

IDENTIFICACIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS IMPULSIVOS PARA USO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

Panella, D. Sebastián^a; Frau, Carlos D.^a, Tornello, Miguel E.^a

^aCentro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología y la Ingeniería Sísmica. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza. Rodríguez 273, Mendoza, Argentina, spanella@frm.utn.edu.ar.

Palabras Claves: Sismos impulsivos, Pulsos de velocidad, Ingeniería Sísmica.

Resumen. Los parámetros característicos del movimiento del suelo durante un terremoto son de valioso interés para la Ingeniería Sísmica. Se conoce que el movimiento del suelo en las regiones próximas a la fuente sísmica, es mucho más severo que en zonas ubicadas a cierta distancia; entorno a una falla, el movimiento presenta características impulsivas que le otorgan alto poder destructivo. Distintos investigadores han confirmado la presencia de pulsos de ondas que dominan el movimiento horizontal en registros cercanos a la falla sismogénica. Las características de estos pulsos dependen del tipo, distribución de las asperezas y complejidad de la ruptura sísmica y se manifiestan en los registros de aceleración pero más marcadamente en la historia de tiempo de las velocidades del suelo. A la fecha distintos investigadores han propuesto formas diversas para evaluar si un registro es de carácter impulsivo o no. El objeto del trabajo es presentar una metodología simple y eficaz que permita determinar el carácter impulsivo del registro. El método es original, de bajo costo computacional y permite identificar registros sísmicos impulsivos; está basado en un parámetro que depende de la longitud desarrollada de la historia de tiempo de velocidades del suelo y del pico máximo de velocidad. El procedimiento se aplica a una serie representativa de registros sísmico y los resultados obtenidos se contrastan con el criterio ampliamente reconocido por la comunidad científica. Los resultados muestran una buena correlación con el procedimiento tomado como referencia.

1 INTRODUCCION

Los movimientos sísmicos cercanos a la falla sísmogénica, han sido tema de mucha investigación en años recientes, se puede decir que las vibraciones del suelo próximas a la ruptura que genera un terremoto pueden ser caracterizadas por movimientos impulsivos de corta duración, que exponen a las estructuras un alto input de energía. (Krawinkler et al., 2005). La zona comprendida dentro de una estrecha franja a cada lado de la traza de la falla se conoce como zona cercana o próxima a fallas (*near-fault*, *near-field* o *near-source*). Dentro de esta zona, el movimiento del suelo está fuertemente influenciado por el mecanismo y la dirección de propagación de la ruptura respecto del sitio como así también por posibles desplazamientos permanentes del suelo como resultado del deslizamiento relativo de ambas caras de la falla. (Sasani, M. And Bertero, 2000)

Estos movimientos con pulsos de velocidad intensos pueden afectar severamente el desempeño sísmico de estructuras (Anderson y Bertero, 1987; Hall et al, 1995; Alavi y Krawinkler, 2000). El período del pulso en relación con el período fundamental de la estructura también afecta en gran medida el rendimiento estructural (Anderson y Bertero, 1987). Los registros de terremotos obtenidos en estaciones ubicadas en las proximidades de la falla sísmogénica muestran significativas diferencias con aquellos registrados en estaciones que se encuentran a cierta distancia.

La presencia de pulsos de aceleración y velocidad en los registros sísmicos le confiere alto poder destructivo. A la fecha distintos investigadores han propuesto formas diversas para evaluar si un registro es de carácter impulsivo o no. En el presente trabajo se describe el criterio mayormente aceptado internacionalmente para catalogar a un acelerograma como impulsivo, el cual utiliza la transformada wavelet a la vez que se presenta un nuevo método de bajo costo computacional y eficaz para identificar registros sísmicos .

2 PULSO DE VELOCIDAD

El término pulso ha sido usado como referencia de la aceleración, velocidad y desplazamientos de grandes movimientos del suelo debido a terremotos. Para este estudio los pulsos son considerados en un registro como ondas de baja frecuencia, con temprana ocurrencia en la historia del tiempo de la velocidad y con una gran amplitud.

Varios investigadores han desarrollado modelos analíticos detallados, describiendo las formas de pulsos de velocidad resultante de directividad (Fu and Menun 2004; Makris and Black 2004; Mavroeidis and A. Papageorgiou 2003; Rodríguez-Marek and Bray 2004). Ninguno de estos modelos, sin embargo, son capaces de determinar si un movimiento del suelo arbitrario contiene un pulso, sino que sólo se utilizan para caracterizar los pulsos que han sido previamente identificados por el juicio del usuario (Baker, 2007).

Por lo general, los usuarios clasifican los registros de forma manual usando su mejor juicio visual, pero esto da lugar a clasificaciones que varían de un autor a otro (Fu and Menun 2004; Mavroeidis and A. Papageorgiou 2003; Somerville 2003; Akkar et al. 2005; Cox and Ashford 2002).

3 CRITERIO DE BAKER PARA CLASIFICAR REGISTROS IMPULSIVOS

Un enfoque del proceso de señales basado en ondas wavelet propuestas por J. Baker 2007, 2008; es usado para identificar empíricamente pulsos en registros sísmicos. El procedimiento consiste en "aislar" o "extraer" los pulsos contenidos en un registro de velocidades utilizado análisis de ondas wavelet.

