la biblioteca de Nosara (LIS-UCR, 2012). Se observa que en este caso los valores de PGA tanto en la dirección este-oeste (N90E) como en la dirección norte sur (N00E) ocurren en tiempos distintos.

Por otra parte, el cálculo de la a_{ef} está basado en la definición dada en el ATC 3-06 (Applied Technology Council, 1978). Esta requiere que se determine la respuesta espectral en aceleraciones de osciladores de un grado de libertad (S_a) para promediar los valores entre 0,1 y 0,5 segundos de periodo de oscilación. Luego el promedio se divide entre 2,5, que se considera como la amplificación dinámica máxima de la respuesta estructural de la zona sensible a las aceleraciones. En la ecuación 1 se resume el cálculo, tomado como $i = 1$ el periodo de 0,1 segundos y $i = n$ el periodo de 0,5 segundos. El valor de n dependerá de la densidad de puntos empleados para el cálculo de la respuesta espectral.

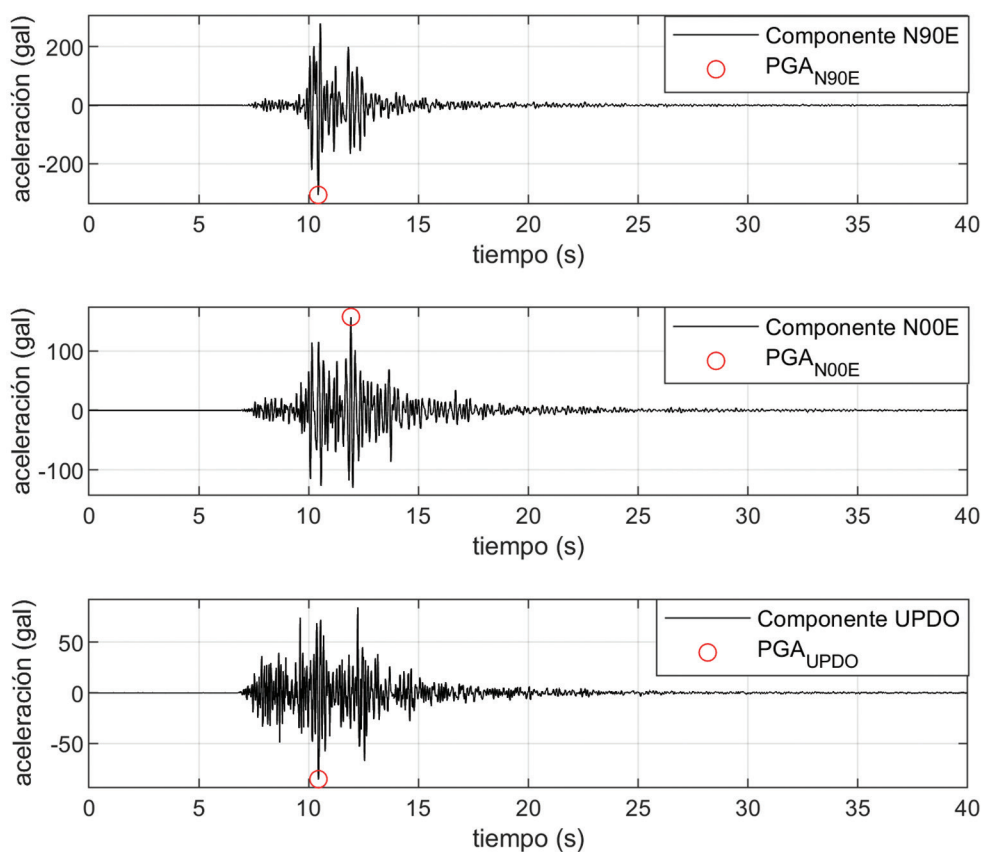


Fig. 2: Registro de aceleraciones para el sismo del 10 de octubre del 2012 con epicentro 3km al E de Nosara, registrado en la biblioteca de Nosara. Se muestran las 3 componentes ortogonales, así como el PGA correspondiente en: a) dirección este-oeste, b) dirección norte-sur y c) dirección vertical.

$$a_{ef} = \frac{1}{2,5n} \left(\sum_{i=1}^n S_{a,i} \right) \quad (1)$$

Variación de a_{ef} y PGA respecto a la orientación del sensor

Dentro de las redes acelerográficas a nivel mundial, es usual colocar los equipos de medición orientados de acuerdo a los ejes Norte-Sur y Este-Oeste. En algunas estructuras, puentes o presas, la orientación se define de acuerdo a la ubicación de la estructura, pero los sensores instalados en campo libre no responden a la orientación de ninguna estructura en particular.

