

Ecuaciones de Predicción del Movimiento Fuerte para un Sistema de Alerta Temprana de Terremotos. Ground Motion Prediction Equations for a Early Warning System Earthquake.

G. Sancy¹

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Diego Portales, Santiago, Chile
giannina.sancy@mail.udp.cl, teléfono: +56 9 94381618

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido
14-01-2019
Aceptado
09-04-2019
Publicado
29-04-2019

Palabras Clave:
Ecuaciones de
atenuación
Atenuación geofísica
Laguna sísmica
Efecto de sitio
Alerta Temprana de
Terremotos

Article history:

Received
14-01-2019
Accepted
09-04-2019
Available
29-04-2019

Keywords:
Ground Motion
Prediction Equations
Seismic attenuation
Seismic gap
Local sites effects
Early Earthquake
Warning

Resumen

Dado que Chile está constantemente expuesto a mega-terremotos, en esta investigación se desarrollaron Ecuaciones de Predicción del Movimiento Fuerte del Suelo (GMPEs) en conjunto con el Centro Sismológico Nacional (CSN). Estas curvas predictoras de amplitud sísmica se generaron para el gap sísmico que existe en el norte de Chile. Este segmento abarca desde Arica con latitud 18S hasta el norte de la península de Mejillones con latitud 23S.

Todo este estudio está impulsado por la motivación que significa la posibilidad de implementar en Chile el nuevo sistema de alerta temprana de terremotos japonés, que permita en tiempo real y de manera simplificada, estimar la intensidad sísmica basada en predicciones de magnitud para terremotos de subducción interplaca.

Se obtuvieron coeficientes confiables para un rango que oscila entre los 4,0Mw a los 8,1Mw ya que las predicciones se acercan bastante al dato real según el análisis de variabilidad, por lo que es posible establecer umbrales de magnitud y en base a ello, generar planes de acción y/o protocolos a la comunidad.

Abstract

Since Chile is constantly exposed to mega-earthquakes, this research developed Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) carried out with help from the Centro Sismológico Nacional (CSN). The predictive seismic amplitude curves were generated from the seismic gap that exist in Chile. This zone extends from Arica with latitude of 18S to the north of the península of Mejillones at a latitude of 23S.

All this motivated the implementation of the japanese Early Earthquake Warning System (EEWS) allowing in real time and in a simplified way based on predictions of magnitude, the estimation of seismic intensity for interplate earthquakes.

Reliable coefficients were obtained for a range ranging from 4,0Mw to 8,1Mw. Since these predictions are close enough to actual data, according to the analysis of variability it is possible to calculate thresholds of seismic intensity, and based on those calculations develop courses of action for earthquake-prone communities.



1. Introducción

El 1 de octubre del año 2007, la Agencia Meteorológica de Japón (J.M.A.) implementó un sistema de alerta temprana de terremotos (E.E.W.) el cual ha emitido 44 alarmas inapropiadas después de dos meses de ocurrido el terremoto del 11 de marzo del 2011 en Japón, incrementando a un total de 70 avisos falsos. El 70% de estas falsas alarmas corresponden a ruidos accidentales con amplitudes de ondas mucho mayores a las que siempre se registran en los sismógrafos y, por lo tanto, el sistema lo considera como un evento sísmico. Sin embargo, se propuso un nuevo algoritmo (Wu et al., 2015) en Diciembre del año 2016 que tiene la capacidad de manejar estos eventos múltiples y permite disminuir en un 90% ese 70% las falsas alarmas a través del método Integrated Particle Filter (IPF) (Wu et al., 2015).

Actualmente, el Centro Sismológico Nacional busca implementar en Chile el nuevo sistema de alerta temprana de terremotos de Japón, ya que al estar emplazado sobre el sistema de subducción de la placa de Nazca y la Sudamericana, se caracteriza por ser un país que está en constante movimientos telúricos generándose temblores a una tasa de convergencia de placa de 8 centímetros por año según Melnick et al. (2003) con terremotos de grandes magnitudes como como fue el sismo del 2010 Mw8,8 Cauquenes o el del 2014 Mw8,1 Iquique. Sin embargo, en el territorio continental chileno se ha detectado hasta el momento una zona que no ha presentado gran actividad sísmica en los últimos años según Comte & Pardo (1991) (sin considerar el 8,1Mw Iquique 2014) el cual corresponde al gap sísmico que abarca desde Arica con latitud 18S hasta el norte de la península de Mejillones con latitud 23S.

En este contexto, se hace necesario desarrollar Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) o en español, Ecuaciones De Predicción Del Movimiento Fuerte Del Suelo para esta zona que no ha presentado gran actividad sísmica en los últimos años de modo que funcionen como dato de entrada para implementar un sistema de alerta temprana de terremotos que permita en tiempo real y de manera simplificada, estimar la magnitud de eventos sísmicos.

2. Antecedentes teóricos

El sistema de alerta temprana de terremotos (EEW) de Japón ha provocado confusiones en la población debido a que ha emitido falsas alarmas. El 70% de éstas corresponden a eventos simultáneos. Sin embargo, se propuso un nuevo algoritmo que tiene la capacidad de manejar múltiples eventos (Wu et al., 2015) reduciendo un 90% el número de falsas alarmas.

Este algoritmo, basado en el método Integrated Particle Filter (IPF), utiliza un flujo de datos continuo de alrededor de 300 acelerómetros y 700 sismómetros distribuidos espacialmente por todo Japón y se compone de dos procesos importantes: la primera parte se enfoca a encontrar el número más probable de eventos simultáneos en una zona dado una base de datos de terremotos basados en la teoría de la selección de clase del modelo Bayesiano y la segunda a realizar, es la inversión sísmica para encontrar los valores de los parámetros de magnitud e hipocentro del terremoto dado el modelo generado en el primer proceso.

Por último, para obtener la magnitud final de cada sitio, ésta se calcula en base a la magnitud estimada y la localización del hipocentro usando los GMPEs descritos en esta investigación.