Una comprensión básica puede ser lograda a través de la comparación con el análisis de

Fourier. El análisis de Fourier representa una señal que utiliza una combinación lineal de ondas sinusoidales, cada una representa una señal de longitud infinita y una sola frecuencia. En contraste, el análisis wavelet se descompone en una señal de ondas que se localizan en el tiempo y que representan un rango estrecho de frecuencias. Para señales no estacionarias tales como movimientos sísmicos, puede ser ventajoso para representar la señal como una suma de pequeñas ondas en lugar de una suma de ondas sinusoidales estacionarias. (J. Baker, 2007).

En el análisis de Fourier las ondas seno y coseno sirven como función base y cada onda es muy precisa en cuanto a la frecuencia que representa, pero no precisa al todo en el intervalo de tiempo que representa (por ser de longitud infinita). En contraste, la función base wavelet, es más precisa en el tiempo y el rango de frecuencia que representa. La localización del tiempo es particularmente ventajosa con estudios de fenómenos de corta duración tal como pulsos de velocidad. (S. Shahi and J. Baker, 2010).

Una función básica de ondas wavelet definida en el tiempo:

$$\Phi_{s,l}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-l}{s}\right) \quad (1)$$

Φ = Función wavelet madre

s = Parámetro de escala que dilata onda

l = Parámetro de ubicación que traslada la onda en el tiempo

t = Tiempo

Cualquier señal $f(t)$ puede ser representada como una combinación lineal de funciones base y coeficientes, por lo que la combinación lineal se determina con la integral de convolución. El coeficiente asociado a la onda wavelet, debe ser escalado a s y su posición viene dada por l .

$$C_{s,l} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Phi_{s,l}(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-l}{s}\right) dt \quad (2)$$

El método para el análisis de las señales digitales, tales como la historia de la velocidad del suelo, utiliza la Ec. 2 en forma discretizada, tomando una suma en lugar de una integral.

La utilidad de este procesamiento de señales es que las funciones básicas de la transformada de wavelet son similares a la forma de los pulsos de velocidad, causado por directividad. El pulso de velocidad se muestra sobre la transformada wavelet, como un coeficiente importante de la onda que tiene asociado una escala y ubicación con el pulso, así como se extrae el pulso del movimiento del suelo.

Para cada registro sísmico analizado, se extrae el mayor pulso de velocidad, usando la descomposición de wavelet. Ello se muestra en la figura 1, en la cual se observa claramente como captura el pulso de la velocidad del registro original. El registro del pulso extraído se le sustrae al registro original obteniendo el registro residual. Para registros no impulsivos el registro residual es prácticamente igual al movimiento del registro sísmico original.

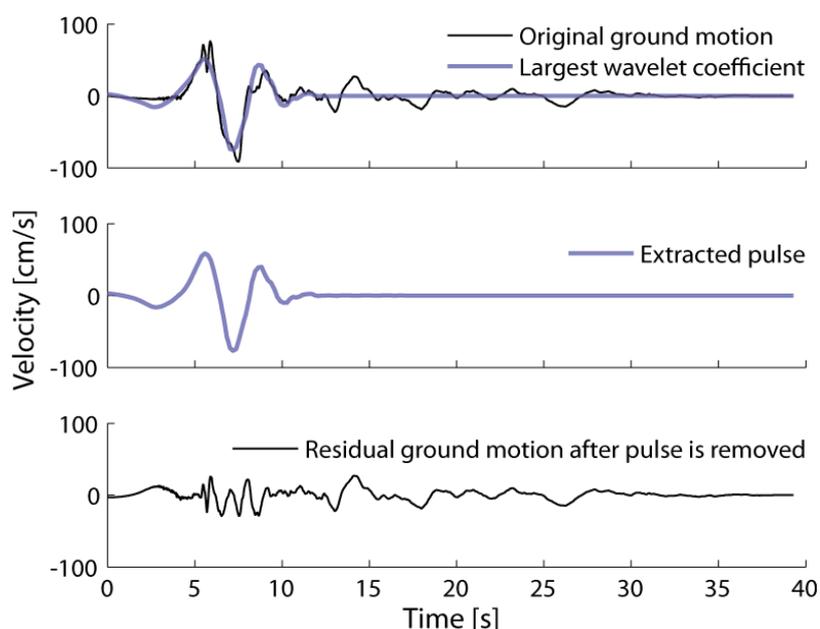


Figura 1: Ilustración del procedimiento de utilizado para extraer la parte de pulso para el terremoto de 1979 Imperial Valley estación El Centro Array #5. (J. Baker 2008)

Luego se realiza un análisis de discriminación lineal para obtener valores predictivos potenciales, para distinguir entre movimientos tipo pulso y no pulso de los registros extraídos. Por tal motivo se debe analizar las propiedades de los registros obtenidos mostrados en la Figura 2.

Se descartan todos los registros sísmicos donde su PGV esté por debajo de 30 cm/s, argumentando que la baja amplitud del registro es debido a que no está afectado por la directividad a la traza de la falla y es poco probable que dicho registro produzca daños en las estructuras.

Se define el Indicador de Pulso, que es un pronosticador de la probabilidad de que un registro dado sea pulso.

Se utiliza una regresión logística que es función de dos variables, la ecuación que define el indicador de pulso es la siguiente:

$$\text{Indicador de Pulso} = \frac{1}{1 + e^{-23.3 + 14.6(\text{PGVratio}) + 20.5(\text{energyratio})}} \quad (3)$$

La primera variable es la relación del cociente de la velocidad máxima del suelo (PGV) del registro residual y del registro original, la segunda variable es el cociente de la energía del registro residual y la energía del registro original, donde la energía se considera como cuadrado de la velocidad acumulada de la señal.