Si se desea considerar una independencia en la orientación del sensor, es posible, mediante una combinación lineal de las señales ortogonales registradas, obtener historias temporales con diferentes rotaciones respecto a la orientación inicial. La metodología ha sido descrita por diferentes autores (Boore et al., 2006, Pinzón, Pujades, Hidalgo-Leiva y Díaz, 2018), la cual ha sido empleada para definir nuevas MIS. En la ecuación 2 y 3 se muestra la combinación lineal de los registros de aceleración en las dos direcciones ortogonales ($acc_x(t)$ para la dirección este-oeste y $acc_y(t)$ para la dirección norte-sur), las cuales se combinan para un ángulo θ específico con el fin de determinar dos nuevas formas de onda.

Con el resultado obtenido de las ecuaciones anteriores, se puede determinar el valor del PGA_{acc1} , PGA_{acc2} y la correspondiente aceleración pico efectiva a_{efacc1} y a_{efacc2} , haciendo variar el valor de θ en un rango comprendido entre 0 y 180°, tal y como se muestran en la figura 3. Se observa que, dependiendo de la orientación empleada en la forma de onda, los valores de las dos medidas de intensidad pueden ser muy similares entre sí, inclusive para algunos valores de la rotación, la a_{ef} toma valores superiores a la PGA . Se observa además que existe un comportamiento cíclico, repitiéndose cada 90 grados, con lo que si se analiza únicamente una de las dos señales para el rango de rotaciones entre 0° y 180° se obtiene el comportamiento completo de las dos componentes, es decir, todos los valores independientes entre sí.

Relación entre a_{ef} y PGA

Debido a que la mayoría de estudios de amenaza sísmica que se han realizado para Costa Rica utilizan como valor de intensidad sísmica la PGA (Climent, Rojas, Alvarado y Benito, 2008; Mortgat, Zsutty, Shah y Lubetkin, 1977), y dado que el CSCR emplea la aceleración pico efectiva como parámetro de diseño, se hace necesario realizar una transformación de los resultados obtenidos por los estudios de amenaza sísmica para poder aplicarlos en la normativa de diseño sismorresistente.

La mayor desventaja de la a_{ef} como MIS, es que su determinación se realiza por métodos indirectos, es decir, no es un producto directo del estudio de peligrosidad sísmica, debido a que los modelos de atenuación no emplean la a_{ef} como variable dependiente, por lo que habrá una variación en la dispersión respecto a la MIS de referencia (PGA en este caso).

Laporte (2006) reporta que el promedio de la relación a_{ef}/PGA es de 0,80 (0,811 como valor exacto para las componentes horizontales), con valores medios para las componentes horizontales que van desde 0,655 para sismos de magnitudes inferiores a 4,0, hasta 0,896 para sismos con magnitudes entre 6,0 y 7,0. En ese documento no existe un reporte de las dispersiones de los valores, por lo que se desconoce el nivel de variabilidad que tienen los datos.

Haciendo uso de la base de datos del LIS, y los cuatro subgrupos presentados en la sección anterior, se realiza el cálculo de a_{ef} y PGA con cada uno de los registros, y se obtuvo la relación que existe entre ellas. Para el cálculo de las relaciones, no solo se han determinado los valores de intensidad obtenidos con las componentes en la orientación del registro original (*as-recorded*), sino que además se realiza un análisis de las diferentes posibilidades de orientación del arribo del sismo, haciendo el estudio independiente de la orientación inicial del equipo, al seguir la metodología presentada en diferentes referencias (Boore, 2010; Boore et al., 2006; Hidalgo-Leiva, Pujades, Barbat, Díaz-Alvarado y González-Drigo, 2017; Pinzón, Pujades, Hidalgo-Leiva y Díaz, 2018), con lo cual es posible examinar con mayor claridad la dispersión que realmente puede exhibir la relación de los parámetros.

Para dicho cálculo se procesaron más de 500 mil historias temporales para obtener los valores de PGA (2805 registros por 180 variaciones angulares), se resolvieron más de 27 millones de respuestas espectrales para poder determinar la a_{ef} (se emplean 55 osciladores de un grado de libertad en el rango de periodos de 0,1 a 0,5 segundos, distribuidos logarítmicamente) y finalmente se realizó el cálculo de más de 500 mil relaciones entre los valores de las variables obtenidos.

