

Estimación de la magnitud sísmica a partir de registros y parámetros hipocentrales para la estación de Ñaña

Renzo Anchivilca*¹ y César Jiménez¹

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

Recibido 19 Ago 2021 – Aceptado 08 Oct 2021 – Publicado 07 Dic 2021

Resumen

La estimación de la magnitud de cualquier evento sísmico es fundamental en la Sismología porque permite tener una idea del tamaño del terremoto y de la energía sísmica liberada. El propósito de esta investigación es definir una ecuación empírica de magnitud sísmica obtenida mediante el modelo de regresión lineal múltiple, proponiéndose una dependencia con lo registrado en una estación sísmica mediante un sensor de banda muy ancha (VBB) triaxial, datos de distancia epicentral y profundidad focal. Se utilizaron señales sísmicas que son brindados en forma libre por *Incorporated Research Institutions for Seismology* (IRIS) a partir de lo registrado en la estación de Ñaña (NNA). Los valores de distancia epicentral fueron obtenidos a partir de la localización geográfica de la estación de registro y los epicentros de cada evento sísmico; mientras que los datos de profundidad focal y magnitud fueron obtenidos de un catálogo del *National Earthquake Information Center* (NEIC). Se obtuvieron resultados de magnitud muy cercanos a los registrados por el NEIC, encontrándose una diferencia máxima de 0.3 entre ellos.

Palabras clave: Sismología, magnitud sísmica, regresión lineal múltiple.

Estimation of the seismic magnitude from records and hypocentral parameters for the Ñaña station

Abstract

Estimating the magnitude of any seismic event is fundamental in Seismology because it allows to have an idea of the earthquake size and the seismic energy released. The purpose of this research is define an empirical equation of seismic magnitude obtained through the multiple linear regression model, proposing a dependency with what is recorded in a seismic station by means of a triaxial very broadband (VBB) sensor, epicentral distance and focal depth data. They were used seismic signals that are freely provided by *Incorporated Research Institutions for Seismology* (IRIS) based on what was recorded at the Nana station (NNA). The epicentral distance values were obtained from the geographical location of the recording station and the epicenters of each seismic event; while the focal depth and magnitude data were obtained from a catalog of *National Earthquake Information Center* (NEIC). They were obtained results of magnitude very close to those recorded by NEIC, finding a maximum difference of 0.3 between them.

Keywords: Seismology, seismic magnitude, multiple linear regression.

1. Introducción

La sismicidad en el Perú se debe al proceso de subducción que existe entre la placa de Nazca y la placa Suramericana, donde la placa de Nazca se introduce por debajo de la placa Suramericana a una velocidad de con-

vergencia promedio de 6 a 7 cm/año [1].

Los sismos pueden tener diferentes tamaños que son representados mediante un parámetro denominado magnitud sísmica. El cálculo de este parámetro es realizado mediante el uso de registros de movimiento del suelo, los cuales pueden ser medidos por sensores de despla-

* renzo.anchivilca@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



zamiento (GNSS), velocidad (sismógrafos) y aceleración (acelerógrafos).

En el Perú existe una Red Sismológica Nacional (RSN) que está constituido por un grupo de estaciones sísmicas localizadas a lo largo del territorio nacional y un sistema de comunicaciones para la transmisión de señales a los servidores locales [2]. La estación sísmica de Ñaña pertenece a la RSN, y sus registros sísmicos pueden ser obtenidos de forma libre y en tiempo real mediante la interfaz de búsqueda *Wilber 3* que brinda *Incorporated Research Institutions for Seismology* (IRIS).