Los valores varían entre 0 y 1; para registros con puntajes por encima de 0,85 se consideran que proporcionan un fuerte indicador de que el movimiento del suelo es tipo pulso y por debajo de 0,15 se consideran que el movimiento es del tipo no pulso, y entre 0.85 y 0.15 son clasificados como ambiguos.

A su vez considera que los efectos de directividad son de interés primordial, lo cual incorpora un criterio adicional a fin de identificar los pulsos que llegan temprano en la evolución temporal de velocidad del suelo. Los pulsos tardíos se identifican mediante el cálculo de la velocidad cuadrática acumulada del registro original y del registro del pulso extraído.

Para el tiempo t , la velocidad cuadrática acumulada (CSV) se calcula como:

$$CSV(t) = \int_0^t V^2(u) du \quad (4)$$

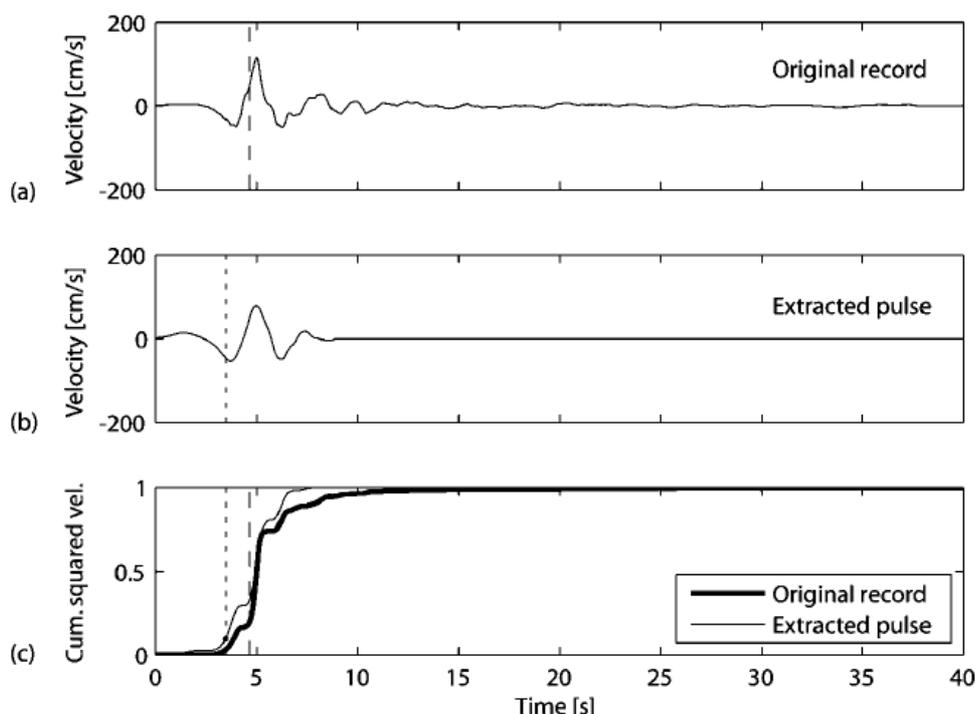


Figura 2: Se muestra el tiempo donde se produce el 10 % de CSV del registro del pulso extraído y el tiempo del 20% del CSV del registro original. Registro de Imperial Valley 1979 estación FF Overpass Meloland CE. (J. Baker 2007)

Se calcula el CSV para el registro original y el registro del pulso extraído. Luego se identifican los valores de los tiempos donde se produce el 10% del CSV del registro del pulso extraído y el tiempo donde se produce el 20% del CSV del registro original. Para que el registro se considere tipo pulso el tiempo del CSV del registro del pulso extraído debe ser menor al tiempo del CSV del registro original. De esta manera se asegura que el pulso se inicia antes de un valor significativo de la velocidad cuadrática acumulada del registro original. En la figura 2 se ilustra una muestra del procedimiento descripto.

4 METODO PROPUESTO PARA IDENTIFICAR REGISTROS IMPULSIVOS

El presente trabajo propone un método cuantitativo para identificar registros impulsivos, de forma tal, que sus resultados reflejen buena correlación con la observación manual o visual por parte del investigador. El método se concentra en el análisis del trazo de la historia de tiempo de velocidades obtenidas por integración de las aceleraciones medidas por los instrumentos sísmicos.

El método se orienta a identificar el carácter impulsivo del registro de velocidad, pero es posible aplicarlo también a los registros de aceleración o desplazamiento. El mismo está basado en la determinación de un nuevo parámetro para caracterizar el registro de la velocidad de cada una de las componentes horizontales.

4.1 Longitud de una curva

Para una curva cualquiera expresada en forma de par ordenado x y y , se puede aproximar la longitud del arco de curva a través de una serie de triángulos rectángulos cuyas hipotenusas concatenadas cubran el arco de curva elegido tal como se ve en la figura 3. Para hacer el método más funcional, también se puede exigir que las bases de todos aquellos triángulos sean iguales a Δx , de manera que para cada uno existirá un cateto Δy asociado. Siendo entonces cada hipotenusa igual a $\Delta l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$. Así, la aproximación de “ l ” estaría dada por la sumatoria de todas las hipotenusas desplegadas:

$$l \cong \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} \quad (5)$$

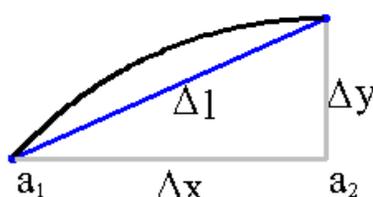


Figura 3: Procedimiento utilizado para determinar la longitud de una curva.