En la figura 4 se muestra la variación del promedio, la mediana y la desviación estándar, para cada uno de los posibles ángulos no redundantes de las relaciones a_{ef}/PGA , para las cuatro bases de datos descritas. Como se puede observar en la

$$\text{acc}_1(t, \theta) = \text{acc}_x(t) \cos \theta + \text{acc}_y(t) \sin \theta \quad (2)$$

$$\text{acc}_2(t, \theta) = -\text{acc}_x(t) \sin \theta + \text{acc}_y(t) \cos \theta \quad (3)$$

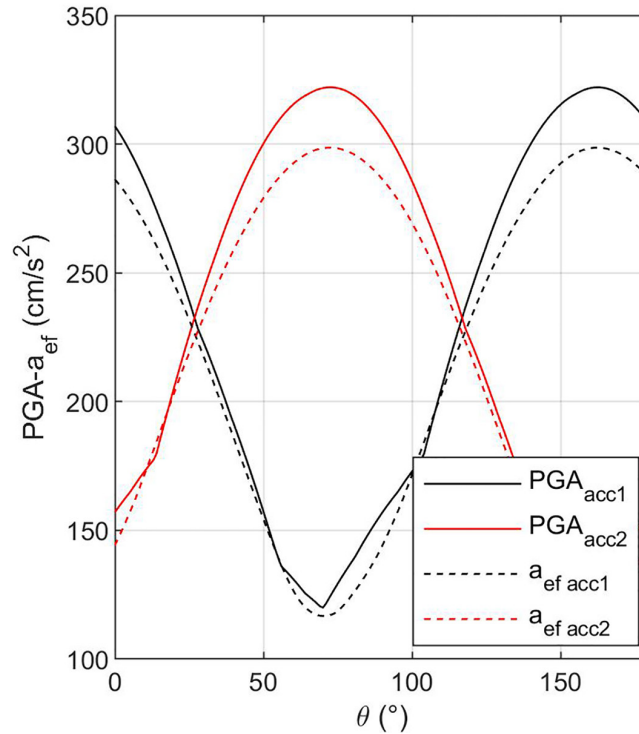


Fig. 3: Variación de la aceleración máxima del registro (PGA) y la aceleración pico efectiva (a_{ef}) para la señal $\text{acc}_1(t, \theta)$ de la ecuación (1) y $\text{acc}_2(t, \theta)$ de la ecuación (2), para el sismo del 10 de octubre del 2012 con epicentro 3km al E de Nosara, registrado en la biblioteca de Nosara.

figura 4, al considerar únicamente los registros con valores de aceleración superior a 100 cm/s^2 (LIS-AD-02 y LIS-D-04), el valor promedio y el de la mediana son muy similares (con una variación más fuerte entre los diferentes ángulos para el valor de la mediana), mientras que, al considerar las bases de datos con registros de intensidad baja, los promedios y las medianas se distancian para todos los ángulos analizados, lo que implica que existe una mayor influencia de valores extremos en el promedio para éstos últimos casos. De igual forma, para las bases de datos LIS-AD-02 y LIS-D-04, la desviación estándar disminuye respecto a LIS-AD-01 y LIS-D-03.

En el cuadro 5 se resume para cada uno de los casos analizados, el valor promedio, mediano y la desviación estándar al considerar todos los datos sin distinción de la orientación del sensor. Además, se muestran los valores del percentil 10 y 90, para ampliar el entendimiento de la dispersión de los datos. Para las cuatro bases de datos analizadas, el valor promedio de la relación está dentro del intervalo $[0,859-0,876]$, incrementando al considerar los registros con valores de PGA mayor a 100 cm/s^2 . Para el caso del valor de la mediana, el rango de valores es de $[0,873-0,884]$ siendo menor para el caso de la base LIS-D-04, la cual contienen los registros digitales de mayor intensidad.

Es posible observar que, al considerar únicamente registros de gran intensidad, la desviación estándar promedio disminuye respecto a las bases de datos que contemplan un rango más amplio el valor de la aceleración pico.