Estimar la magnitud sísmica es importante porque nos da una idea de la cantidad de energía liberada en el proceso de ruptura, el cual usualmente genera un mayor grado de destrucción en las edificaciones y/o pérdidas humanas si su valor es considerable. Entre los eventos sísmicos que sucedieron en territorio peruano se pueden destacar el sismo de 1746 ($M_w = 8.5 - 9.0$ según [3]) ocurrido en el Callao, el cual produjo 1141 fallecidos en la ciudad de Lima [4], el sismo de 1970 ($M_w = 7.8$) que destruyó la ciudad de Yungay y dejó entre 66 000 y 80 000 fallecidos [5], y el sismo de 2007 ($M_w = 8.0$) que ocurrió en Pisco dejando casi 600 fallecidos [6].

Entre los estudios relevantes cabe destacar el de Jiménez (2010), quien determinó valores de magnitud que fueron homologados con magnitudes M_w del NEIC de 27 eventos sísmicos ocurridos en el periodo 2008-2010. Su estudio fue realizado por un sismógrafo en particular y los registros que utilizó fueron obtenidos mediante el protocolo de comunicación AutoDRM [7].

En este trabajo se establece una ecuación empírica de magnitud basado en el método de Jiménez (2010) [7], utilizando el sismógrafo triaxial *Streckeisen STS -1 con Metrozet E300* por ser el instrumento que está actualmente en uso y por tener una libre disponibilidad de sus registros sísmicos en la interfaz *IRIS Wilber 3*.

La ecuación encontrada en esta investigación permite estimar la magnitud de cualquier evento sísmico que haya presentado un valor mayor o igual a 4.8 (según NEIC) y haya tenido una distancia epicentral menor a 10.5° , independientemente de su profundidad focal.

2. Material y Métodos

2.1. Datos

De los sismos ocurridos en el Perú y sus zonas fronterizas entre los años 2011 y 2021 con magnitudes $M_w \geq 4.8$, no se utilizaron aquellos que tuvieron tiempos de origen cercanos (al poder generar una contribución en la magnitud estimada) ni los que generaron señales sísmicas que podrían presentar problemas de saturación (produciendo magnitudes subestimadas). Se obtuvieron 147 eventos sísmicos de los cuales se estimaron el contenido energético de cada señal E y la distancia epicentral D , y

se recopilaron datos de magnitud sísmica M_w y profundidad focal H .

Registros sísmicos

Los registros utilizados corresponden a lo medido por el sismógrafo *Streckeisen STS-1 con Metrozet E300* ubicado en la estación de Ñaña (Perú), obtenidos mediante la interfaz de búsqueda *IRIS Wilber 3* [8]. Esta interfaz permite descargar señales sísmicas registradas por diversas estaciones distribuidas en todo el planeta en distintos formatos de salida, tales como miniSEED, ASCII o SAC. Para este trabajo se descargaron registros en formato SAC, los cuales fueron utilizados para calcular el contenido energético de la señal E y la distancia epicentral D mediante los valores que están almacenados en la señal sísmica y en las variables de encabezado relacionadas a localizaciones geográficas.

Catálogo del NEIC

Par obtener los datos de profundidad focal H y magnitud sísmica M_w se utilizó un catálogo del NEIC, el cual puede ser descargado en forma libre y gratuita mediante la plataforma que brinda el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) [9]. Se utilizó este catálogo para seguir una metodología similar a Jiménez (2010), quien lo considera como una forma confiable de obtener magnitudes sísmicas inclusive de sismos que tuvieron gran tamaño. El catálogo fue descargado en formato CSV, pero también puede descargarse en otro tipo de formatos como GeoJson, KML y QuakeML.

2.2. Metodología

Se propone una ecuación de magnitud empírica obtenida a partir del modelo de regresión lineal múltiple. Este modelo establece que existe una influencia o correlación entre más de dos variables [10], y es expresado matemáticamente como:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \beta_3 x_{3i} + \dots + \beta_m x_{mi} + \epsilon_i \quad (1)$$

donde y_i es la variable endógena, x_{ji} son variables exógenas, ϵ_i es un valor de residuo y los términos β son parámetros desconocidos a estimar.

El método que se utiliza para encontrar los coeficientes β de la ecuación 1 es denominado mínimos cuadrados, el cual consiste en minimizar la suma de cuadrados de las desviaciones ϵ_i .