4.2 Longitud desarrollada de la historia de tiempo de velocidades

Dado el registro de velocidades de una componente horizontal se define como “longitud desarrollada del registro de velocidades” como:

$$Ld_v = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta t_i^2 + \Delta v_i^2} \quad (6)$$

Donde Δt_i es el paso de tiempo del registro en $(t_{i+1} - t_i)$ en segundos, Δv_i son incrementos de velocidades entre $(t_{i+1} - t_i)$ en cm/s y n es el número de muestras del registro. De la Ec. 6 se desprende que Ld_v es parámetro que suma términos expresados en distintas unidades por lo tanto requiere que sean expresadas en las unidades aquí definidas.

Definiendo así Ld_v representa la “longitud” que alcanzaría el ploteo del registro de velocidades. Si lográramos contornearlo con un delgado hilo, luego al extenderlo, su longitud se correspondería con Ld_v .

4.3 Índice de impulsividad

A partir de la definición de “Longitud Desarrollada de Velocidad” Ld_v y el PGV se define el “Índice de Impulsividad” como:

$$Ip = \frac{Ld_v}{PGV} \quad (7)$$

Siendo PGV , el valor máximo absoluto del registro de velocidad en unidades de cm/s. La definición captura de forma sencilla y eficaz el aspecto impulsivo que se visualiza manualmente en un registro.

5 REGISTROS SÍSMICOS

A los fines de evaluar la efectividad del Índice de Impulsividad se seleccionó un set de 17 registros de aceleración, los cuales se integraron en el tiempo a fin de obtener la historia del tiempo de velocidades.

Los registros sísmicos utilizados corresponden a terremotos destructivos con magnitudes momento comprendidas entre 5.7 y 8.0. La selección es un subconjunto de los 398 registros sísmicos utilizados por J. Baker a fin de poder contrastar los resultados y fueron obtenidos de la base de datos internacional PEER NGA (Pacific Earthquake Engineering Research Center - Next Generation Attenuation). La tabla 1, muestra los datos sismológicos de los registros seleccionados.

Los registros corresponden a la componente horizontal, dicha componente es normal a la traza de la falla, de los cuales cinco fueron generados por fallas tipo inversa oblicua, seis a fallas de transcurrente, cinco a fallas tipo Inversa, y uno a fallas normal.

Los datos de aceleración del suelo en función del tiempo (acelerogramas), tienen definido un paso de tiempo Δt constante, por lo cual cada incremento de la aceleración queda definido por un intervalo de tiempo Δt en segundos.

Los pasos de tiempo Δt de los registros utilizados varían de 0.005; 0.003; 0.01; 0.02 segundos, dependiendo de la calibración del acelerómetro registrador, los equipos modernos comúnmente registran 200 muestras por segundo.

NOMBRE DE TERREMOTO	ESTACIÓN	AÑO	DIST. PLANO FALLA (Km)	DIST. EPIC. (Km)	MW	TIPO DE FALLA
Coyote Lake	SJB Overpass, Bent 3 g.l.	1979	20.67	23.91	5.74	Desgarre
Coyote Lake	SJB Overpass, Bent 5 g.l.	1979	20.67	23.91	5.74	Desgarre
Chi-Chi, Taiwan	TCU117	1999	25.44	48.33	7.62	Inversa oblic.
Chi-Chi, Taiwan	WGK	1999	9.96	31.96	7.62	Inversa oblic.
Imperial Valley-06	Chihuahua	1979	7.29	18.88	6.53	Desgarre
San Fernando	Lake Hughes #9	1971	22.57	23.10	6.61	Inversa
Irpinia, Italy-01	Bovino	1980	46.25	51.61	6.90	Normal
Whittier Narrows-01	Downey - Birchdale	1987	20.79	15.29	5.99	Inversa oblic.
Cape Mendocino	Cape Mendocino	1992	6.96	10.36	7.01	Inversa
Northridge-01	Newhall - Fire Sta	1994	5.92	20.27	6.69	Inversa
Loma Prieta	Saratoga - W Valley Coll.	1989	9.31	27.05	6.93	Inversa oblic.
Imperial Valley-06	El Centro Array #4	1979	7.1	27.1	6.5	Desgarre
Erzican, Turkey	Erzincan	1992	4.4	9.0	6.7	Desgarre
Northridge-01	Newhall - W Pico Canyon Rd.	1994	5.5	21.6	6.7	Inversa
Chi-Chi, Taiwan	TCU068	1999	0.3	47.9	7.6	Inversa oblic.
Imperial Valley-06	EC Meloland Overpass FF	1979	0.1	19.4	6.5	Desgarre
Chi-Chi, Taiwan-03	TCU076	1999	14.7	20.8	6.2	Inversa

Tabla 1: Registros seleccionados de terremotos de falla cercana para análisis de contrastación.

Teniendo los registros bases de aceleración, se realiza el procesamiento mediante técnicas de análisis de señales digitales, utilizando rutinas en software Matlab, en la cual se procede a

la determinación de las historias de tiempo de las velocidades y desplazamientos de suelo mediante la aplicación de la integración numérica en el tiempo del registro de las aceleraciones.

6 RESULTADOS

Se realizó la determinación del índice de impulsividad para los registros seleccionados; para lo cual se trabajó con la velocidad del suelo, con un paso de tiempo Δt en segundos, igual a la frecuencia de muestreo de cada registro. Se determinó el PGV (cm/s), máximo valor absoluto de registro de velocidad y se determinó Ld_v que representa la longitud desarrollada en unidades resultantes de expresar el tiempo en segundos y las velocidades en cm/s. Con estos dos parámetros se determinan el índice de impulsividad Ip (Ec. 7). En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos.