Este nuevo algoritmo obliga a que las ecuaciones de predicción del movimiento fuerte del suelo tengan los siguientes requisitos:

- Los GMPEs se deben formular en base a algún método de regresión que se ajuste lo más posible al conjunto de eventos sísmicos para encontrar los coeficientes utilizando los parámetros de distancia, profundidad, desplazamiento máximo horizontal del suelo y magnitud.
- A los registros de desplazamientos se les deberá aplicar un filtro paso-alto de 6 segundos equivalente a 0,16667 Hz, el cual elimina todas las frecuencias inferiores a la indicada asumiéndolas como ruido, y deja pasar sin atenuación las frecuencias superiores o la señal principal.

3. Desarrollo

3.1 Zona de estudio

Una brecha sísmica o seismic gap es un segmento de una zona de convergencia de placas, particularmente como es el caso de Chile por ejemplo, en donde históricamente se ha caracterizado por tener sismicidad con magnitudes importantes ($M_w > 8,0$) estimados en base a antecedentes históricos más datos medidos en la corteza por velocidades de placas, pero que en la actualidad no ha registrado actividad sísmica significativamente mayores y, por lo tanto, el peligro sísmico de estas zonas es mayor a causa de la cantidad de energía acumulada en el tiempo generando cierta probabilidad de que en un futuro vuelvan a ocurrir eventos mayores al mencionado.

En el Norte de Chile, el terremoto más actual es el de magnitud 8,2 Mw ocurrido el 1 de abril del 2014 a las 23:46 GMT a 94 Km al Noroeste de Iquique a una profundidad de 25 km, activando solo un segmento de esta zona. Este terremoto tuvo una réplica de magnitud 6,9 Mw en ese mismo día y luego 3 nuevas réplicas

adicionales en los días siguientes: dos de 6,9 Mw más la réplica principal de 7,6 Mw. Se observa que el área de ruptura de este evento es bastante pequeña si se compara el terremoto de magnitud 8,0 Mw en Antofagasta en 1995. En la **Figura 1** sobre la modelación de la falla finita realizada por la USGS, la zona de ruptura del terremoto de Iquique abarca aproximadamente 200 kilómetros de longitud. Esta pequeña ruptura se debe a que la mayor liberación de energía ocurre en un corto intervalo de 20 a 40 segundos aproximadamente, seguido de un peak menor entre los 60 a los 80 segundos como se muestra en la **Figura 2**.

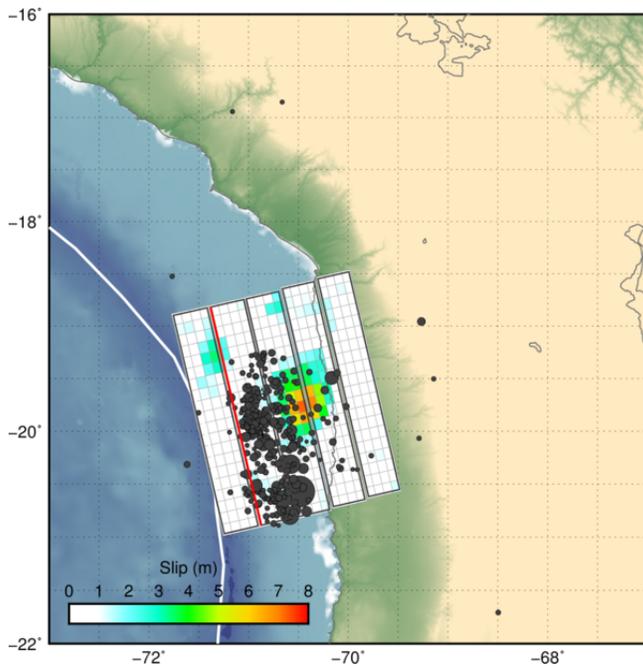


Figura 1 Modelación falla finita terremoto 8,2 Mw Iquique 2014 (Fuente: extraído de (United States Geological Survey (USGS), 2018)).

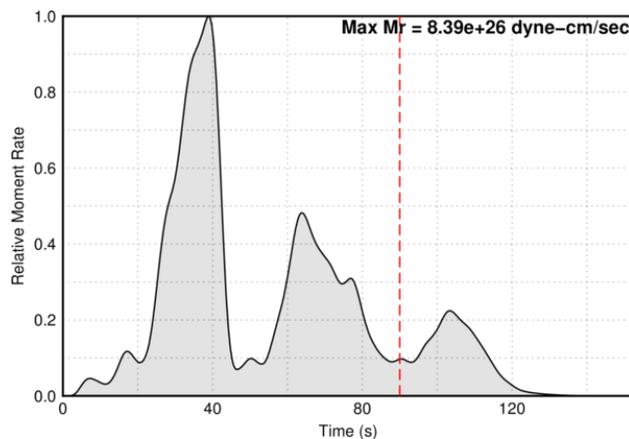


Figura 2 Relative Moment Ratio (Fuente: extraído de (United States Geological Survey (USGS), 2018)).

Respecto al marco sismo-tectónico y laguna sísmica previo a este terremoto en Iquique (CSN, 2014), el segmento que abarca desde la latitud 15°S al 24°S correspondiente a la zona sur de Perú y norte de Chile es considerada como un seismic gap según indica Comte & Pardo (1991). Esta zona se ha caracterizado por registrar grandes terremotos destructivos como lo fue el terremoto de 9,0Mw Arica, 13 de agosto de 1868.

En función de estos antecedentes y agregando la hipótesis de la barrera natural sísmica de la Península de Mejillones (Victor et al. 2011) que impide la propagación de la ruptura de los terremotos de subducción adyacentes, se establece el primer gap sísmico que correspondería desde Arica con latitud 18S hasta el norte de la península de Mejillones de latitud 23S (ver Figura 3), desde el terremoto de 1877 de 8,8 Mw al norte de Chile y el sur de Perú en 1868 correspondiente al sismo mencionado en el párrafo anterior, ya que el sismo de Iquique no liberó completamente el déficit de desplazamiento acumulado en esa zona.



Figura 3 Gap sísmico norte de Chile (Fuente: edición propia)

3.2 Análisis de la base de datos

Se realiza un análisis exploratorio del catálogo de terremotos del gap sísmico del norte de Chile con el objetivo de conocer la cantidad total de registros, la calidad de los resultados por evento, posibles tendencias, errores en estimaciones de magnitud y localización de sismos.