Comparación de resultados con otras investigaciones

Como ya se mencionó, el único estudio realizado para Costa Rica sobre la relación entre los valores de las MIS seleccionadas, fue presentado por Laporte (2006) en el IX Seminario Nacional de Geotécnica de Costa Rica. El conjunto de datos empleados comprendió registros obtenidos en Centroamérica entre 1966 y 1996, por lo que es de esperar que la mayoría de los registros fueran analógicos.

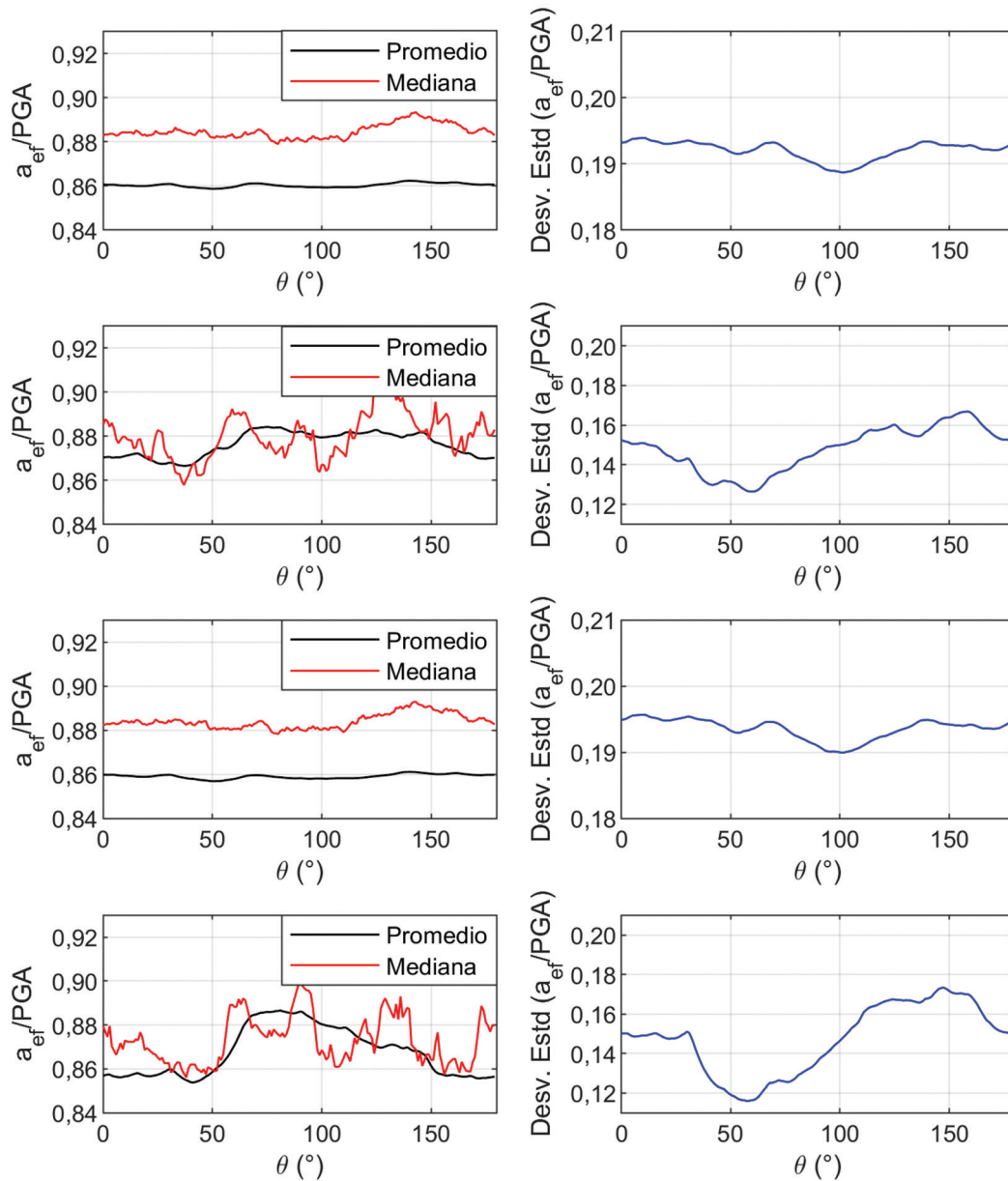


Fig. 4: Variación del valor promedio, mediano y desviación estándar de la relación entre a_{ef} y PGA para: a) grupo de registros LIS-AD-01, b) grupo de registros LIS-AD-02, c) grupo de registros LIS-D-03 y d) grupo de registros LIS-D-04, al considerar todas las posibles orientaciones de la señal de aceleración en cada registro

Cuadro 5

Valores promedio, mediano, desviación estándar y percentiles 10 y 90 para la relación a_{ef}/PGA_h en las bases de datos LIS-AD-01, LIS-AD-02, LIS-D-03 y LIS-D-04.