NOMBRE DE TERREMOTO	ESTACIÓN	Δt (s)	PGV (cm/s)	Ld_v	Ip
Coyote Lake	SJB Overpass, Bent 3 g.l.	0.005	5.87	177.9	30.3
Coyote Lake	SJB Overpass, Bent 5 g.l.	0.005	5.47	173.2	31.6
Chi-Chi, Taiwan	TCU117	0.005	57.81	1522.3	26.3
Chi-Chi, Taiwan	WGK	0.005	67.21	1857.1	27.6
Imperial Valley-06	Chihuahua	0.01	30.44	1167.0	38.3
San Fernando	Lake Hughes #9	0.01	4.55	251.3	55.3
Irpinia, Italy-01	Bovino	0.003	2.76	245.0	88.9
Whittier Narrows-01	Downey - Birchdale	0.02	36.51	498.9	13.7
Cape Mendocino	Cape Mendocino	0.02	58.40	980.7	16.8
Northridge-01	Newhall - Fire Sta	0.02	119.77	1641.3	13.7
Loma Prieta	Saratoga - W Valley Coll.	0.005	71.47	989.3	13.8
Imperial Valley-06	El Centro Array #4	0.005	77.9	762	9.8
Erzican, Turkey	Erzincan	0.005	95.4	865	9.1
Northridge-01	Newhall - W Pico Canyon Rd.	0.01	87.7	756	8.6
Chi-Chi, Taiwan	TCU068	0.005	191.1	1822	9.5
Imperial Valley-06	EC Meloland Overpass FF	0.005	114.9	816	7.1
Chi-Chi, Taiwan-03	TCU076	0.005	59.3	601	10.1

Tabla 2: Determinación del índice de impulsividad para los registros seleccionados.

De los resultados mostrados en el presente trabajo y de otros 100 casos más estudiados se propone una clasificación del nivel de impulsividad de una componente de velocidad horizontal. Así, podemos clasificar a los registros como fuertemente impulsivos cuando el índice de impulsividad es menor que $Ip < 12$; con valores entre $12 < Ip < 20$ decimos que el registro es impulsivo; con valores entre $20 < Ip < 30$ podemos decir que el registro es moderadamente impulsivo; con valores de $Ip > 30$ el registro toma características no impulsivas. En la tabla 3, se presenta la clasificación propuesta.

Ip	Clasificación
$Ip < 12$	Fuertemente Impulsivo
$12 < Ip < 20$	Impulsivo
$20 < Ip < 30$	Moderadamente Impulsivo
$Ip > 30$	No Impulsivo

Tabla 3: Clasificación de índice de impulsividad del método propuesto.

7 EVALUACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO.

A fin de poder evaluar la eficacia de la metodología propuesta se procede a comparar los resultados obtenidos con otros procedimientos. Se realiza la contrastación con el método de J. Baker descrito en detalle en el punto 3, debido a que es el más aceptado internacionalmente, inclusive aplicado por el Fema 695, el cual brinda una lista de registros *near fault*, catalogados como registros tipo pulso y tipo no pulso, según el criterio de análisis wavelet de Baker (2007).

En la figura 4 se observan cuatro registros de velocidad en función del tiempo. Una rápida observación permite inferir el carácter impulsivo de los mismos. Según criterio de J. Baker los registros de la figura 4a) y 4c) son impulsivos pero descartados por tener pulso tardío, en tanto que los registros de la figura 4b) y 4d) han sido clasificados como No pulso por tener un pulso indicador menor de 0.85. Para estos casos, el método propuesto nos indica un Índice de Impulsividad por debajo de 17, es decir impulsivo.

En la figura 5 se observan cuatro registros en los que no se aprecia el carácter impulsivo. Según criterio de J. Baker son registros No pulso. Los registros de la figura 5a) y 5c) son descartados por tener un pulso indicador menor de 0.85. Además los registros son descartados debido a que su PGV está por debajo de 30 cm/s. El método propuesto nos arroja para los cuatro un Índice de Impulsividad mayor de 30, por lo que se consideran como registros No Impulsivos coincidiendo en estos casos ambos criterios.

En la figura 6 se observan tres nuevos registros: el a) se muestra claramente No impulsivo en tanto que los otros dos manifiestan claros pulsos. J. Baker clasifica como No pulso al registro de la figura 6a) por tener un pulso indicador menor de 0.85. Los registros de la figura 6b) y 6c) son impulsivos pero con pulsos tardíos. El método propuesto nos indica que en la figura 6a) el Índice de Impulsividad es mayor de 30, por lo que se consideran como registros No Impulsivos. En la figura 6b) y 6c) el Índice de Impulsividad se encuentra entre 20 y 30, por lo que se consideran como registros Moderadamente Impulsivo.

En la figura 7 se observan seis registros, en los que claramente se aprecia el carácter impulsivo. Baker, los clasifica con registros tipo Pulso. Mientras el método propuesto nos indica un Índice de Impulsividad menor que 12 por lo que se consideran como registros fuertemente Impulsivo.

En la tabla 4 se presenta los resultados de los criterios analizados, para el set de registro seleccionados.