En esta investigación, la compilación de datos comienza desde el año 2014 hasta el 1 de enero del 2018 usando registros adquiridos de las redes internacionales colaboradoras Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) y GeoForschungsZentrum (GFZ) de Potsdam, Alemania, administradas por el Centro Sismológico Nacional (CSN).

La adquisición de los registros de aceleraciones se realizó en base a la hora universal (Universal Time Coordinate, UTC) para un rango de magnitudes de momento que oscila entre 4,0 a 9,0.

En la Figura 4 se muestra la cobertura de las estaciones sismológicas distribuidas en el territorio continental chileno (ver detalle de estaciones en A.1 Red de acelerógrafos). Se observa que la mayor densidad de estaciones se encuentra en el norte de Chile, específicamente entre las latitudes 18S hasta 23S aproximadamente esperándose que la calidad de los resultados sea confiable.

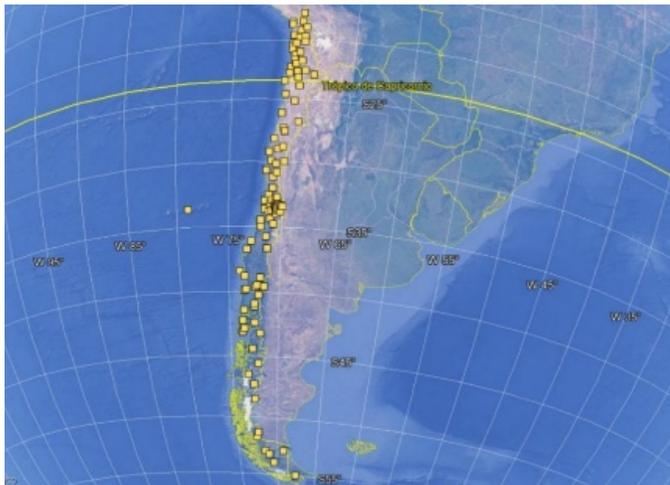


Figura 4 Red de acelerógrafos en Chile (Fuente: edición propia).

La base de datos de la brecha sísmica del norte de Chile para eventos del tipo interplaca con latitud de 18S a 23S y longitud de 72W a 69W cuenta con 580 eventos sísmicos de aceleraciones sin procesar en total a partir del 16 de marzo del 2014 a las 00:00:00 horas hasta el 1 de enero del 2018 a las 00:00:00 horas. Este segmento dispone de 25 estaciones sismológicas distribuidas espacialmente en las latitudes descritas anteriormente como se muestra en la Figura 5, es decir, en 555 kilómetros aproximadamente con una tendencia hacia la costa chilena (desde 69W a 70,15W aproximadamente). Sin embargo, se utilizaron 21 acelerógrafos (PB16, AP01, PB12, AP02, MNMCX, PSGCX, GO01, PB11, PB08, HMBCX, PATCX, PB01, PB02, PB07, PB09, PB03, PB04, PB05, PB06, AF01, PB15) debido a que la estación LVC solo registra trazas de aceleraciones en dos (norte N, oeste W) de las tres direcciones (norte N, oeste W, vertical Z) que se necesitan para realizar el estudio y TA01 con TA02 fueron eliminadas por considerarse instrumentos mal calibrados.



Figura 5 Red acelerógrafos en la zona del gap sísmico (Fuente: edición propia).

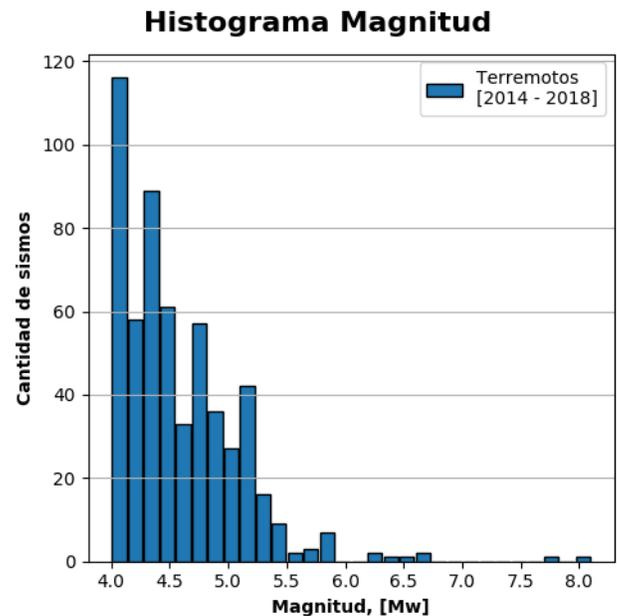


Figura 6 Histograma magnitud en base a la frecuencia de ocurrencia de eventos sísmicos y la magnitud de la actividad sísmica relacionándose con la ley de Gutenberg-Richter. En el eje x se posicionan las magnitudes de momento y en el eje y la cantidad de sismos. Las barras azules corresponden a terremotos adquiridos desde el año 2014 al 2018 los cuales están distribuidos mayoritariamente entre 4,0 Mw y 5,5 Mw. Existen solo dos terremotos de grandes magnitudes que corresponden al de Iquique de 8,2 Mw y la réplica de 7,6 Mw. Los demás sismos no sobrepasan los 7,0 Mw (Fuente: edición propia).

Al igual que el gráfico anterior, en la Figura 7 se muestra un histograma, pero de profundidades, indicando la localización de los sismos en todo el gap sísmico. La mayor cantidad se encuentran entre los 5 km a los 35 kilómetros de profundidad, disminuyendo la intensidad de registros hacia zonas más profundas hasta los 50 kilómetros en donde se asume como el límite en la cual ocurren los terremotos interplaca.