Grupo de registros	a_{ef}/PGA_h				
	Promedio	Mediana	Desv. Estándar	Percentil 10	Percentil. 90
LIS-AD-01	0,860	0,884	0,192	0,622	1,076
LIS-AD-02	0,876	0,880	0,148	0,699	1,068
LIS-D-03	0,859	0,884	0,194	0,617	1,076
LIS-D-04	0,868	0,873	0,147	0,694	1,055

Con el objetivo de comparar los resultados de dicha investigación con los obtenidos al emplear la base de datos del LIS, se realiza una quinta selección de registros (LIS-A-05), la cual está compuesta por los registros analógicos con valores de aceleración pico mayores a 2 cm/s^2 , que representan un total de 96 registros provenientes de 40 eventos, ocurridos entre 1983 y 2009. En el cuadro 6 se muestra la distribución del análisis exploratorio para grupo de registros LIS-A-05. Se puede apreciar que se trata de un conjunto de registros provenientes de eventos de magnitudes superiores a 5 en su mayoría (88,5%), de poca profundidad y con valores de aceleración de intermedios a altos.

En la figura 5 se muestra la variación del valor promedio, mediano y la desviación estándar al considerar todas las posibles orientaciones de los registros contenidos en el grupo de datos LIS-A-05. El valor promedio general de la relación es de 0,895, el cual es comparable con el reportado por Laporte (2006) para sismos con magnitud superior a 6,0, que es de 0,896, al considerar únicamente las componentes horizontales.

Para otras magnitudes, no es posible realizar una comparación completa con los valores reportados por Laporte (2006), pues se cuenta con una menor cantidad de registros, lo cual modifica el valor promedio y la mediana como se ha demostrado en la sección anterior.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La base de datos del LIS permite realizar estudios avanzados en el comportamiento de diferentes medidas de intensidad sísmica, debido al creciente número de registros que posee. En este estudio se examina el comportamiento de dos medidas de intensidad al modificar dos variables: i) El valor de la PGA horizontal máxima y ii) la tecnología de los equipos que registraron los eventos sísmicos, es decir, equipos analógicos o digitales. Los equipos digitales proporcionan señales sísmicas de mejor calidad, pues cuentan con sensores de mayor precisión, digitalizadores de mayor capacidad y registros con suficiente número de puntos tanto antes como después del evento (pre y post evento), que permiten tener información más completa del evento sísmico en el sitio de registro.

Mediante los análisis realizados se demuestra que para el caso de la relación entre a_{ef} y PGA , no existe un efecto significativo al considerar únicamente registros analógicos o registros digitales. Esto se puede deber a la poca cantidad de registros analógicos en comparación con los registros digitales y además a que los registros analógicos corresponden en su mayoría a sismos de gran magnitud y alta intensidad. De todas formas, se considera recomendable dejar de lado los registros analógicos en la medida en que se posean suficientes registros digitales como para modelar adecuadamente las diferentes variables seleccionadas, debido a que los registros analógicos tienen limitaciones físicas de registro, así como potenciales fuentes de error debido a su procesamiento.

Al modificar el valor de aceleración mínima e incluir una mayor cantidad de registros (LIS-AD-01 y LIS-D-03), el valor promedio de la relación a_{ef}/PGA tiende a disminuir. Dicho efecto se puede considerar poco representativo por tratarse de variaciones pequeñas, del orden del 2%. No se observa una tendencia significativa sobre algún ángulo en específico, lo cual se puede deber a que se están combinando los diferentes tipos de fuentes sísmicas.

Cuadro 6

Caracterización de grupo de registros LIS-A-05, que posee únicamente registros analógicos, en función de magnitud (Mw), profundidad, distancia epicentral y aceleración máxima horizontal. Datos en cantidad de registros para cada intervalo.