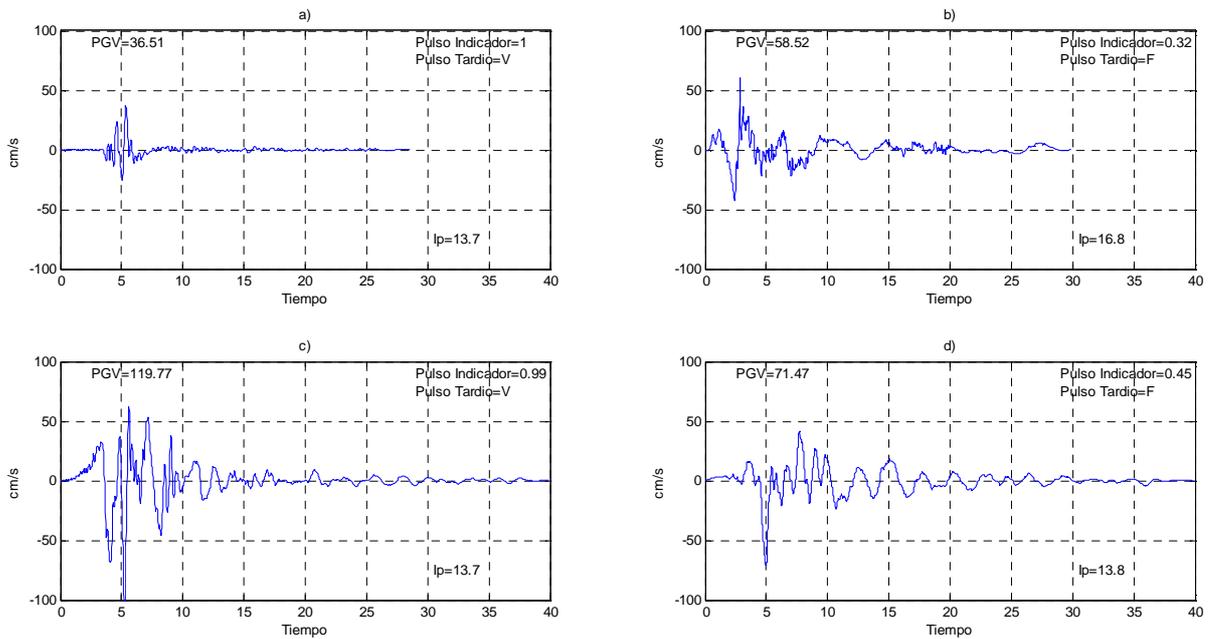


Figura 4: Registros de la historia de la Velocidad en función del tiempo. a) Whittier Narrows, estación Downey – Birchdale; b) Cape Mendocino, estación Cape Mendocino; c) Northridge, estación Newhall - Fire Sta; d) Loma Prieta estación Saratoga - W Valley Coll.

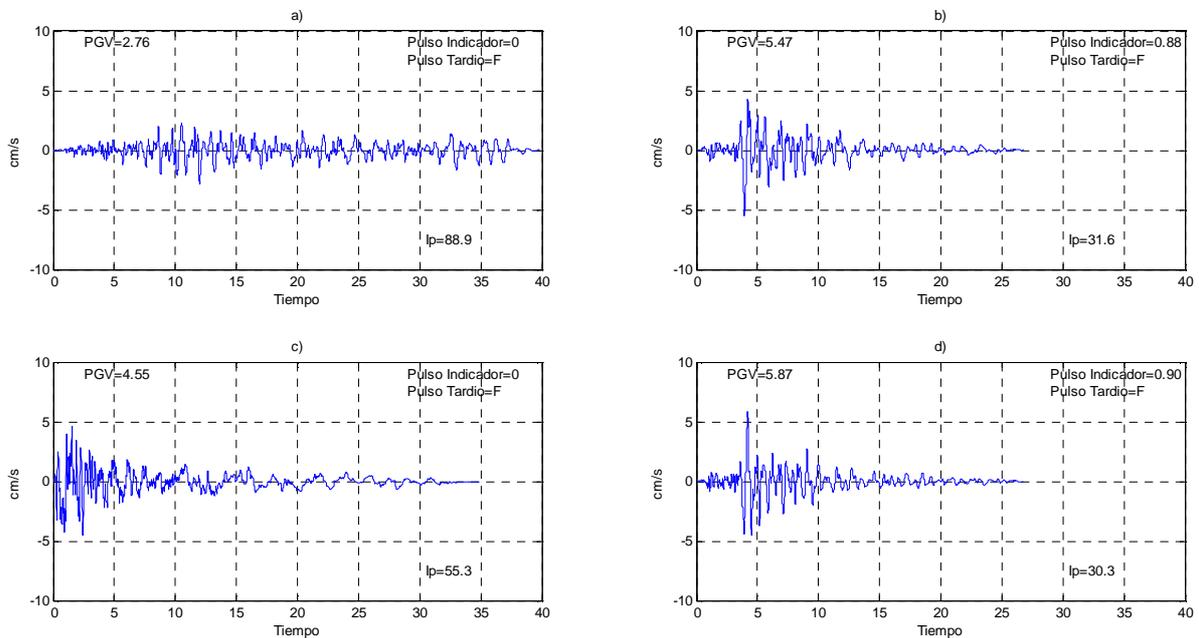


Figura 5: Registros de la historia de la Velocidad en función del tiempo. a) Irpinia, Italy estación Bovino; b) Coyote Lake estación SJB Overpass, Bent 5 g.l.; c) San Fernando estación Lake Hughes #9; d) Coyote Lake estación SJB Overpass, Bent 3 g.l.