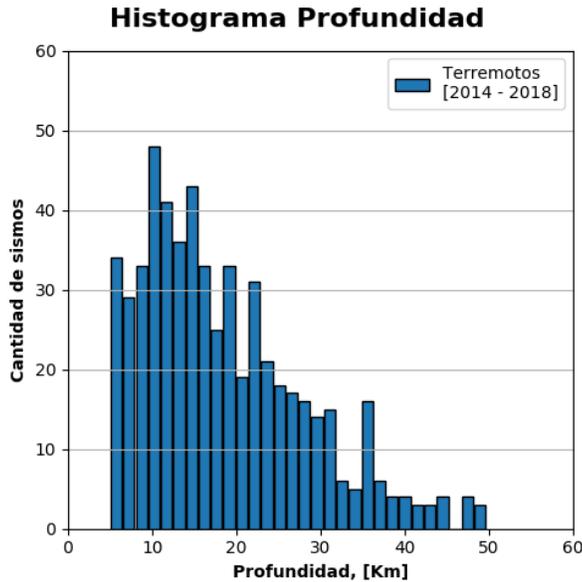


Figura 7 Histograma profundidad en base a la frecuencia de ocurrencia de eventos sísmicos y la profundidad hipocentral. En el eje X se posicionan las profundidades y en el eje Y la cantidad de sismos. Las barras azules corresponden a terremotos adquiridos desde el año 2014 al 2018. La distribución de los sismos probablemente tiene relación a la morfología de las placas en esa zona (Fuente: edición propia).

3.3 Forma funcional

Una de las obligaciones que pide el sistema de alerta temprana de terremotos (Kamigaichi, 2004) es que, tanto para la onda primaria (p) como secundaria (s), el modelo matemático se componga de cuatro términos los cuales son calibrados mediante los coeficientes a, b, c, d, e calculados por la regresión con el objetivo de que el resultado del lado derecho de la ecuación sea equivalente al desplazamiento máximo horizontal del suelo en escala logarítmica:

$$\log(PGD_p) = a_p M + b_p R + c_p \log(R) + d_p H + e_p + \varepsilon_p \quad (1)$$

$$\log(PGD_s) = a_s M + b_s R + c_s \log(R) + d_s H + e_s + \varepsilon_s \quad (2)$$

Donde,

- PGD : *Peak Ground Displacement* expresada en micrómetros [μm]. Es una variable dependiente o explicada en escala logarítmica la cual se obtiene mediante la segunda integración de los registros de aceleraciones, independiente de la regresión realizada.
- M : magnitud de momento [Mw]. Es una variable independiente o explicativa incorporada linealmente que

oscila en el dominio de $[4,0 - 9,0]$.

- R : distancia hipocentral expresada en kilómetros [Km]. Es una variable independiente o explicativa agregada al modelo matemático de forma lineal y en escala logarítmica. Esta variable representa teóricamente la disminución de la amplitud de la onda debido a la expansión geométrica del medio y a los efectos de anelasticidad respectivamente. R tiene dominio en $[5 - 500]$. La distancia hipocentral es calculada mediante pitágoras como $R = \sqrt{D^2 + H^2}$ en que D corresponde a la distancia entre el epicentro y la estación sismológica.
- H : profundidad focal expresada en kilómetros [Km]. Es una variable independiente o explicativa con dominio en $[5 - 50]$.
- a, b, c, d, e : coeficientes que son determinados para la onda primaria y secundaria mediante el método de regresión simple por los mínimos cuadrados ordinarios.
- ε : error, valor residual o perturbación que está compuesto por un parámetro independiente de variabilidad inter-evento (ε_{inter}) más un intra-eventos (ε_{intra}) que se expresa matemáticamente como $e = \varepsilon_{intra} + \varepsilon_{entre}$.

4. Análisis de residuales

Con el objetivo de evaluar estadísticamente la variabilidad entre valores observados de desplazamiento máximo horizontal del suelo versus los resultados predichos descritos por la curva del gap sísmico, se realiza el análisis de residuales mediante el modelo de efectos aleatorios propuesto por Abrahamson & Youngs (1992). Este algoritmo permite cuantificar la incertidumbre mediante un valor residual (Y) y ajusta los coeficientes, disminuyendo al máximo el error.

Se define Y como:

$$Y = \log\left(\frac{PGD_{observado}}{PGD_{predicho}}\right) \quad (3)$$

En la **Figura 8** a la izquierda muestra la variabilidad de los $\log(PGD)$ observados y predichos en función de la magnitud de momento para la onda P (arriba) y S (abajo) sin el ajuste de la variabilidad inter-evento e intra-evento y a la derecha se muestra la variabilidad luego de realizar el ajuste usando un modelo de efectos aleatorios (Abrahamson & Youngs, 1992).

Se observa que previo al ajuste, no es posible notar alguna tendencia. La variabilidad del desplazamiento del suelo no tiene una simetría entorno a la media 0 ya que oscila entre los $1,5 [10 \cdot \mu m]$ y $-1 [10 \cdot \mu m]$ para la onda P y entre $1,5 [10 \cdot \mu m]$ y $-0,75 [10 \cdot \mu m]$ para la onda S en sismos de magnitud 4 Mw disminuyendo este rango en dirección a las bajas frecuencias

debido a la cantidad de registros que se concentra mayoritariamente en los primeros valores de magnitud, concluyendo de que el modelo se encuentra sesgado. Este sesgo (*skew*) varía a medida que aumentan los valores de magnitud. En el rango $4 < M_w < 5$, se observa un sesgo positivo de los residuales al estar posicionados bajo la media 0 y luego, pasado 5Mw, los errores tienden a colocarse por sobre la media.

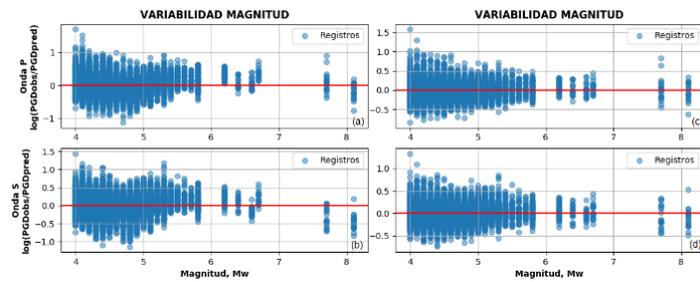


Figura 8 Variabilidad de los residuales en función de la magnitud, Mw del gap sísmico 1. (a) Residual sin ajuste onda P; (b) Residual sin ajuste onda S; (c) Residual con ajuste onda P; (d) Residual con ajuste onda S (Fuente: edición propia).