En este trabajo se propone una ecuación empírica de magnitud que presenta una dependencia lineal con el logaritmo decimal de la distancia epicentral D , profundidad focal H y el contenido energético de la 'señal' E , donde este último se encuentra referido a los tres registros de movimiento del suelo.

Esta ecuación de magnitud presenta la siguiente forma:

$$M = \beta_0 + \beta_1 \log(E) + \beta_2 \log(D) + \beta_3 \log(H) \quad (2)$$

donde el término M se refiere al valor de magnitud sísmica que predice el modelo y los términos β son parámetros desconocidos a estimar.

Los coeficientes de la ecuación 2 pueden encontrarse mediante el método de mínimos cuadrados si se establece una ecuación similar a 1. Eso se logra si se realiza los siguientes cambios de variable:

$$x_i = \log(E), \quad y_i = \log(D), \quad z_i = \log(H), \quad \hat{f}_i = M \quad (3)$$

y se agrega un término u_i que permita diferenciar los valores de magnitud observados g_i y los predichos por el modelo \hat{g}_i . La ecuación obtenida es:

$$g_i = \hat{g}_i + \epsilon_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 y_i + \beta_3 z_i + \epsilon_i \quad (4)$$

y su resolución implica minimizar la suma de cuadrados de las desviaciones:

$$\min_{a,b,c,d} S = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (g_i - (\beta_1 x_i + \beta_2 y_i + \beta_3 z_i + \beta_0))^2 \quad (5)$$

Resolviendo la ecuación 5 se obtiene:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_1} = 2 \sum_{i=1}^n ((\beta_1 x_i + \beta_2 y_i + \beta_3 z_i + \beta_0) - g_i) x_i = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_2} = 2 \sum_{i=1}^n ((\beta_1 x_i + \beta_2 y_i + \beta_3 z_i + \beta_0) - g_i) y_i = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_3} = 2 \sum_{i=1}^n ((\beta_1 x_i + \beta_2 y_i + \beta_3 z_i + \beta_0) - g_i) z_i = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_0} = 2 \sum_{i=1}^n ((\beta_1 x_i + \beta_2 y_i + \beta_3 z_i + \beta_0) - g_i) = 0 \quad (9)$$

a partir del cual se encuentra un sistema de cuatro ecuaciones lineales:

$$\beta_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_i y_i + \beta_3 \sum_{i=1}^n x_i z_i + \beta_0 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i g_i \quad (10)$$

$$\beta_1 \sum_{i=1}^n x_i y_i + \beta_2 \sum_{i=1}^n y_i^2 + \beta_3 \sum_{i=1}^n y_i z_i + \beta_0 \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n y_i g_i \quad (11)$$

$$\beta_1 \sum_{i=1}^n x_i z_i + \beta_2 \sum_{i=1}^n y_i z_i + \beta_3 \sum_{i=1}^n z_i^2 + \beta_0 \sum_{i=1}^n z_i = \sum_{i=1}^n z_i g_i \quad (12)$$

$$\beta_1 \sum_{i=1}^n x_i + \beta_2 \sum_{i=1}^n y_i + \beta_3 \sum_{i=1}^n z_i + \beta_0 n = \sum_{i=1}^n g_i \quad (13)$$

Las ecuaciones (10), (11), (12) y (13) serán resueltas a partir de los valores de distancia epicentral D , profundidad focal H , magnitud sísmica M_w y contenido energético de la señal E que hayan presentado o generado los eventos sísmicos estudiados.