Magnitud Mw		Profundidad (km)		Distancia Epicentral (km)		PGA_h (cm/s ²)	
Rango	LIS-A-05	Rango	LIS-A-05	Rango	LIS-A-05	Rango	LIS-A-05
<3,0	0	<10	16	<10	5	2-25	6
3,0-4,0	4	10-25	50	10-25	16	25-50	24
4,0-5,0	7	25-50	23	25-50	37	50-100	32
5,0-6,0	34	50-100	7	50-100	23	100-150	16

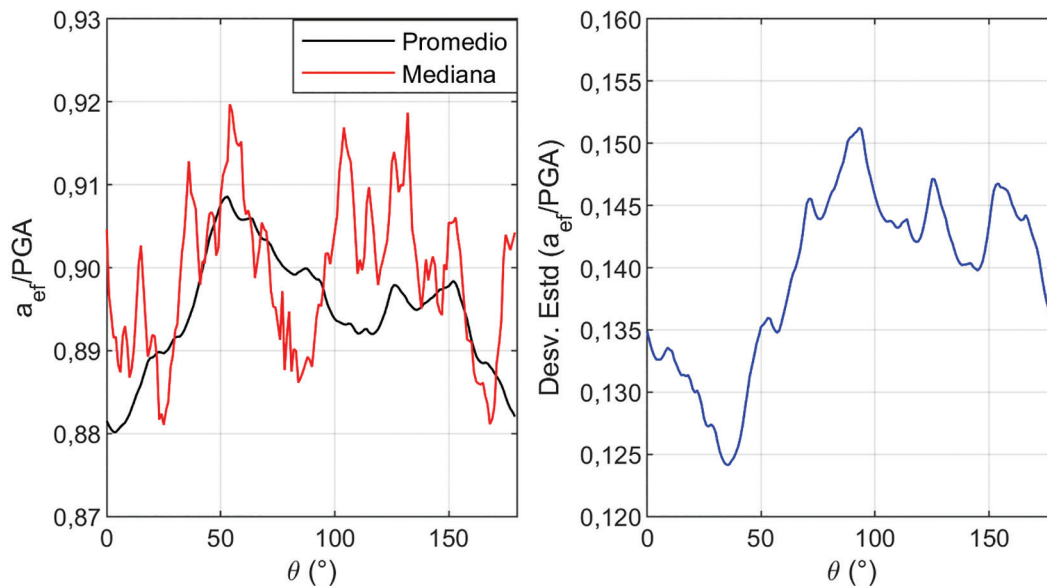


Fig. 5: Variación del valor promedio, mediano y desviación estándar de la relación entre a_{ef} y PGA para el grupo de registros LIS-A-05.

Un estudio más detallado sobre cada tipo de fuente podría presentar ángulos preferentes, especialmente al considerar el efecto de sismos por subducción.

Se observa que, de manera sistemática, el valor de la mediana es ligeramente superior al valor promedio. Se considera que el valor de la mediana es una mejor medida estadística, al no verse influenciada por valores extremos. Tomando esto en consideración, se puede tomar el valor de la relación a_{ef}/PGA como 0,87, lo que representa un incremento del 8,75% respecto al valor propuesto por Laporte (2006).

En el cuadro 7 se muestran los valores de aceleración de diseño del CSCR-10/14 (CFIA, 2016) para un periodo de retorno de 475 años, para diferentes tipos de suelo y diferentes zonas sísmicas (ver definiciones en la norma de diseño), al modificar el factor de corrección de 0,80 a 0,87 propuesto en el presente estudio.

Al considerar todas las posibles orientaciones en las señales sísmicas (independencia de la orientación), se realiza un análisis más global del fenómeno, reduciendo así la incertidumbre epistémica asociada al desconocimiento de la orientación de arribo de las ondas sísmicas.

Cuadro 7

Aceleración pico efectiva de diseño para un periodo de retorno de 475 años definida en el CSCR-10/14 (CFIA, 2016) al modificar el factor de corrección respecto a la aceleración pico.

Tipo de suelo	Zona II	Zona III	Zona IV
S1	0,22	0,33	0,44
S2	0,26	0,36	0,44
S3	0,30	0,39	0,48
S4	0,37	0,39	0,39

La dispersión de la relación entre ambas MIS, muestra que es posible contar con valores tan bajos como 0,353 y tan altos como 1,54, lo cual refleja lo volátil que puede ser la relación entre ellas. Se debe prestar especial atención a la incertidumbre asociada a la demanda sísmica, pues se ha mostrado en estudios anteriores (Díaz, Pujades, Barbat, Hidalgo-Leiva y Vargas-Alzate, 2018; Vargas-Alzate, Pujades, Barbat y Hurtado, 2013) que la incertidumbre en la respuesta de estructuras se ve afectada principalmente por la incertidumbre en la propia definición de la acción sísmica y no tanto en la incertidumbre de las cargas gravitacionales o de sus propiedades mecánicas.