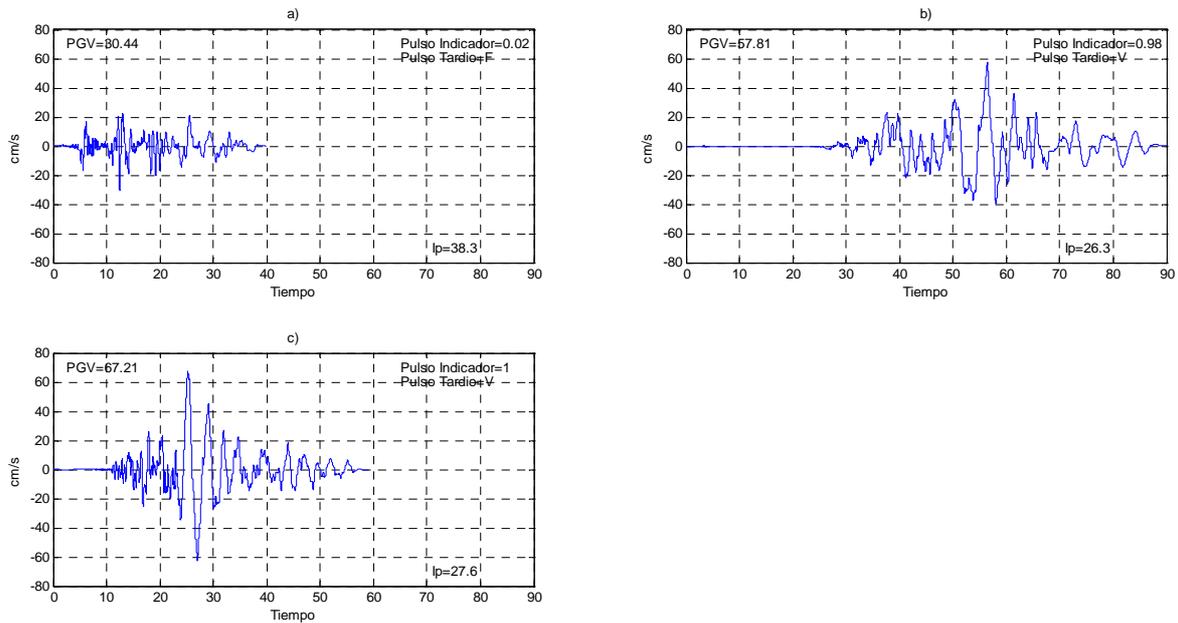


Figura 6: Registros de la historia de la Velocidad en función del tiempo. a) Imperial Valley-06, estación Chihuahua; b) Chi-Chi Taiwan, estación TCU117; c) Chi-Chi Taiwan, estación WKG.

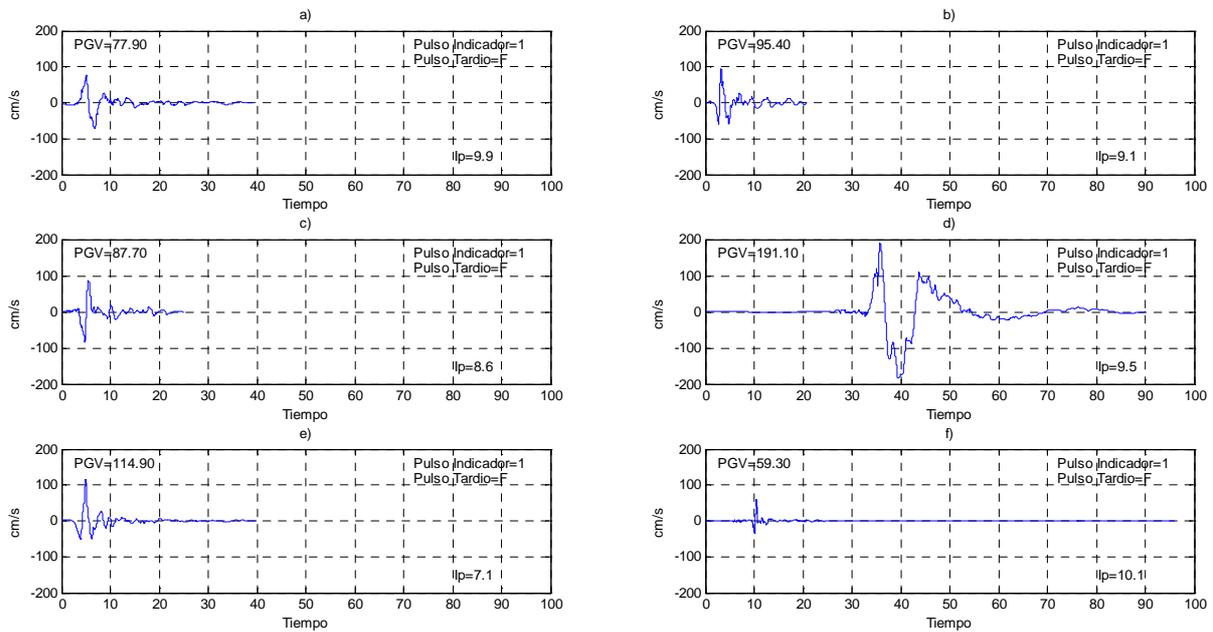


Figura 7: Registros de la historia de la Velocidad en función del tiempo. a) Imperial Valley-06, estación El Centro Array #4; b) Erzican Turkey, estación Erzincan; c) Northridge estación Newhall - W Pico Canyon Rd; d) Chi-Chi Taiwan, estación TCU068; e) Imperial Valley-06, estación EC Meloland Overpass FF; f) Chi-Chi Taiwan, estación TCU076.