2.3. Estimación del contenido energético E

El contenido energético de la señal que están asociadas a cada sismo fueron calculados mediante la ecuación propuesta por Jiménez (2010):

$$E_j = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^n [y'_{ij}]_E^2 + \sum_{i=1}^n [y'_{ij}]_N^2 + \sum_{i=1}^n [y'_{ij}]_Z^2 \right) \quad (14)$$

dónde E_j es el contenido energético del j -ésimo sismo y y'_{ij} son valores que se obtienen de sustraer a cada valor de amplitud el valor promedio de los datos de amplitud registrados ($y'_{ij} = y_{ij} - \text{mean}(y_{ij})$). Las notaciones (E , N , Z) se refieren a que esos valores están en base a lo registrado en dirección Este-Oeste, Norte-Sur y Vertical respectivamente.

2.4. Estimación de la distancia epicentral D

La distancia epicentral fue calculado a partir de la fórmula de Haversine. Su ecuación permite estimar la distancia más corta de separación d entre dos puntos ubicados sobre la superficie de una esfera [11].

Matemáticamente se expresa por:

$$d = 2R \sin^{-1}(\alpha) \quad (15)$$

donde R es el radio promedio de la Tierra y α se define como:

$$\alpha = \sqrt{\sin^2\left(\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{2}\right) + \cos \Phi_1 \cos \Phi_2 \sin^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)} \quad (16)$$

estando el par (Φ_i, λ_i) referido a las localizaciones geográficas (en radianes) de dos puntos ubicados en superficie terrestre.

La lectura de los archivos *.SAC para obtener los registros sísmicos del movimiento y los datos de localización geográfica de la estación y los epicentros puede ser realizado utilizando el código elaborado por [12].

2.5. Cálculo de los parámetros β

Teniendo los valores descritos anteriormente almacenados en formato Microsoft Excel, se procede a importar esos datos mediante el software MATLAB para encontrar los parámetros β requeridos. El script realizado para este propósito se describe en el apéndice del presente artículo.

3. Resultados y Discusión

Debido a la gran cantidad de resultados (147 sismos), en esta sección solo se muestran aquellos que tuvieron una magnitud $M_w \geq 5.8$ según NEIC.

En la Figura 1 se muestra la distribución espacial de 20 sismos que cumplen con lo establecido en el párrafo anterior y cuyos parámetros pueden observarse en las tablas 1 y 2.

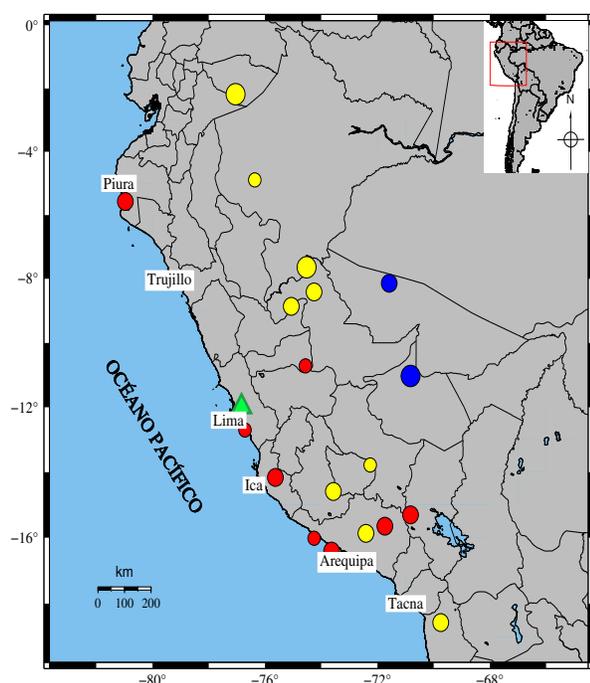


Figura 1: Sismos de magnitud $M_w \geq 5.8$ según NEIC ocurridos en el Perú y países fronterizos entre los años 2011 y 2021 que han sido utilizados en esta investigación. Los datos fueron obtenidos el 19/08/2021.

En la tabla 1 se muestran los resultados que se obtienen de calcular el logaritmo decimal al contenido energético de la señal E y la distancia epicentral D , además de los valores obtenidos del catálogo del NEIC para la profundidad focal H y magnitud sísmica M_w .