CONCLUSIONES

El presente estudio muestra la relación entre dos medidas de intensidad sísmica de interés para el diseño de estructuras en Costa Rica. La aceleración pico es la medida de intensidad sísmica más básica y ampliamente utilizada para modelar el fenómeno sísmico debido a la simpleza de cálculo, mientras que la aceleración pico efectiva se ha empleado en la norma de diseño desde la publicación del CSCR-02 (CFIA, 2002). Para definir el valor de aceleración pico efectiva se emplea un factor de corrección, obtenido de la relación entre ambas medidas de intensidad, de acuerdo a la recomendación dada por Laporte (2006) y acogida por la Comisión Permanente de Estudio del Código Sísmico de Costa Rica.

Empleando la base de datos de registros acelerográficos del LIS-UCR, se realizó el cálculo de la relación entre ambas medidas de intensidad, considerando no solo la dirección en que se registró originalmente, sino que además se realiza un análisis de independencia de la orientación, calculando la combinación lineal de las señales sísmicas para 180 posibles orientaciones, pues se muestra que la señal posee valores no redundantes en el rango entre 0° y 180° respecto a su orientación inicial. Se obtiene el respectivo valor de la aceleración pico y aceleración pico efectiva y la relación para cada una de las orientaciones.

Se definen 5 diferentes bases de datos para el estudio, separando los registros de acuerdo con el tipo de instrumento que los registró (analógico o digital) y el nivel de aceleración máxima en el plano horizontal de cada registro (mayor a 2 cm/s² o mayor a 100 cm/s²). Para los 4 primeros casos, en los que se emplean ya sea una combinación de registros analógico-digital o solo digital, se obtienen valores promedio en la relación en el rango entre 0,859 y 0,876, valores de la mediana entre 0,873 y 0,884, con desviaciones estándar entre 0,148 y 0,194. Para efectos de corregir valores de PGA provenientes de un estudio de peligrosidad sísmica con un único factor de corrección, se recomienda emplear un valor de la relación a_{ef} / PGA de 0,870.

Se realiza el cálculo en un quinto grupo de registros, el cual se compone únicamente de registros analógicos, con la que se obtienen un valor promedio de 0,895, que es similar a uno de los valores reportados por Laporte (2006) en su estudio, sin embargo, al no contar con una base de datos con registros analógicos que cubran adecuadamente todos los rangos de valores de magnitud y aceleración máxima, no es posible realizar una comparación directa entre los resultados obtenidos entre ambas bases de datos analógicos.

A diferencia del estudio realizado por Laporte (2006), en la presente investigación se han empleado únicamente las componentes horizontales de los registros de aceleración, pues a la hora de determinar los valores de aceleración en estudios de peligrosidad sísmica, los modelos de atenuación solo emplean dichas componentes. Además, se han seleccionado únicamente registros de campo libre y que posean la definición completa de la cabecera del registro, lo cual hacen más confiables los resultados obtenidos.

Se considera que la variación en los valores de las relaciones puede tener un efecto significativo a la hora de realizar estudios de peligrosidad sísmicas o de definir los parámetros de diseño en futuras normas de diseño sismorresistente, por lo que se recomienda realizar estudios sobre la idoneidad de la aceleración pico efectiva como parámetro de intensidad sísmica para el diseño de estructuras civiles o el efecto de aplicar diferentes valores de corrección como el determinado en el presente estudio.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por los fondos del transitorio I de la Ley 8933. Además, se ha desarrollado dentro de del proyecto de investigación B9780 adscrito a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, con fondos provenientes del Espacio Universitario de Estudios Avanzados (UCREA) de la Universidad de Costa Rica. El primer autor desea agradecer al Ing. Álvaro Climent por sus comentarios y revisiones.

REFERENCIAS

- Applied Technology Council. (1978). *ATC-3-06 Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings* (Special Publication 507). USA: National Bureau of Standards.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2017). ASCE 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. In *ASCE standard* (ASCE/SEI 7). doi: 10.1061/9780784414248
- Avery, H. (2005). *The Development of a Low-Cost Strong Motion Seismograph* (Tesis de doctorado inédita). University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10092/4701>
- Beyer, K., Bommer, J. J. (2006). Relationships between Median Values and between Aleatory Variabilities for Different Definitions of the Horizontal Component of Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), 1512–1522. doi: 10.1785/0120050210
- Boore, D. M. (2010). Orientation-Independent, Nongeometric-Mean Measures of Seismic Intensity from Two Horizontal Components of Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4), 1830-1835. doi: 10.1785/0120090400
- Boore, D. M., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N. A. (2006). Orientation-Independent Measures of Ground Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), 1502-1511. doi: 10.1785/0120050209
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). (1974). *Código Sísmico de Costa Rica 1974* (1ra ed.). Recuperado de <http://www.codigosismico.or.cr/descargas/codigo1974.pdf>
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). (1986). *Código Sísmico de Costa Rica 1986* (2da ed.). San José: CFIA.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). (2002). *Código Sísmico de Costa Rica 2002* (3a ed.). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). (2011). *Código Sísmico de Costa Rica 2010* (4a ed.). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). (2016). *Código Sísmico de Costa Rica 2010 (Revisión 2014)* (5ta ed.). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

- Climent, Á., Rojas, W., Alvarado, G. E. y Benito, M. B. (2008). *Proyecto Resis II Evaluación de la amenaza sísmica*. Recuperado de https://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Informes_sismos/amenaza_sismica_cr.pdf
- Díaz, S. A., Pujades, L. G., Barbat, A. H., Hidalgo-Leiva, D. A. y Vargas-Alzate, Y. F. (2018). Capacity, damage and fragility models for steel buildings: a probabilistic approach. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(3), 1209-1243. doi: 10.1007/s10518-017-0237-0
- Douglas, J. (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth-Science Reviews*, 61(1-2), 43-104. doi: 10.1016/S0012-8252(02)00112-5
- Hidalgo-Leiva, D. A., Pujades, L. G., Barbat, A. H., Díaz-Alvarado, S. y González-Drigo, J. R. (2017). Orientation-Independent Measures of Ground Motion for a Database of Central America. Presentado en *16th World Conference on Earthquake Engineering*, 1-12. Santiago, Chile.
- Laporte, M. (2006). Correlación entre la aceleración pico y la aceleración pico efectiva y valores de PGV/PGA y $PGA*PGD/PGV^2$, del banco de datos de movimientos fuertes de América Central. Presentado en *IX Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica*, 1-21. San José: CFIA.
- LIS-UCR. (2012). Sismo Sámara 5.2Mw del 10 de octubre de 2012. Recuperado de <http://www.lis.ucr.ac.cr/mapas/2012-10-10-06:22:21/>
- Mortgat, C. P., Zsutty, T. C., Shah, H. C. y Lubetkin, L. (1977). *A Study of Seismic Risk for Costa Rica*. California.
- Moya, A. (2006). Nuevo Formato de Datos para el Laboratorio de Ingeniería Sísmica del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica. *Ingeniería*, 16(2), 63-74.
- Pinzón, L. A., Pujades, L. G., Hidalgo-Leiva, D. A., Díaz, S. A. (2018). Directionality models from ground motions of Italy. *Ingegneria Sismica*, 3, 43-62. Recuperado de <http://ingegneriasismica.org/directionality-models-from-ground-motions-of-italy/>
- Power, M., Chiou, B., Abrahamson, N., Bozorgnia, Y., Shantz, T. y Roblee, C. (2008). An overview of the NGA project. *Earthquake Spectra*, 24(1), 3-21. doi: 10.1193/1.2894833
- Stewart, J. P., Abrahamson, N. A., Atkinson, G. M., Baker, J. W., Boore, D. M., Bozorgnia, Y., Sabol, T. A. (2011). Representation of Bidirectional Ground Motions for Design Spectra in Building Codes. *Earthquake Spectra*, 27(3), 927-937. doi: 10.1193/1.3608001
- Vargas-Alzate, Y. F., Pujades, L. G., Barbat, A. H., Hurtado, J. E. (2013). Capacity, fragility and damage in reinforced concrete buildings: a probabilistic approach. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(6), 2007-2032. doi: 10.1007/s10518-013-9468-x