Luego de aplicar el método, los coeficientes se ajustan disminuyendo el error iterativamente hasta que se posicionan entorno a la media 0 como se observa en la 8.c y 8.d.

5. Resultados

Los mejores coeficientes obtenidos mediante la regresión de los mínimos cuadrados de la onda P para el *gap* sísmico del norte de Chile son:

$$\begin{aligned} a_p &= 0,74773 \\ b_p &= -0,00158 \\ c_p &= -0,62486 \\ d_p &= -0,00122 \\ \alpha_p &= -1,86583 \end{aligned}$$

Los mejores coeficientes obtenidos mediante la regresión de los mínimos cuadrados de la onda S para el *gap* sísmico del norte de Chile son:

$$\begin{aligned} a_s &= 1,02301 \\ b_s &= -0,00220 \\ c_s &= -0,51770 \\ d_s &= -0,00113 \\ \alpha_s &= -2,78261 \end{aligned}$$

El GMPE de Japón para la onda P (Kawaho et al., 2010) es:

$$\log(PGD_p) = 0,72M - 0,0005R - 1,2 \log(R) + 0,005H - 0,46$$

El GMPE de Japón para la onda S (Kiyomoto et al., 2009) es:

$$\log(PGD_s) = 0,87M - 0,0019R - \log(R) + 0,005H - 0,98$$

Calculando el PGD_p y PGD_s , en la **Figura 9** se muestra gráficamente el efecto que busca explicar la ecuación de predicción de movimiento fuerte del suelo para la onda primaria (P) y secundaria (S) en que cada punto en color azul corresponde al PGD calculado por cada estación sismológica en función de la magnitud M_w . Se observa que, para valores menores de magnitud, existe una pérdida de desplazamiento (PGD) registrada en cada estación sismológica para un filtro pasabanda de 0,16667 Hz a 1 Hz. Es importante mencionar que este rango de frecuencias fue utilizado debido a que las frecuencias bajas registradas en las señales de las trazas de aceleración generarían datos indeseados en términos de desplazamiento.

Respecto al gráfico de la onda S, el *Peak Ground Displacement*, para una misma estación, aumenta en función de la magnitud. Este efecto se ve claramente en eventos con $M_w > 7$ desde los $10^3 [10 \cdot \mu m]$ a $10^4 [10 \cdot \mu m]$ aproximadamente en valores de magnitudes de momento mayores a 5,0 en comparación con los registros de la onda P.

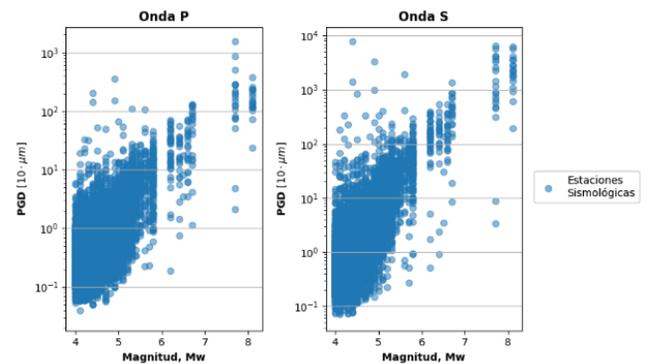


Figura 9 $\log(PGD)$ v/s Magnitud de momento para onda P y S (Fuente: edición propia).

A continuación, a modo de ejemplo se muestran 3 de los 588 gráficos que existen en total de $\log(PGD)$ v/s distancia hipocentral (ver Figura 10, Figura 11, Figura 12).

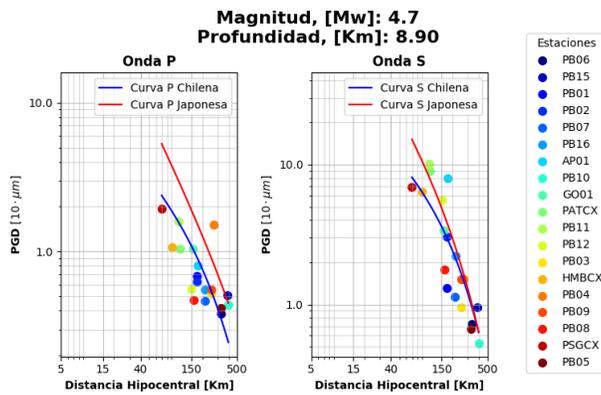


Figura 10 GMPEs Chile/Japón para 4,7Mw a 8,9 Km con un error interevento onda P de -0,024492 y onda S de -0,010953 (Fuente: edición propia).

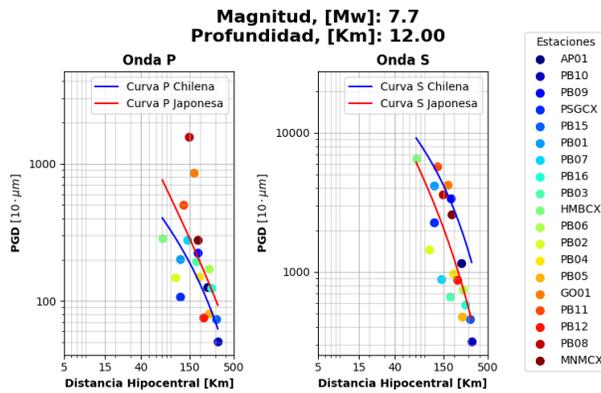


Figura 11 GMPEs Chile/Japón para 7,7Mw a 12 Km con un error interevento onda P de 0,081665 y onda S -0,261241 (Fuente: edición propia).

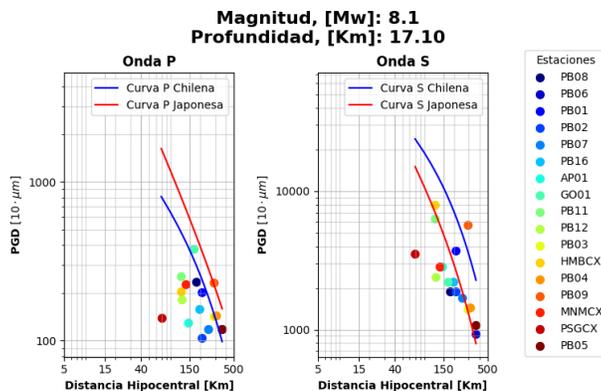


Figura 12 GMPEs Chile/Japón para 8,1Mw a 17,1 Km con un error interevento onda P de -0,139080 y onda S -0,344131 (Fuente: edición propia).

La curva azul del gráfico representa la curva chilena y la roja a Japón. Se observa que, los valores de desplazamiento máximo horizontal de suelo muestran la tendencia al efecto de atenuación

que busca este estudio, ya que mientras más cerca a la fuente sísmica, se esperaría un PGD mayor a excepción del evento 8,1Mw Iquique 2014 onda P que la nube de puntos es más dispersa, probablemente por la saturación del equipo. Sin embargo, los coeficientes de Chile explican bastante bien los valores de desplazamiento a diferencia de la ecuación japonesa en color rojo.

Dado que el histograma de magnitud (Figura 6) muestra una mayor cantidad de datos en sismos con Mw que oscilan entre 4,0 a 5,5, es importante analizar la predicción de la magnitud de los sismos más importantes con Mw mayor a 7,0 ya que solo existe un evento por cada uno de estos eventos y son los que registran un movimiento fuerte mucho mayor en comparación a los demás.

Entonces, analizando el sismo 7,7Mw Iquique, 3 de abril del 2014 a las 02:43:14 hrs., se observa una variabilidad de magnitud predicha con porcentaje de error que varía entre -8,95% equivalente a 7,01Mw a un 14% correspondiente a 8,8Mw (ver Figura 13).

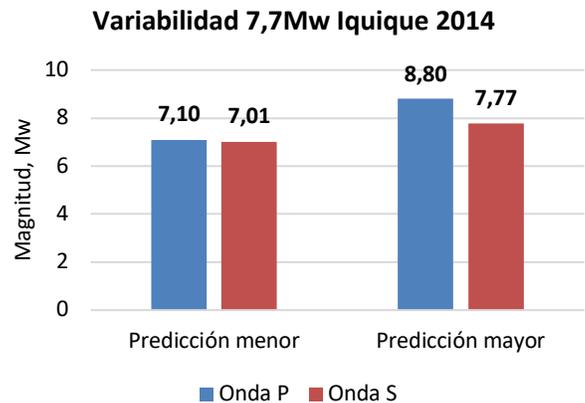


Figura 13 Variabilidad predicción magnitud de momento para evento 7,7Mw a 12 Km (Fuente: edición propia).

Se obtiene que la mejor predicción de magnitud es con la onda S ya que el porcentaje de error es de 0,9% equivalente a 7,77Mw.

Por último, se realiza el mismo análisis, pero con el sismo 1 de abril del 2014 Mw8,1 Iquique a las 23:46:47 hrs. Se observa una variabilidad de magnitud predicha con porcentaje de error que varía entre -10,2% equivalente a 7,27Mw a un 5,5% correspondiente a 8, 54Mw (ver Figura 14).

Nuevamente se obtiene que la mejor predicción de magnitud es con la onda S ya que el porcentaje de error es de un 2,2% correspondiente a un 8,28Mw.

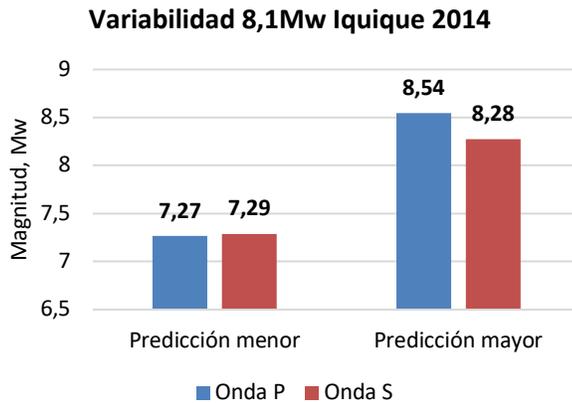


Figura 14 Variabilidad predicción magnitud de momento para evento 8,1Mw a 17,1 Km (Fuente: edición propia).

6. Discusión

Si bien en una primera instancia la curva de Japón podría ser comparable con la ecuación de Chile dada que ambas son para terremotos que tienen origen en un contexto tectónico similar (zonas de subducción), es importante mencionar que el sistema de alerta temprana japonés no hace distinción entre los distintos tipos de sismos. Los coeficientes de Chile tienen una aplicabilidad solo para sismos interplaca.

Existen estudios como el de Atkinson & Boore (2003), el cual menciona que las curvas de atenuación o *GMPEs* funcionan solo para zonas específicas con características geotectónicas similares por lo que es posible suponer en una primera instancia que los coeficientes de Japón no precederían un desplazamiento máximo horizontal del suelo certero para Chile.

Aunque la mayoría de las ecuaciones de atenuación desarrolladas por autores como Contreras & Boroschek (2012); Idini, Rojas, Ruiz, & Pastén (2016), parametrizan la relación empírica con PGA dado que los datos provienen de acelerógrafos, en este estudio se desarrollaron ecuaciones con PGD utilizando datos de trazas de aceleraciones por dos razones: el sistema de alerta temprana de terremotos utiliza una red de acelerógrafos, los cuales entregan un dato indirecto de desplazamiento, pero en tiempo real si lo comparamos con la información que entrega la red de GPSs (no presenta niveles de saturación y registra la posición de un lugar varias veces por segundo con una precisión exacta, pero se requiere de tiempo para el traspaso de la información dada su posición satelital) y segundo, el desplazamiento es el parámetro que mejor describe el movimiento fuerte del suelo a diferencia de la aceleración y la velocidad debido a que la máxima amplitud de aceleración no es equivalente al máximo movimiento o

desplazamiento y finalmente, lo que se busca en esta investigación, es cuantificar la percepción del sismo cuantificado por la intensidad.

Como se mencionó en el párrafo anterior, puesto que el desplazamiento es un dato indirecto ya que se obtiene de la segunda integración de las trazas de aceleración, se reduce esta incertidumbre aplicando filtros de frecuencias.

Por otro lado, considerando que el sistema de alerta temprana de Japón se basa en el método del diferencial de velocidades de las ondas sísmicas, implementar el nuevo sistema japonés en Chile implica aproximadamente de tan solo 20 segundos de alerta a la población desde que se activa la primera estación sísmológica ubicada en la costa del continente debido a la onda P hasta la llegada de la onda S en la ciudad, la cual es la responsable de generar el movimiento fuerte.

En base a esto, ambas relaciones empíricas son importantes ya que, si bien la onda P entrega mayor tiempo de alerta por llegar más rápido y activar las primeras estaciones sísmológicas, la onda secundaria ayuda a calibrar la información del terremoto y con ello, ajustar la capacidad de predicción de la magnitud como se analizó en el ítem anterior.

Por último, no es factible incluir en la ecuación de predicción del movimiento fuerte del suelo parámetros que cuantifiquen el efecto de sitio ya que la amplitud decae a altas frecuencias en desplazamiento por lo que no habría información de aquello.

7. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo son confiables para un rango de 4,0Mw a 8,1Mw dada la buena base de datos, densidad de estaciones sísmológicas distribuidas espacialmente por todo el *gap* sísmico y variabilidad estadística. Tomando en cuenta que, si bien existen bajos registros de eventos sísmicos con Mw mayor a 7,0, se comprobó mediante el análisis de variabilidad que la capacidad de predicción Mw de los GMPEs funciona para establecer umbrales de magnitud y en base a ello, generar planes de acción y/o protocolos a la comunidad.

La mayor variabilidad de residuales ocurre en sismos de baja magnitud ya que hay mucha incertidumbre en su localización y por la caída de tensiones.

Considerando que el objetivo de esta investigación es estimar una intensidad sísmica que permita cuantificar la percepción del sismo, es importante tener en cuenta el efecto de sitio. Este parámetro se propone trabajarlo como una ponderación posterior a la predicción de magnitud en base a los mapas de



microzonificación sísmica de Chile.

Finalmente, se está trabajando para que, en un futuro, los sistemas de alerta temprana de terremotos puedan funcionar con una red de *GPSs*, ya que entregan datos de desplazamiento exactos. En este contexto, se hace necesario desarrollar ecuaciones empíricas parametrizadas con PGD.

8. Referencias

- [1] Abrahamson, N. A., & Youngs, R. R. (February de 1992). A stable algorithm for regression analyses using the random effects model. *Bulletin of the Seismological of America*, 82(1), 505-510.
- [2] Atkinson, G. M., & Boore, D. M. (August de 2003). Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(4), 1703–1729.
- [3] Comte, D., & Pardo, M. (1991). Reappraisal of Great Historical Earthquakes in the Northern Chile and Southern Peru Seismic Gaps. *Natural Hazard*.
- [4] Contreras, V. (2009). Curvas de atenuación espectrales para sismos chilenos. En U. d. Chile, Memoria para optar al título de ingeniero civil. Santiago de Chile.
- [5] Contreras, V., & Boroschek, R. (2012). Strong Ground Motion Attenuation Relations for Chilean Subduction Zone Interface Earthquakes. WCEE. Lisboa.
- [6] Contreras, V., & Boroschek, R. (2015). Curvas de atenuación para sismos chilenos. XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015.
- [7] Espinoza, M. (2017). Análisis de la demanda sísmica de diferentes tipos de sismos chilenos en base a la atenuación de alta frecuencia. En Universidad de Chile, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago.
- [8] Houston, H., & Kanamori, H. (August de 1990). Comparison of strong-motion spectra with teleseismic spectra for three magnitude 8 subduction-zone earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(4), 913-934.
- [9] Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., & Pastén, C. (2016). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bull Earthquake Eng.*
- [10] Kamigaichi, O. (2004). JMA Earthquake Early Warning. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*.
- [11] Kawaho, A., Shinji, K., Toshihiro, S., Moriwaki, K., & Takashi, Y. (2010). 緊急地震速報におけるP波マグニチュード推定方法の改善. *Quarterly Journal of Seismology*, 73, 123-134.
- [12] Kiyomoto, M., Aketagawa, T., Ohtake, K., Shimbaru, T., Shimoyama, T., Moriwaki, K., . . . Yokota, T. (8 de October de 2009). Investigation of Technical Issues for Earthquake Early Warning. *Quarterly Journal of Seismology*, 73, 135-150.
- [13] Melnick, D., Sanchez, M., Echtler, H., & Pineda, V. (2003). Geología estructural de la isla Mocha, centro-sur de Chile (30°30'S, 74°W): implicancias en la tectónica regional.
- [14] United States Geological Survey (USGS). (17 de 10 de 2018). M 8.2 - 94km NW of Iquique, Chile. Obtenido de <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us000nzvd/finite-fault>
- [15] Wu, S., Yamada, M., Tamaribuchi, K., & Beck, J. (2015). Multi-events Earthquake Early Warning algorithm using a Bayesian approach. *Geophysical Journal International* .



A. Anexo

Información de la red de acelerógrafos.

A.1 Red de acelerógrafos

Tabla A.1 Red de acelerógrafos

Código estación	Responsable	RED	Latitud [°]	Longitud [°]	Altura [m]	Digitalizador	BB	Acelerómetro
AC01	CTR-DIR	C1	-26,1	-70,6	390	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
AC02	CTR-DIR	C1	-26,8	-69,1	39905	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
AC03	DGAC	C1	-27,3	-70,4	321	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
AC04	CTR-DIR	C1	-28,2	-71,1	2703	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
AC05	CTR-DIR	C1	-28,8	-70,3	12864	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
AF01	CTR-GER	C1	-23,0	-68,2	2449	Q330	Trillium 120p	FBA ES-T
AGCH	INTERNET	C	-37,8	-72,7	76	Earth Data	-	Episensor FBA
ANTU	INTERNET	C	-33,6	-70,6	640	Earth Data	-	Episensor
AP01	DGAC	C1	-18,4	-70,3	21	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
ARCH	INTERNET	C	-18,5	-70,3	58	Sara	-	Episensor FBA
BIO2	CTR-DIR	C1	-36,7	-71,3	913	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
BIO3	INTERNET	C1	-36,8	-73,0	196	Q330	Trillium 120	CMG-5T
BIO4	CTR-DIR	C	-38,4	-73,9	61	Q330	Trillium 120	CMG-5T
BO01	CTR-DIR	C1	-34,4	-71,1	2625	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
BO02	CTR-DIR	C1	-34,8	-70,8	886	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
BO03	CTR-DIR	C1	-34,5	-72,0	128	Q330	Trillium 120	CMG-5T
CHPI	INTERNET	C	-34,4	-72,0	20	Altus Makalu	-	Episensor FBA
CO01	CTR-DIR	C1	-30,0	-70,1	21574	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
CO02	INTERNET	C1	-31,2	-71,0	1190	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
CO03	CTR-DIR	C1	-30,8	-70,7	9903	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
CO04	CTR-DIR	C1	-32,0	-71,0	2401	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
CO05	3G	C1	-29,9	-71,2	101	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
CO06	CTR-DIR	C1	-30,7	-71,6	239,7	Q330	Trillium 120p	FBA ES-T
CRCH	INTERNET	C	-26,3	-70,7	10	Earth Data	-	Episensor FBA
DG01	INTERNET	C1	-33,5	-70,7	609	Q330	Trillium 120	Episensor
FAR1	INTERNET	C	-33,3	-70,3	2270	Q330	Trillium 40	Episensor
FSR	RADIO	C	-33,5	-70,5	781	Earth Data	-	Episensor FBA
GO01	TESACOM-DIR	C	-19,7	-69,2	3809	Q330	T240	Episensor
GO02	TESACOM-DIR	C	-25,2	-69,6	2550	Q330	T240	Episensor
GO03	TESACOM-DIR	C	-27,6	-70,2	730	Q330	T240	Episensor
GO04	INTERNET	C	-30,2	-70,8	2076	Q330	T240	Episensor
GO05	INTERNET	C	-35,0	-71,9	488	Q330	T240	Epi



Código estación	Responsable	RED	Latitud [°]	Longitud [°]	Altura [m]	Digitalizador	BB	Acelerómetro
GO06	TESACOM-DIR	C	-39,6	-71,5	1258	Q330	T240	Epi
HMBCX	INTERNET	CX	-20,3	-69,9	1152	Q330	STS2	CMG5
LAJA	INTERNET	C	-37,3	-72,7	84	Basalt	-	Episensor FBA
LC01	CTR-DIR	C1	-38,9	-71,9	471	Q330	Trillium 120	CMG-5T
LC02	CTR-DIR	C1	-38,8	-73,4	67	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
LCO	INTERNET	IU	-29,0	-70,7	2299	Q680	STS1	FBA-23
LMEL	CTR-DIR	C	-33,8	-70,2	1510	Q330	STS-2	Episensor
LVC	INTERNET	IU	-22,6	-68,9	2195	Q330	STS1-STS2	FBA ES-T
ME03	RADIO	C1	-33,5	-70,5	1087	Q330	Trillium 120	Episensor
ML02	INTERNET	C1	-35,8	-71,4	237	Q330	Trillium 120	CMG-5T
MNMCX	INTERNET	CX	-19,1	-69,6	2304	Q330	STS2	CMG5
MT01	CTR-DIR	C1	-33,9	-71,3	310	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
MT02	CTR-DIR	C1	-33,3	-71,1	323	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
MT05	RADIO	C1	-33,4	-70,7	765	Q330	Trillium 120	CMG-5T
MT07	-	C1	-33,0	-71,0	2234	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
MT09	RADIO	C1	-33,8	-71,0	1371	Q330	Trillium 120	CMG-5T
PATCX	INTERNET	CX	-20,8	-70,2	830	Q330	STS2	CMG5
PB01	CTR-GER	CX	-21,0	-69,5	900	Q330	STS2	Epi
PB02	CTR-GER	CX	-21,3	-69,9	1015	Q330	STS2	Epi
PB03	TESACOM-DIR	CX	-22,0	-69,8	1460	Q330	STS2	Epi
PB04	CTR-GER	CX	-22,3	-70,1	1520	Q330	STS2	Epi
PB05	TESACOM-DIR	CX	-22,9	-70,2	1150	Q330	STS2	Epi
PB06	CTR-GER	CX	-22,7	-69,6	1400	Q330	STS2	Epi
PB07	CTR-GER	CX	-21,7	-69,9	1570	Q330	STS2	Epi
PB08	CTR-GER	CX	-20,1	-69,2	3060	Q330	STS2	Epi
PB09	CTR-GER	CX	-21,8	-69,2	1530	Q330HR	STS2	Epi
PB10	DGAC	CX	-23,5	-70,6	250	Q330HR	STS2	Epi
PB11	CTR-GER	CX	-19,8	-69,7	1300	Q330HR	STS2	Epi
PB12	DGAC	CX	-18,6	-70,3	908	Q330HR	STS2	Epi
PB14	CTR-GER	CX	-24,6	-70,4	2640	Earthdata PS6-24	STS2	Epi
PB15	CTR-GER	CX	-23,2	-69,5	1830	Q330HR	STS2	Epi
PB16	DGAC	CX	-18,3	-69,5	4800	Q330HR	STS2	Epi
PEL	INTERNET	G	-33,1	-70,7	690	Q330HR	STS-1	Episensor
PSGCX	INTERNET	CX	-19,6	-70,1	966	Q330	STS2	CMG5
RCDM	RADIO	C	-33,5	-70,8	465	Earth Data	-	FBA ES-T
ROC1	INTERNET	C	-33,0	-71,0	2186	Q330	Trillium 40	Episensor
STL	INTERNET	C1	-33,4	-70,6	616	Q330	Trillium 120	CMG-5T
TA01	DGAC	C1	-20,6	-70,2	75	Q330	Trillium 120p	CMG-5T



Código estación	Responsable	RED	Latitud [°]	Longitud [°]	Altura [m]	Digitalizador	BB	Acelerómetro
TA02	INTERNET	C1	-20,3	-70,1	865	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
VA01	INTERNET	C1	-33,0	-71,6	2	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
VA03	CTR-DIR	C1	-32,8	-70,6	1053	Q330	Trillium 120p	CMG-5T
VA05	DGAC	C1	-33,7	-71,6	80	Q330	Trillium 120	CMG-5T