Fecha	Hora (UTC)	$\log(E)$	$\log(D)$	H (km)	M_w
24/08/2011	17:46:11.650	15.9542	2.7382	147	7.0
30/01/2012	05:11:00.950	15.3622	2.4453	43	6.4
07/06/2012	16:03:18.900	13.8138	2.8078	110	6.1
02/08/2012	09:38:30.850	14.0569	2.6841	145	6.1
10/11/2012	14:57:50.740	13.9233	2.5907	129	6.0
21/05/2013	23:02:45.130	12.9806	2.7187	92	5.8
17/07/2013	02:37:43.180	13.4654	2.8360	7	6.0
18/02/2014	23:35:58.270	14.7253	2.4436	57	5.9
15/03/2014	23:51:32.970	13.6143	2.9211	29	6.3
24/08/2014	23:21:45.520	15.6868	2.6696	101	6.8
29/06/2015	09:09:16.100	13.7713	2.7239	28	5.8
01/12/2016	22:40:26.610	13.9305	2.8734	12	6.2
02/01/2017	13:13:48.710	12.9494	2.8978	106	5.9
18/07/2017	02:05:19.750	14.2677	2.7799	44	6.4
13/08/2017	16:51:24.050	14.3959	2.4547	32	5.8
10/10/2017	06:32:21.170	13.2449	3.0253	85	6.3
24/08/2018	09:04:08.250	15.2785	2.8227	630	7.1
05/01/2019	19:25:38.520	14.4652	2.8553	570	6.8
22/02/2019	10:17:23.770	16.1696	3.0369	145	7.5
23/06/2021	02:54:18.667	16.1023	1.9116	49	5.9

Tabla 1: Sismos de magnitud $M_w \geq 5.8$ según NEIC que ocurrieron en el Perú y países fronterizos entre los años 2011 y 2021.

A partir del script realizado en MATLAB, habiendo calculado previamente $\log(H)$ y ordenado los valores en un archivo Excel, se obtienen los siguientes valores para los parámetros β :

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 0.4310 \\ \beta_2 &= 1.5226 \\ \beta_3 &= 0.0861 \\ \beta_0 &= -4.2997 \end{aligned}$$

definiendo así la ecuación empírica de magnitud propuesto en la ecuación 2:

$$M = 0.431 \log(E) + 1.5226 \log(D) + 0.0861 \log(H) - 4.2997 \quad (17)$$

La ecuación 17 permite obtener la magnitud de cualquier sismo que haya tenido una magnitud mayor o igual a 4.8 y haya ocurrido a una distancia epicentral menor a 10.5° (NNA-epicentro), sin presentar restricción en su profundidad focal.

En la tabla 2 se muestran los resultados de magnitud M encontrados para los 20 sismos que fueron descritos

anteriormente (Tabla 1), donde sus valores fueron aproximados hasta la décima para una mejor visualización.

Fecha	Mw	M	Lugar
24/08/2011	7.0	6.9	Ucayali, Perú
30/01/2012	6.4	6.2	Ica, Perú
07/06/2012	6.1	6.1	Arequipa, Perú
02/08/2012	6.1	6.0	Ucayali, Perú
10/11/2012	6.0	5.8	Ucayali, Perú
21/05/2013	5.8	5.6	Apurímac, Perú
17/07/2013	6.0	5.9	Arequipa, Perú
18/02/2014	5.9	5.9	Ica, Perú
15/03/2014	6.3	6.1	Piura, Perú
24/08/2014	6.8	6.7	Ayacucho, Perú
29/06/2015	5.8	5.9	Arequipa, Peru
01/12/2016	6.2	6.2	Puno, Perú
02/01/2017	5.9	5.9	Loreto, Perú
18/07/2017	6.4	6.2	Arequipa, Peru
13/08/2017	5.8	5.8	Pasco, Perú
10/10/2017	6.3	6.2	Arica, Chile
24/08/2018	7.1	6.8	Madre de Dios, Perú
05/01/2019	6.8	6.5	Tarauacá, Brasil
22/02/2019	7.5	7.5	Pastaza, Ecuador
23/06/2021	5.9	5.7	Lima, Peru

Tabla 2: Valores de magnitud M encontrados a partir de la ecuación empírica propuesta. Los sismos que se muestran presentaron una magnitud $M_w \geq 5.8$ según NEIC.

También se estimaron las diferencias entre las magnitudes M_w y M de los 147 sismos analizados para visualizar el valor de las desviaciones ϵ_i :

$$\epsilon_i = g_i - \hat{g}_i = M_w - M, \quad i = 1, \dots, 147 \quad (18)$$

Tomando en consideración solo el valor absoluto de estas diferencias aproximadas ($|M_w - M|$), se encontró que existen como máximo valores de 0.3. En porcentaje, los resultados obtenidos son (Figura 2):

- Caso I: Diferencias de magnitud 0 representan el 33.3% del total de sismos estudiados (49 casos).
- Caso II: Diferencias de magnitud 0.1 representan el 33.3% del total de sismos estudiados (49 casos).
- Caso III: Diferencias de magnitud 0.2 representan el 23.81% del total de sismos estudiados (35 casos).
- Caso IV: Diferencias de magnitud 0.3 representan el 9.52% del total de sismos estudiados (14 casos).

De lo anterior se encuentra que las diferencias $|M_w - M|$ aproximados a la décima que tienen como máximo un valor de 0.2 representan el 90.47% del total, considerando a la ecuación de magnitud 2 un método viable para obtener este parámetro.

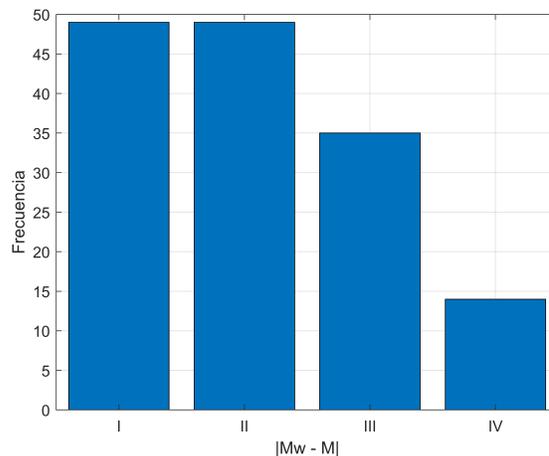


Figura 2: Gráfico de barras de las diferencias $|M_w - M|$ aproximados a la décima encontradas.

4. Conclusiones

Se propone que la magnitud de un sismo puede ser calculado a partir del contenido energético de la señal (E), distancia epicentral (D) y profundidad focal (H).

La ecuación empírica 17 permite estimar la magnitud sísmica de cualquier evento que satisfaga las condiciones descritas en el trabajo ($M_w \geq 4.8$, $\Delta < 10.5^\circ$).

Los coeficientes de la ecuación 17 son válidas para el sismógrafo *Streckeisen STS-1 con Metrozet E300* ubicado en Ñaña, Perú. Si se desea utilizar otro sismógrafo de banda ancha (ó VBB) deberá estimarse nuevamente los coeficientes ($\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$).

Se encontró como máximo una diferencia de 0.3 para los valores $|M_w - M|$ aproximados a la décima, concluyendo que la ecuación 17 genera valores de magnitud aceptables.

No es necesario realizar una deconvolución a los registros sísmicos para quitarles el efecto del instrumento, pues el método utilizado trabaja con los datos en forma estadística.

Agradecimientos

Agradecemos al Vicerrectorado de Investigación y Posgrado (VRIP) de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el financiamiento brindado mediante el

“Programa de Promoción de Trabajo de Investigación para optar el grado Académico de Bachiller 2020”, el cual sirvió como apoyo en la elaboración de un trabajo de investigación que proporcionó un conocimiento general de la magnitud sísmica [13].

También agradecemos a las instituciones NEIC e IRIS por la disponibilidad en la descarga de los datos utilizados en el presente estudio.

Apéndice

```
%% Estimación de los coeficientes  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  y  $\beta_3$ 
clear, clc
% Lectura de datos del archivo .xlsx
Parametros = xlsread('ExcelSismos.xlsx','I7:L153');
% Asignación de valores
```

```
x = Parametros(:,1); % x = log (E)
y = Parametros(:,2); % y = log(D)
z = Parametros(:,3); % z = log(H), H según NEIC
f = Parametros(:,4); % Mw según NEIC
n = length(x);
% Resolución del sistema de ecuaciones (10) - (13)
A = [sum(x.*x) sum(x.*y) sum(x.*z) sum(x);
     sum(x.*y) sum(y.*y) sum(y.*z) sum(y);
     sum(x.*z) sum(y.*z) sum(z.*z) sum(z);
     sum(x) sum(y) sum(z) n];
B = [sum(x.*f) sum(y.*f) sum(z.*f) sum(f)]';
X = inv(A)*B;
% Resultados
 $\beta_1$  = X(1);
 $\beta_2$  = X(2);
 $\beta_3$  = X(3);
 $\beta_0$  = X(4);
```

Referencias

- [1] E. Norabuena, L. Leffler, A. Mao, T. Dixon, S. Stein, S. Sacks, L. Ocola y M. Ellis. Space Geodetic Observations of Nazca-South America Convergence Across the Central Andes. *Science*. **279**(5349), 358-362 (1998).
- [2] IGP. Red Sísmica Nacional. Recuperado el 19/08/2021 de <https://ultimosismo.igp.gob.pe/red-sismica-nacional> (s.f.).
- [3] S. Beck y L. Nishenko. Variations in the mode of great earthquake rupture along the central Peru subduction zone. *Geophys. Res. Lett.* **57**, 1969-1972 (1990).
- [4] CISMIDADMIN. #EfeméridesSísmica: El mayor sismo de Lima 28/10/1746. Recuperado de <http://www.cismid.uni.edu.pe/efemeridessismica-el-mayor-sismo-de-lima-28-10-1746/> (2020).
- [5] BBC-News. Los 10 terremotos más potentes y mortíferos de la historia en América Latina. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41343606> (2017).
- [6] M. Blondet, J. Vargas, N. Tarque y C. Iwaki. Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. *Informes de la Construcción*. **63**(523), 41-50 (2011).
- [7] C. Jiménez. Cálculo de la magnitud sísmica para la estación de Ñaña. *Rev. Inv. Fís.* **13**(1), 1-7 (2010). Doi: <https://doi.org/10.15381/rif.v13i01.8924>
- [8] IRIS. Wilber 3: Select Event. Recuperado el 19/08/2021 de http://ds.iris.edu/wilber3/find_event (s.f.).
- [9] USGS. Earthquake Hazards Program. Recuperado el 19/08/2021 de <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/earthquakes> (s.f.).
- [10] R. Montero. Modelos de regresión lineal múltiple. Documentos de Trabajo en Economía Aplicada. Universidad de Granada (2016).
- [11] M. Vera. Determinación de fórmulas de atenuación sísmica para la zona central de Chile a partir de registros sísmicos del terremoto de Maule del 2010 obtenidos por la red de estaciones temporales IMAD [Tesis de pregrado, Universidad de Concepción]. Repositorio de la Universidad de Concepción (2014).
- [12] FTil. sacsun2mat/sacpc2mat. Recuperado de <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/5546-sacsun2mat-sacpc2mat> (2021).
- [13] R. Anchivilca. Métodos de cálculo de la magnitud de momento sísmico [Trabajo de Investigación de Bachiller, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Cybertesis UNMSM: <https://hdl.handle.net/20.500.12672/16573> (2021).