NOMBRE DE TERREMOTO	ESTACIÓN	PGV (cm/s)	ANÁLISIS J. BAKER			I_p
			Indicador de Pulso	Pulso Tardío	PULSO	
Coyote Lake	SJB Overpass, Bent 3 g.l.	5.87	0.90	FALSO	NO	30.3
Coyote Lake	SJB Overpass, Bent 5 g.l.	5.47	0.88	FALSO	NO	31.6
Chi-Chi, Taiwan	TCU117	57.81	0.98	VERDADERO	NO	26.3
Chi-Chi, Taiwan	WGK	67.21	1.00	VERDADERO	NO	27.6
Imperial Valley-06	Chihuahua	30.44	0.02	FALSO	NO	38.3
San Fernando	Lake Hughes #9	4.55	0.00	FALSO	NO	55.3
Irpinia, Italy-01	Bovino	2.76	0.00	FALSO	NO	88.9
Whittier Narrows-01	Downey - Birchdale	36.51	1.00	VERDADERO	NO	13.7
Cape Mendocino	Cape Mendocino	58.52	0.32	FALSO	NO	16.8
Northridge-01	Newhall - Fire Sta	119.77	0.99	VERDADERO	NO	13.7
Loma Prieta	Saratoga - W Valley Coll.	71.47	0.45	FALSO	NO	13.8
Imperial Valley-06	El Centro Array #4	77.9	1.00	FALSO	SI	9.8
Erzican, Turkey	Erzincan	95.4	1.00	FALSO	SI	9.1
Northridge-01	Newhall - W Pico Canyon Rd.	87.7	1.00	FALSO	SI	8.6
Chi-Chi, Taiwan	TCU068	191.1	1.00	FALSO	SI	9.5
Imperial Valley-06	EC Meloland Overpass FF	114.9	1.00	FALSO	SI	7.1
Chi-Chi, Taiwan-03	TCU076	59.3	1.00	FALSO	SI	10.1

Tabla 4: Contrastación de los valores de impulsividad entre el criterio de J. Baker y el Método propuesto.

8 CONCLUSIONES

El método propuesto a través del Índice de Impulsividad I_p se muestra como sencillo y eficaz para evaluar el carácter impulsivo de un registro sísmico a través de la historia de velocidades horizontales del suelo.

El rango de valores que puede tomar I_p permite una clasificación del grado de impulsividad a fin de considerar en los análisis distintos niveles. También permite identificar registros No impulsivos.

El procedimiento propuesto presenta una buena correlación con el criterio de J. Baker, en los casos que ambos criterios difieren, se observa que el método propuesto se corresponde con la observación visual.

REFERENCIAS

- Akkar, S., Yazgan, U., and Gülkan, P., "Drift estimates in frame buildings subjected to nearfault ground motions," *Journal of Structural Engineering*, ASCE 131(5), 1014–1024, 2005.
- Alavi, B., and Krawinkler, H., Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design. *Proceedings, 12th World Conf. on Earthquake Engineering.*, Auckland, New Zealand, 2000.
- Anderson, J. C., and Bertero, V. V., "Uncertainties in establishing design earthquakes." *J. Struct. Eng.*, 113_8_, 1709–1724, 1987.

- Baker, Jack W., Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 5, pp. 1486–1501, 2007.
- Baker, Jack W, Identification of near-fault velocity pulses and prediction of resulting response spectra. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, Sacramento, California, 10, 2008.
- Bray, J. and Rodriguez-Marek A., Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 815-828. Elsevier Ltd, 2004.
- Cox, K. E., and Ashford, S. A., Characterization of large velocity pulses for laboratory testing. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, University of California at Berkeley, Berkeley, California, 60, 2002.
- FEMA, Quantification of Building Seismic Performance Factors, FEMA P-695 Report, prepared by Applied Technology Council for Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C, 2009.
- Fu, Q., and Menun, C., "Seismic-environment-based simulation of near-fault ground motions." *Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 15, 2004.
- Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W. and Wald, D.J., Near-source ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthquake Spectra* 11:4, 569-605,1995.
- Krawinkler, H., Alavi B., and Zareian F.(2005), *Impact Of Near-Fault Pulses On Engineering Design, Directions In Strong Motion Instrumentation*, 83–106.Springer.Printed In The Netherlands, 2005.
- Mavroeidis, G. and Papageorgiou, A., A mathematical representation of near-fault ground motions.*Bulletin of the Seismological Society of America* 93:3, 1099-1131, 2003.
- Makris, N., and Black, C. J., "Evaluation of peak ground velocity as a 'good' intensity measure for near-source ground motions." *J. Eng. Mech.*, 130_9_, 1032–1044, 2004.
- PEER NGA (Pacific Earthquake Engineering Research Center).<http://peer.berkeley.edu/smcat>
- Sasani, M. and Bertero, V., Importance of severe pulse-type ground motions in performance-based engineering: historical an critical review. *12th World Conference on Earthquake on Engineering*, New Zeland, paper 1302, 2000.
- Shahi S. and Baker J.W., *Signal Processing And Probabilistic Seismic Hazard Analysis Tools For Characterizing The Impact Of Near-Fault Directivity*, Joint Conference Proceedings 7th International Conference On Urban Earthquake Engineering (7cuee) & 5th International Conference On Earthquake Engineering (5icee), Tokyo Institute Of Technology, Tokyo, Japan, 2010.
- Software MatLab. www.manualespdf.es/manual-matlab-6-1
- Somerville, P. G., Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse, *Phys. Earth Planet. Interiors* 137, no. 1, 12, 2003.

AGRADECIMIENTOS

Programa de Becas Doctorales para Docentes UTN. Subsecretaría de Posgrado. Secretaría de Ciencia y Tecnología. Rectorado. UTN.
 Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza.
 CeReDeTeC. Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica.