

CÁLCULO DE LA MAGNITUD LOCAL (ML) A PARTIR DE REGISTROS DE ACELERACIÓN: APLICACIÓN A SISMOS OCURRIDOS EN PERÚ

ESTIMATE OF THE LOCAL MAGNITUDE (ML) FROM RECORDS OF ACCELERATION: APPLICATION TO EARTHQUAKES IN THE PERU

Angélica Cahuari & Hernando Tavera

RESUMEN

En el presente estudio se propone una metodología práctica y rápida para estimar la magnitud local (ML) de sismos ocurridos a cortas distancias y registrados por las estaciones acelerográficas que integran la Red Sísmica Nacional a cargo del Instituto Geofísico del Perú. Los registros de aceleración fueron corregidos por su respuesta instrumental y luego usando la técnica de deconvolución y convolución, se ha simulado sus registros para un sismógrafo del tipo Wood-Anderson a fin de determinar la magnitud ML aplicando la relación propuesta por Richter (1935). Para corregir la función de atenuación (-LogAo) se ha evaluado las tablas propuestas por Richter (1935), Jennings y Kanamori (1983), Hutton y Boore (1987) y Espinoza (1989). Se ha utilizado una base de datos 85 sismos ocurridos en Perú entre los años 2003 y 2006, todos registrados por los acelerómetros ubicados en la localidad de Ñaña (NNA) y en el local del CISMID (CIS). Los resultados obtenidos para ML utilizando registros de aceleración y los métodos de Richter (1935) y Jennings y Kanamori (1983) muestran total similitud con los valores de magnitud ML(d) reportados por el Instituto Geofísico del Perú.

Palabras claves: Aceleración, magnitud local, red sísmica, respuesta instrumental.

ABSTRACT

We propose a practical and fast methodology to estimate the local magnitude (ML) of earthquakes occurring at short distance from accelerographic stations; this is tested with stations of the National Seismic Network. The records of acceleration were first corrected by their instrumental response and then, using the technique of deconvolution and convolution, we have generated simulated registers for the type Wood-Anderson's seismograph, with the intention of determine the magnitude ML, applying the relation proposed by Richter (1935). In order to correct the attenuation function (-LogAo), the tables proposed by Richter (1935), Kanamori (1983), Hutton & Boore (1987) and Espinoza (1989), have been evaluated. We have used a data base of 85 earthquakes occurred in Peru between 2003 and 2006, all of them registered by the accelerometers located at the locality of Ñaña (NNA) and at the CISMID (CIS). The results obtained for ML using records of acceleration and the methods of the Richter (1935) and Jennings & Kanamori (1983) evidence a very good fit with the values of magnitude ML (d) reported for the Geophysical Institute of the Peru (IGP)

Keywords: Acceleration, local magnitude, seismic network, instrumental response.

INTRODUCCIÓN

Los sismos son el resultado de un proceso complejo que depende del mecanismo de ruptura, de las dimensiones de la falla y de la geometría de la misma. Debido a que estos procesos aún no son conocidos en detalle, es necesario caracterizar de manera aproximada los movimientos que ellos

producen con variables simples, principalmente al evaluar su relación con las estructuras y con las obras de ingeniería. En general, cuando ocurre un sismo se procede a calcular sus parámetros hipocentrales (latitud, longitud, profundidad), la distancia epicentro-estación y su magnitud en cualquiera de las escalas ya conocidas (ML, mb,

Ms, Mw). De estas escalas, la denominada magnitud local (ML) fue introducida por Richter (1935) y tiene mayor importancia para los estudios de ingeniería en razón que es obtenida usando información con contenido de altas frecuencias. La magnitud ML se obtiene a partir de la máxima amplitud de la señal sísmica leída en el registro proveniente de un sismógrafo de tipo Wood-Anderson (WA) con un registro fotográfico que alcanza una amplificación de 2800 veces para un periodo natural de 0.8 s. Estos sismógrafos son sensibles a las altas frecuencias; por lo tanto, registran sismos que ocurren a distancias regionales, de ahí que su rango de frecuencias sean consideradas dentro del campo cercano. Magnitudes determinadas a distancias telesísmicas como la mb y la Ms, proporcionan la magnitud de un sismo en el campo lejano. En resumen, para calcular la magnitud ML es necesario contar con registros sísmicos del tipo WA; por lo tanto, los registros de un sismo obtenido con cualquier otro instrumento, incluyendo los acelerógrafos, deben ser convertidos para luego calcular ML usando la relación propuesta por Richter (1935).

Para el monitoreo y registro de los eventos sísmicos que ocurren en el Perú, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) mantiene operativa una Red Sísmica Nacional (RSN), compuesta por 15 estaciones de banda ancha, 18 de periodo corto y 13 acelerógrafos (Fig. 1), estos últimos con sensibilidades de 0.1 a 2g. Otras instituciones afines al campo de la ingeniería sísmica como el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) y la Universidad Católica del Perú (UCP), mantienen operativas en el país 17 y 2 acelerógrafos respectivamente. Del total de acelerógrafos de la RSN, 10 se encuentran funcionando en la ciudad de Lima los cuales permitirían en futuros proyectos realizar la microzonificación de dicha ciudad (Fig. 1). En general, los acelerogramas son útiles en el campo de la ingeniería sísmica ya que permiten conocer la amplificación sísmica del suelo a ser considerada en las normas de diseño sismorresistente. De ahí la importancia de determinar la magnitud ML usando el mismo tipo de información como una manera rápida de conocer el tamaño de los sismos, tal como lo vienen haciendo diversos institutos sismológicos como los de Venezuela y Colombia. En estas condiciones, para el Perú surge la necesidad de disponer de metodologías para estimar ML utilizando registros de aceleración.

En este estudio, se propone un procedimiento práctico y rápido para estimar la magnitud ML a

partir de registros de aceleración usando la técnica de deconvolución y convolución de señales sísmicas. Para tal fin se ha elaborado un algoritmo en lenguaje Pascal para ser aplicado a un total de 85 sismos ocurridos en Perú durante el periodo comprendido entre los años 2003 y 2006, y registrados por los acelerógrafos de Ñaña (NNA) y CISMID (CIS).

LA MAGNITUD LOCAL

La necesidad de conocer el tamaño de los sismos a partir de datos obtenidos a distancias cortas e intermedias de la fuente, ha permitido a muchos autores proponer diferentes técnicas y metodologías para el cálculo de ML utilizando registros de velocidad y aceleración. Por ejemplo, Jennings y Kanamori (1983) propusieron determinar ML a partir de los registros de aceleración utilizando el método de la deconvolución de señales para simular registros para un sismógrafo del tipo WA. Estos autores aplicaron el método a 14 registros de aceleración correspondientes al sismo de San Fernando de 1971 y obtuvieron una magnitud local promedio de 6.3 ML, que estaría de acuerdo con el valor obtenido previamente usando registros directamente obtenidos de una estación WA (6.34 ML). Las pequeñas diferencias observadas en los valores de ML fueron explicados por los autores como debidos a las limitaciones del rango dinámico de los instrumentos WA, siendo estas superadas con el uso de registros de aceleración. Sin embargo, encontraron problemas adicionales en la evaluación de ML en su forma original, ya que al considerar registros de aceleración a distancias cercanas a la fuente, los valores de la atenuación incluidos la función $-\text{Log } A_0$ (amplitud en función de la distancia epicentral), disminuían en $-1/4$ de unidad cerca de los 20km, y aumentaba en $+1/4$ de unidad cerca de los 50 a 60km; debido a esto, los autores propusieron una corrección a las tablas de atenuación dados por Richter (1935), las mismas que se presentan en la Tabla 1.

Tal como propuso Richter para el cálculo de ML, Espinosa (1989) describió un procedimiento simplificado que considera las máximas amplitudes de la señal sísmica directamente expresada en unidades de aceleración; es decir, sin la necesidad de convertirlos a registros de tipo WA. Para tal fin, Espinosa (1989) propone nuevos valores para la atenuación de la aceleración y en general, estos resultan siendo menores a los valores originales dados por Richter (1935), tal como se muestra en la tabla 1. Espinosa (1989) aplicó la metodología desarrollada a 54 registros de aceleración obtenidos

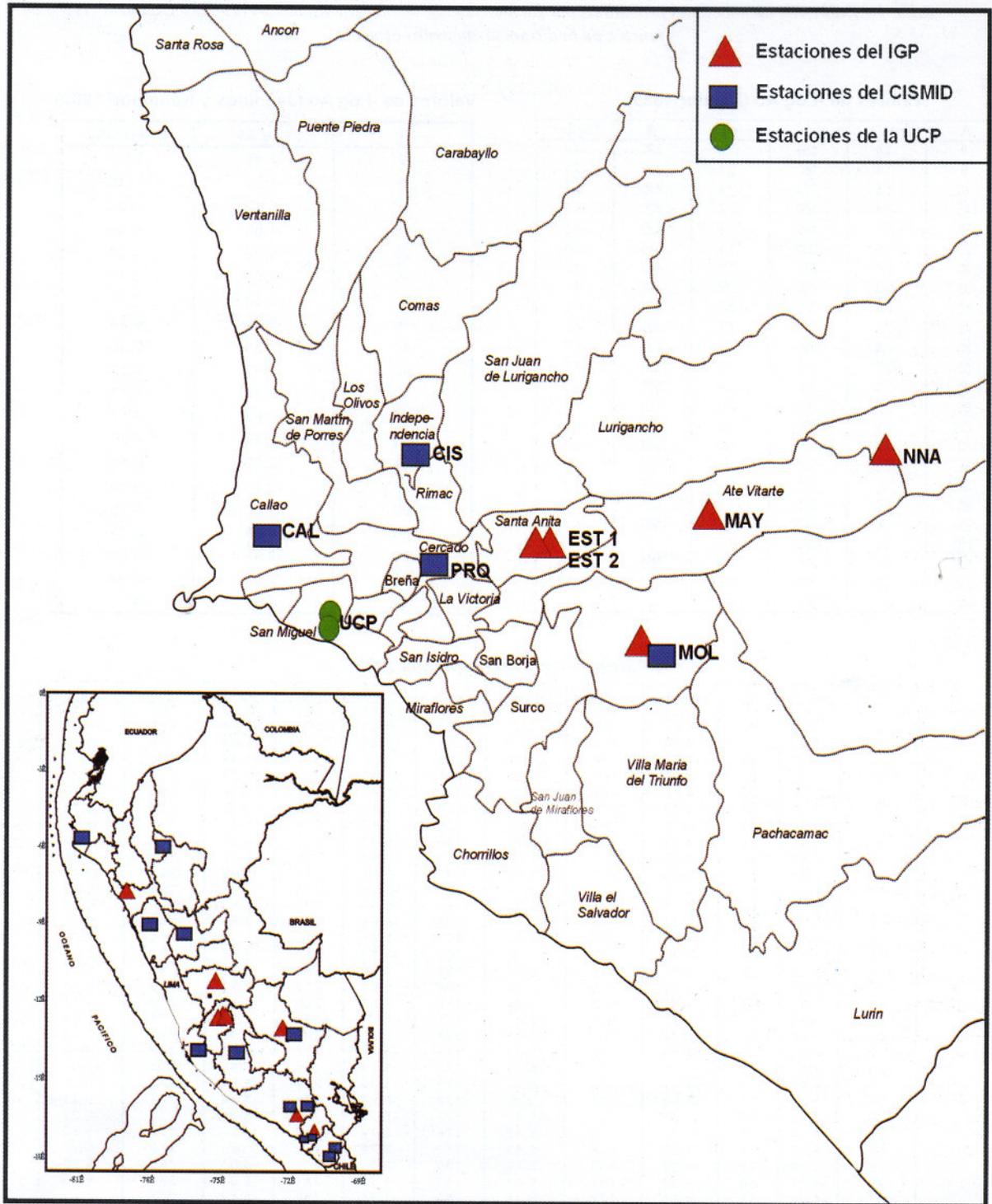


Figura 1.- Estaciones acelerográficas que integran la RSN (IGP, CISMID y UCP) que operan en Lima Metropolitana.

para el sismo del Imperial Valley del 15 de Octubre de 1979 obteniendo un valor promedio para la magnitud ML de 6.66, cercano a la magnitud de 6.6 ML reportado por el Observatorio de Pasadena para el mismo sismo.

Posteriormente, Hutton y Boore (1987) proponen

que ML puede ser obtenido a partir de la aceleración del suelo considerando la técnica de deconvolución, pero sugieren que las diferencias observadas por Jennings y Kanamori (1983) pueden ser corregidas al considerarse la distancia hipocentral. Entonces, la función de atenuación puede ser obtenido

Tabla 1.- Valores de atenuaciones propuestas por Richter (1935), Jennings y Kanamori (1983) y Espinosa (1989) en función de la distancia epicentro-estación.

Valores de -Log Ao (Richter 1935)

| Δ | Log Ao | Δ | Log Ao | Δ | Log Ao |
|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| 0 | -1.4 | 150 | -3.3 | 390 | -4.4 |
| 5 | -1.4 | 160 | -3.3 | 400 | -4.4 |
| 10 | -1.5 | 170 | -3.4 | 410 | -4.5 |
| 15 | -1.6 | 180 | -3.4 | 420 | -4.5 |
| 20 | -1.7 | 190 | -3.5 | 430 | -4.5 |
| 25 | -1.9 | 200 | -3.5 | 440 | -4.6 |
| 30 | -2.1 | 210 | -3.6 | 450 | -4.6 |
| 35 | -2.3 | 220 | -3.65 | 460 | -4.6 |
| 40 | -2.4 | 230 | -3.7 | 470 | -4.6 |
| 45 | -2.5 | 240 | -3.7 | 480 | -4.7 |
| 50 | -2.6 | 250 | -3.8 | 490 | -4.7 |
| 55 | -2.7 | 260 | -3.8 | 500 | -4.7 |
| 60 | -2.8 | 270 | -3.9 | 510 | -4.7 |
| 65 | -2.8 | 280 | -3.9 | 520 | -4.8 |
| 70 | -2.8 | 290 | -3.9 | 530 | -4.8 |
| 80 | -2.9 | 300 | -4 | 540 | -4.8 |
| 85 | -2.9 | 310 | -4 | 550 | -4.8 |
| 90 | -3 | 320 | -4.1 | 560 | -4.8 |
| 95 | -3 | 330 | -4.1 | 570 | -4.9 |
| 100 | -3 | 340 | -4.2 | 580 | -4.9 |
| 110 | -3.1 | 350 | -4.2 | 590 | -4.9 |
| 120 | -3.1 | 360 | -4.3 | 600 | -4.9 |
| 130 | -3.2 | 370 | -4.3 | | |
| 140 | -3.2 | 380 | -4.3 | | |

Valores de -Log Ao (Jennings y Kanamori 1983)

| Δ | Log A0 | Diferencia |
|-----|--------|------------|
| 0 | -1.40 | 0.00 |
| 5 | -1.58 | -0.18 |
| 10 | -1.72 | -0.22 |
| 15 | -1.86 | -0.26 |
| 20 | -1.99 | -1.28 |
| 25 | -2.08 | -0.18 |
| 30 | -2.18 | -0.08 |
| 35 | -2.26 | 0.04 |
| 40 | -2.34 | 0.06 |
| 45 | -2.40 | 0.10 |
| 50 | -2.47 | 0.13 |
| 55 | -2.53 | 0.17 |
| 60 | -2.60 | 0.20 |
| 65 | -2.65 | 0.15 |
| 70 | -2.70 | 0.10 |
| 80 | -2.80 | 0.10 |
| 85 | -2.86 | 0.04 |
| 90 | -2.91 | 0.09 |
| 95 | -2.96 | 0.04 |
| 100 | -3.00 | 0.00 |

Valores de -Log Ao (Espinosa 1989)

| Δ | Log Ao | Δ | Log Ao | Δ | Log Ao | Δ | Log Ao | Δ | Log Ao | Δ | Log Ao |
|----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| 1 | -3.31 | 51 | -4.61 | 101 | -5.19 | 152 | -5.58 | 202 | -5.87 | 252 | -6.11 |
| 2 | -3.32 | 52 | -4.62 | 102 | -5.2 | 153 | -5.59 | 203 | -5.88 | 253 | -6.11 |
| 3 | -3.33 | 53 | -4.64 | 103 | -5.21 | 154 | -5.59 | 204 | -5.88 | 254 | -6.12 |
| 4 | -3.37 | 54 | -4.65 | 104 | -5.22 | 155 | -5.6 | 205 | -5.89 | 255 | -6.12 |
| 5 | -3.4 | 55 | -4.67 | 105 | -5.22 | 156 | -5.61 | 206 | -5.89 | 256 | -6.12 |
| 6 | -3.45 | 56 | -4.68 | 106 | -5.25 | 157 | -5.61 | 207 | -5.9 | 257 | -6.13 |
| 7 | -3.47 | 57 | -4.69 | 108 | -5.26 | 158 | -5.62 | 208 | -5.9 | 258 | -6.13 |
| 8 | -3.52 | 58 | -4.71 | 109 | -5.27 | 159 | -5.63 | 209 | -5.91 | 259 | -6.14 |
| 9 | -3.55 | 59 | -4.72 | 110 | -5.28 | 160 | -5.63 | 210 | -5.91 | 260 | -6.14 |
| 10 | -3.57 | 60 | -4.74 | 111 | -5.29 | 161 | -5.64 | 211 | -5.92 | 261 | -6.15 |
| 11 | -3.62 | 61 | -4.75 | 112 | -5.29 | 162 | -5.64 | 212 | -5.92 | 262 | -6.15 |
| 12 | -3.66 | 62 | -4.76 | 113 | -5.3 | 163 | -5.65 | 213 | -5.93 | 263 | -6.15 |
| 13 | -3.7 | 63 | -4.78 | 114 | -5.31 | 164 | -5.66 | 214 | -5.93 | 264 | -6.16 |
| 14 | -3.74 | 64 | -4.79 | 115 | -5.32 | 165 | -5.66 | 215 | -5.94 | 265 | -6.16 |
| 15 | -3.78 | 65 | -4.8 | 116 | -5.33 | 166 | -5.67 | 216 | -5.94 | 266 | -6.17 |
| 16 | -3.82 | 66 | -4.82 | 117 | -5.33 | 167 | -5.67 | 217 | -5.95 | 267 | -6.17 |
| 17 | -3.85 | 67 | -4.83 | 118 | -5.34 | 168 | -5.68 | 218 | -5.95 | 268 | -6.18 |
| 18 | -3.89 | 68 | -4.84 | 119 | -5.35 | 169 | -5.69 | 219 | -5.96 | 269 | -6.18 |
| 19 | -3.92 | 69 | -4.85 | 120 | -5.36 | 170 | -5.69 | 220 | -5.96 | 270 | -6.18 |
| 20 | -3.95 | 70 | -4.87 | 121 | -5.37 | 171 | -5.7 | 221 | -5.97 | 271 | -6.19 |
| 21 | -3.28 | 71 | -4.88 | 122 | -5.37 | 172 | -5.7 | 222 | -5.97 | 272 | -6.19 |
| 22 | -4.01 | 72 | -4.89 | 123 | -5.38 | 173 | -5.71 | 223 | -5.98 | 273 | -6.2 |
| 23 | -4.04 | 73 | -4.9 | 124 | -5.39 | 174 | -5.72 | 224 | -5.98 | 274 | -6.2 |
| 24 | -4.06 | 74 | -4.91 | 125 | -5.4 | 175 | -5.72 | 225 | -5.99 | 275 | -6.2 |
| 25 | -4.09 | 75 | -4.92 | 126 | -5.4 | 176 | -5.73 | 226 | -5.99 | 276 | -6.21 |
| 26 | -4.12 | 76 | -4.94 | 127 | -5.41 | 177 | -5.73 | 227 | -5.99 | 277 | -6.21 |
| 27 | -4.14 | 77 | -4.95 | 128 | -5.42 | 178 | -5.74 | 228 | -6 | 278 | -6.22 |
| 28 | -4.17 | 78 | -4.96 | 129 | -5.43 | 179 | -5.75 | 229 | -6 | 279 | -6.22 |
| 29 | -4.19 | 79 | -4.97 | 130 | -5.43 | 180 | -5.75 | 230 | -6.01 | 280 | -6.22 |
| 30 | -4.21 | 80 | -4.98 | 131 | -5.43 | 181 | -5.76 | 231 | -6.01 | 281 | -6.23 |
| 31 | -4.24 | 81 | -4.99 | 132 | -5.44 | 182 | -5.76 | 232 | -6.02 | 282 | -6.23 |
| 32 | -4.26 | 82 | -5 | 133 | -5.45 | 183 | -5.77 | 233 | -6.02 | 283 | -6.24 |
| 33 | -4.28 | 83 | -5.01 | 134 | -5.46 | 184 | -5.77 | 234 | -6.03 | 284 | -6.24 |
| 34 | -4.3 | 84 | -5.02 | 135 | -5.46 | 185 | -5.78 | 235 | -6.03 | 285 | -6.24 |
| 35 | -4.32 | 85 | -5.03 | 136 | -5.47 | 186 | -5.78 | 236 | -6.04 | 286 | -6.25 |
| 36 | -4.34 | 86 | -5.04 | 137 | -5.48 | 187 | -5.79 | 237 | -6.04 | 287 | -6.25 |
| 37 | -4.36 | 87 | -5.05 | 138 | -5.48 | 188 | -5.8 | 238 | -6.05 | 288 | -6.25 |
| 38 | -4.38 | 88 | -5.06 | 139 | -5.49 | 189 | -5.8 | 239 | -6.05 | 289 | -6.26 |
| 39 | -4.4 | 89 | -5.07 | 140 | -5.5 | 190 | -5.81 | 240 | -6.05 | 290 | -6.26 |
| 40 | -4.42 | 90 | -5.08 | 141 | -5.51 | 191 | -5.81 | 241 | -6.06 | 291 | -6.27 |
| 41 | -4.44 | 91 | -5.09 | 142 | -5.51 | 192 | -5.82 | 242 | -6.06 | 292 | -6.27 |
| 42 | -4.46 | 92 | -5.1 | 143 | -5.52 | 193 | -5.82 | 243 | -6.07 | 293 | -6.27 |
| 43 | -4.47 | 93 | -5.11 | 144 | -5.53 | 194 | -5.83 | 244 | -6.07 | 294 | -6.28 |
| 44 | -4.49 | 94 | -5.12 | 145 | -5.53 | 195 | -5.83 | 245 | -6.08 | 295 | -6.28 |
| 45 | -4.51 | 95 | -5.13 | 146 | -5.54 | 196 | -5.84 | 246 | -6.08 | 296 | -6.29 |
| 46 | -4.53 | 96 | -5.14 | 147 | -5.55 | 197 | -5.84 | 247 | -6.09 | 297 | -6.29 |
| 47 | -4.54 | 97 | -5.15 | 148 | -5.55 | 198 | -5.85 | 248 | -6.09 | 298 | -6.29 |
| 48 | -4.56 | 98 | -5.16 | 149 | -5.56 | 199 | -5.86 | 249 | -6.09 | 299 | -6.3 |
| 49 | -4.57 | 99 | -5.17 | 150 | -5.57 | 200 | -5.86 | 250 | -6.1 | 300 | -6.3 |
| 50 | -4.59 | 100 | -5.18 | 151 | -5.57 | 201 | -5.87 | 251 | -6.1 | | |

directamente a partir de la siguiente relación: $-\log A_0 = 1.110 \log(r/100) + 0.00189(r - 100) + 3.0$, donde r es la distancia hipocentral. El método propuesto fue aplicado a un total de 972 sismos ocurridos en California obteniéndose resultados similares con los valores de magnitud expresados en la misma escala, pero obtenidos directamente de los registros de tipo WA.

En general, los autores antes indicados han utilizado dos procedimientos para el cálculo de ML, el primero usando las amplitudes máximas del registro del sismo en función de la aceleración (Espinoza, 1989) y el segundo, considerando la técnica de deconvolución de señales sísmicas (Jennings y Kanamori, 1983; Hutton y Boore, 1987). En ambos casos, las diferencias observadas entre las magnitudes ML obtenidas directamente de registros tipo WA en comparación con las propuestas por los autores antes indicados, han venido siendo corregidas en función de $-\log A_0$ que define la atenuación de la señal en función de la distancia epicentro-estación o hipocentro-estación.

METODOLOGÍA

A fin de calcular la magnitud ML usando registros de aceleración se ha desarrollado una metodología de procesamiento de la señal sísmica que considera las técnicas de deconvolución y convolución de señales para simular registros de periodo corto en unidades de desplazamiento, típicos de los obtenidos con sismógrafos WA. El procedimiento seguido considera el uso de registros de aceleración en sus componentes horizontales que son corregidos por su respuesta instrumental para luego realizar, sobre la señal, una doble integración para disponer de registros en desplazamiento y luego mediante la técnica de convolución simular los registros como si hubieran sido registrados por un sismógrafo del tipo WA. Convertido el registro, se procede a leer su amplitud máxima y los tiempos de llegada de las ondas P y S a fin de determinar la distancia epicentral. El cálculo de ML se realiza haciendo uso de la metodología de Richter (1935), Jennings y Kanamori (1983), y Hutton y Boore (1987). Del mismo modo, se hace uso del método de Espinoza (1989) para calcular ML a partir del valor de aceleración máxima leída inicialmente.

La metodología descrita ha sido integrada en un programa construido en lenguaje Pascal y aplicado a un total de 85 sismos registrados por las estaciones acelerográficas de NNA y CIS. Los resultados obtenidos son comparados con las magnitudes

ML(d) (magnitud local en función de la duración del registro) reportadas por el IGP y otras agencias como el National Earthquake Information Center (NEIC).

APLICACIÓN A SISMOS OCURRIDOS EN PERÚ

En este estudio se utiliza una base de datos que considera 85 sismos registrados en dos estaciones acelerométricas ubicadas en Lima, una en la localidad de Ñaña (NNA) y la otra en el local del CISMID (CIS). Los sismos corresponden al periodo 2003 a 2006 y sus parámetros hipocentrales (latitud, longitud, y profundidad) son presentados en la Tabla 2 y en la figura 2.

Siguiendo los métodos descritos anteriormente, para el total de sismos con registro en aceleración se ha simulado sus equivalentes para un sismógrafo de tipo WA y algunos ejemplos de los resultados obtenidos se muestran en la figura 3. Del mismo modo, en la Tabla 2 se presenta el resumen de sus valores de magnitud ML obtenidos haciendo uso de los métodos propuestos por Richter (1935_MLR), Jennings y Kanamori (1983_MLJ), Hutton y Boore (1983_MLH) y Espinoza (1989_MLE), en comparación con los valores de magnitud reportados por el IGP (ML(d)) y NEIC (mb). En la tabla 2, se observa que los valores de ML obtenidos con los métodos de MLR y MLJ presentan entre ellos diferencias menores a 0.3 unidades de magnitud, siendo a la vez similares con los valores reportados por el IGP y el NEIC. Las mayores diferencias en los valores de ML se observan cuando se incluye en la comparación los valores obtenidos con el método de Espinoza (1989), y en este caso, los valores de ML resultarían sobre-estimados con diferencias del orden de 1.5 unidades de magnitud. Diferencias del orden de 0.5 unidades se observa cuando se compara los valores de ML con los obtenidos siguiendo el método de MLH. Estos resultados pueden ser mejor visualizados en la figura 4, todos expresados en función de la distancia epicentral y diferenciados por símbolos de acuerdo al método usado para el cálculo de ML.

A fin de evaluar los valores de ML obtenidos con los métodos antes indicados, en la figura 5 se muestra las correlaciones obtenidas con los valores de magnitud ML(d) obtenidos por el IGP haciendo uso de las ecuaciones descritas por Ccallo y Tavera (2002). En dicha figura se observa que existe mayor similitud en los valores de ML obtenidos con los métodos de MLR y MLJ con rangos que va desde

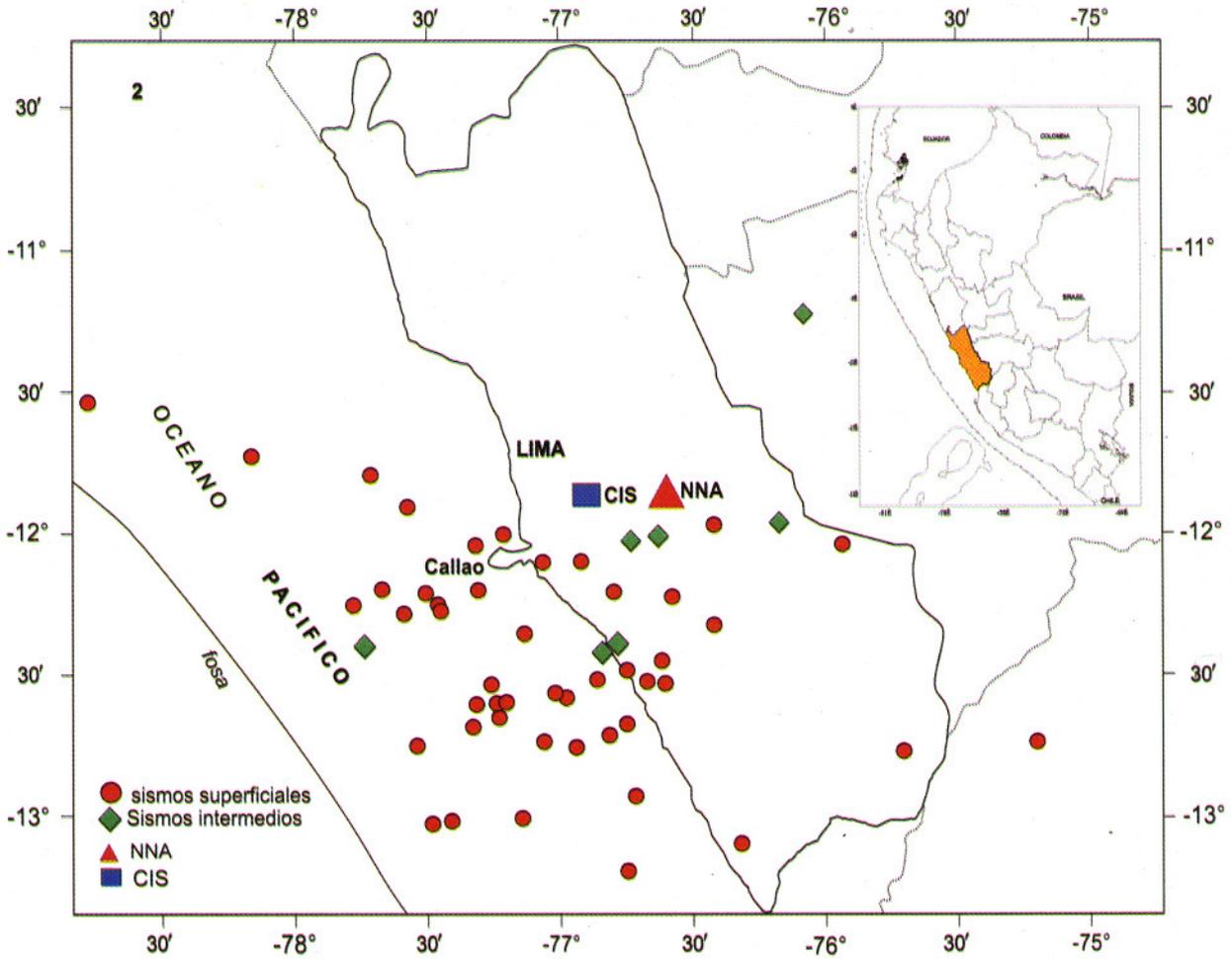


Figura 2.- Distribución espacial de los sismos utilizados en el presente estudio, periodo 2003-2006.

$3.0 < ML < 6.0$; mientras que, la dispersión es mayor cuando se considera MLH y MLE con rangos de $3.5 < ML < 6.2$ y $4.0 < ML < 6.8$ respectivamente. Aunque, no se han realizado comparaciones con la magnitud "mb" reportada por el NEIC, en la tabla 2 se observa que las diferencias en los valores de magnitud son pequeñas y cercanas a las obtenidas en este estudio y con las reportadas por el IGP.

DISCUSIÓN

En la actualidad son muchos los métodos usados para el cálculo de la magnitud de los sismos, siendo de mayor aceptación el uso de registros sísmicos obtenidos a distancias regionales y telesísmicas con las cuales se estima las magnitudes mb, Ms y Mw. Para distancias cortas, son muchos los estudios en los cuales se hace uso de las técnicas de convolución de señales para simular registros WA y así calcular la magnitud ML aplicando la metodología propuesta por Richter en los años 50. De estos, los que utilizan registros de aceleración sustentan su validez al mayor rango dinámico de los

acelerómetros en comparación con los sismómetros WA. Las diferencias observadas en los valores de ML obtenidos haciendo uso registros del tipo WA y de aceleración, permitieron a autores como Jennings y Kanamori (1983), Espinosa (1989) y Hutton y Boore (1987) realizar correcciones en las ecuaciones de atenuación expresadas en función de $-\log A_0$, considerando básicamente la distancia epicentral o hipocentral. Las modificaciones propuestas en dichas ecuaciones permitieron construirse tablas de valores de atenuación que fueron probadas con cada método y así lograr obtener valores óptimos para ML.

En general, los resultados propuestos por Richter (1935), Jennings y Kanamori (1983), Hutton y Boore (1987) y Espinosa (1989) han demostrado ser válidos únicamente para las regiones cuyos datos sísmicos fueron utilizados en su aplicación no pudiéndose extender a otras regiones. En todos los métodos el parámetro más inestable resulta ser el término $-\log A_0$, siendo el procedimiento válido para su estimación conocer las aceleraciones producidas

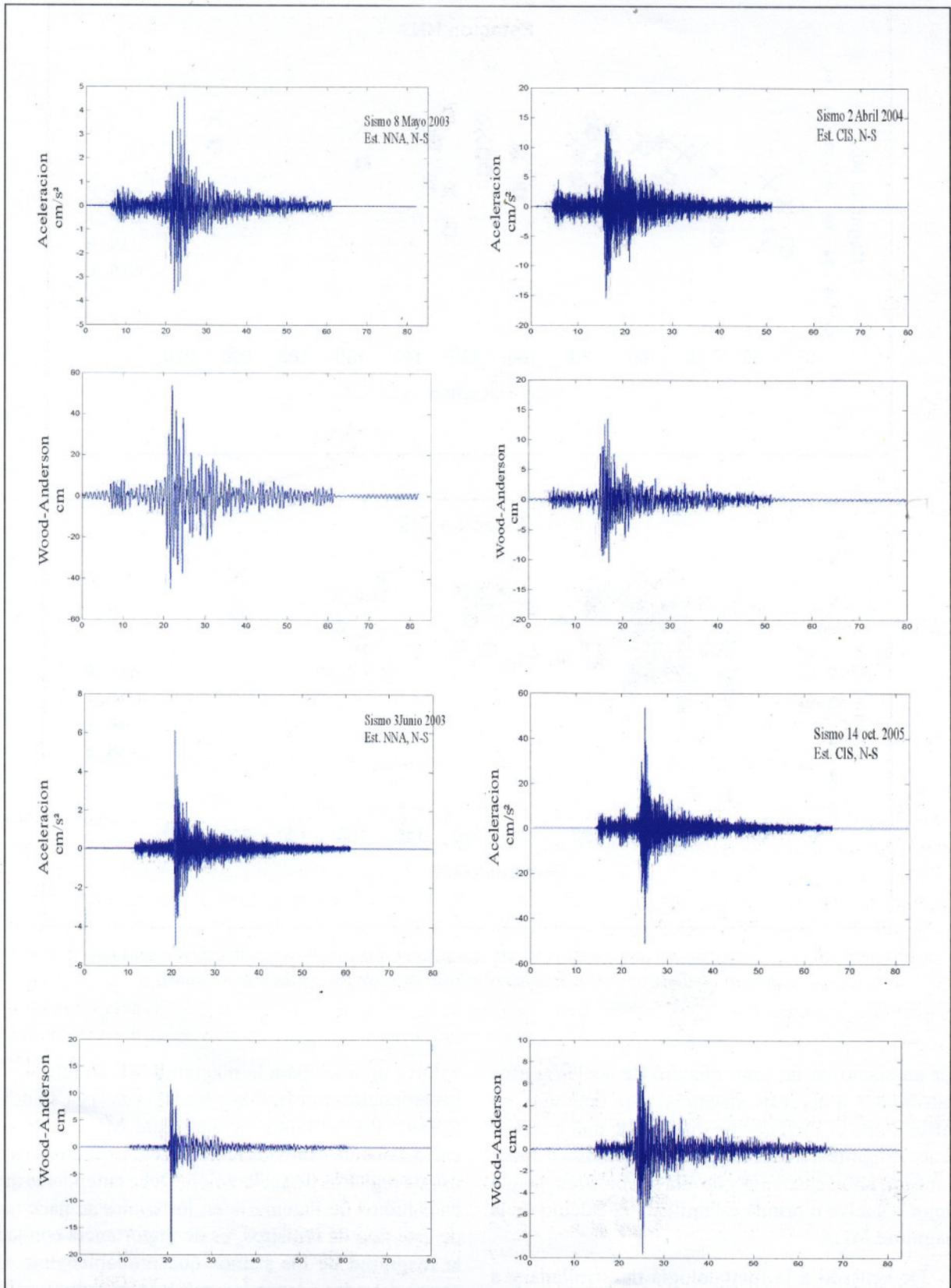


Figura 3.- Ejemplos de registros de aceleración convertidos a registros de tipo WA.

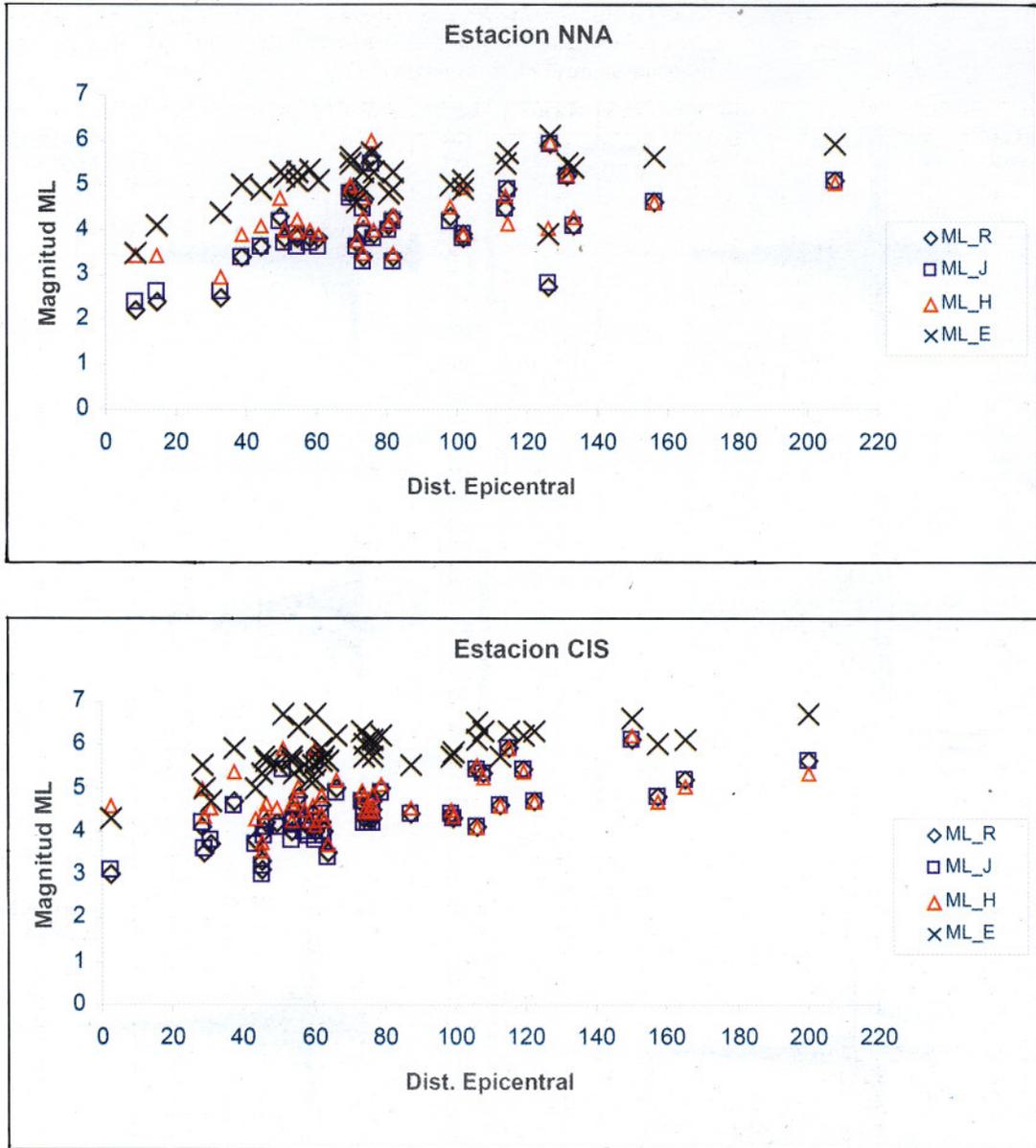


Figura 4.- Distribución de los valores de ML obtenidos en este estudio en función de sus distancias epicentrales. Cada símbolo representa el método utilizado para estimar la magnitud.

por un sismo en un gran número de acelerógrafos distribuidos a diversas distancias. Sin embargo, en países como el Perú que no dispone de una gran red de acelerógrafos, frecuentemente se procede a evaluar la información existente y de ella se considera la que mejor resuelve o brinda estabilidad el cálculo de la magnitud ML.

De acuerdo a la metodología desarrollada y a los resultados obtenidos en este estudio, para sismos ocurridos en Perú y registrados por acelerómetros (NNA y CIS), los métodos de Richter (1935) y Jennings y Kanamori (1983) permiten calcular

valores óptimos para la magnitud ML en relación a los propuestos por Hutton y Boore (1987) y Espinoza (1989). Por lo tanto, la magnitud ML puede ser correctamente estimada teniendo como alternativa el uso de registros de aceleración. Debe entenderse que en estudios de ingeniería en los cuales se hace uso de este tipo de registros, es de importancia conocer la magnitud de los sismos que probablemente no son registrados adecuadamente por las redes locales o regionales y en este caso, la metodología utilizada en este estudio resulta ser una buena opción en el cálculo de ML.

Tabla 2.- Parámetros hipocentrales de los sismos utilizados en este estudio y resumen de los valores de magnitud local (ML) obtenidos en este estudio aplicando los métodos propuestos por Richter (1935), Jennings y Kanamori (1983), Hutton y Boore (1987) y Espinosa (1989).

| Sismos | Estacion | Lat. | Long. | Profundidad | Dist.epic. | ML_R | ML_J | ML_H | ML_E | NEIC (mb) | IGP (MLd) |
|--------------|----------|----------|----------|-------------|------------|------|------|------|------|-----------|-----------|
| 05/03/20003 | CIS | -12.0900 | -77.6600 | 33 | 66.28 | 5.00 | 4.90 | 5.16 | 6.20 | | 4.40 |
| 06/03/20003 | NNA | -12.1482 | -77.4549 | 45 | 69.82 | 4.90 | 4.80 | 5.00 | 5.50 | 4.4 | 4.40 |
| 28/03/20003 | CIS | -12.7044 | -75.6822 | 98 | 165.14 | 5.20 | 5.20 | 5.01 | 6.10 | 4.5 | 4.60 |
| 15/04/20003 | CIS | -12.1751 | -77.4432 | 35 | 45.59 | 4.00 | 3.90 | 4.44 | 5.70 | | 4.00 |
| 26/04/20003 | NNA/CIS | -12.5523 | -77.2225 | 46 | 76.20 | 4.00 | 4.00 | 4.10 | 5.50 | | 4.10 |
| 08/05/20003 | NNA/CIS | -12.9795 | -77.3952 | 51 | 126.50 | 5.90 | 5.90 | 5.93 | 6.20 | 5.7 | 5.50 |
| 28/05/20003 | CIS | -12.4791 | -77.0127 | 33 | 59.88 | 4.40 | 4.20 | 4.56 | 5.50 | | 5.50 |
| 28b/05/2003 | CIS | -12.5200 | -77.2300 | 51 | 51.29 | 5.60 | 5.40 | 5.92 | 6.70 | 5.6 | 5.30 |
| 29/05/20003 | CIS | -12.5298 | -77.2976 | 34 | 62.27 | 4.20 | 4.00 | 4.39 | 5.60 | | 4.30 |
| 01/06/20003 | CIS | -12.6186 | -77.3271 | 15 | 74.16 | 4.30 | 4.20 | 4.43 | 5.70 | | 3.90 |
| 12/06/20003 | CIS | -12.5216 | -77.1937 | 43 | 58.63 | 4.10 | 3.90 | 4.25 | 5.20 | | 4.10 |
| 13/06/20003 | NNA | -12.5216 | -77.1937 | 43 | 71.81 | 3.70 | 3.60 | 3.77 | 4.60 | | 4.10 |
| 17/06/20003 | NNA | -11.7837 | -77.5616 | 56 | 81.81 | 3.40 | 3.30 | 3.47 | 4.90 | | 4.10 |
| 17/06/20003 | CIS | -11.7837 | -77.5616 | 56 | 60.41 | 4.00 | 3.80 | 4.14 | 5.20 | | 4.10 |
| 02/07/20003 | CIS | -11.9109 | -76.7229 | 87 | 37.24 | 4.70 | 4.60 | 5.36 | 5.90 | 4.5 | 4.50 |
| 19/09/20003 | CIS | -12.0971 | -77.2971 | 51 | 28.35 | 4.10 | 4.20 | 5.00 | 5.50 | | 4.30 |
| 06/10/20003 | CIS | -11.5809 | -78.1623 | 80 | 112.98 | 4.60 | 4.60 | 4.60 | 5.70 | 4.9 | 4.80 |
| 15/10/20003 | CIS | -11.6633 | -77.7112 | 44 | 87.30 | 4.40 | 4.40 | 4.52 | 5.50 | | 4.80 |
| 04/11/20003 | CIS | -11.8816 | -77.2021 | 30 | 76.75 | 4.50 | 4.40 | 4.58 | 6.10 | | 3.90 |
| 08/12/20003 | CIS | -12.1902 | -77.5812 | 38 | 60.46 | 5.80 | 5.60 | 5.93 | 6.70 | 4.4 | 4.70 |
| 30/12/20003 | NNA/CIS | -12.6927 | -76.9379 | 55 | 76.47 | 4.40 | 4.30 | 4.50 | 5.25 | | 4.30 |
| 22/02/20004 | CIS | -13.1600 | -76.7300 | 54 | 45.17 | 3.10 | 3.00 | 3.55 | 5.30 | | 3.50 |
| 23/02/20004 | NNA | -12.1200 | -76.5600 | 45 | 32.97 | 2.50 | 2.60 | 2.96 | 4.40 | | 3.50 |
| 24/02/20004 | NNA | -12.5100 | -76.9600 | 51 | 60.52 | 3.80 | 3.60 | 3.89 | 5.10 | | 4.10 |
| 24/02/20004 | CIS | -12.5100 | -76.9600 | 51 | 76.58 | 4.30 | 4.20 | 4.46 | 5.90 | | 4.10 |
| 14/03/20004 | CIS | -12.9800 | -77.4800 | 45 | 119.13 | 5.40 | 5.40 | 5.38 | 6.20 | 4.6 | 4.90 |
| 14/03/20004 | NNA | -12.9800 | -77.4800 | 45 | 131.25 | 5.20 | 5.20 | 5.22 | 5.50 | 4.6 | 4.90 |
| 02/04/20004 | NNA | -12.9700 | -77.1200 | 37 | 114.32 | 4.90 | 4.90 | 4.16 | 5.70 | 4.9 | 4.90 |
| 02/04/20004 | CIS | -12.9700 | -77.1200 | 37 | 108.11 | 5.30 | 5.30 | 5.24 | 6.30 | 4.9 | 4.90 |
| 18/04/20004 | CIS | -12.2300 | -76.4000 | 74 | 74.12 | 4.60 | 4.50 | 4.80 | 6.00 | | 4.00 |
| 19/05/20004 | NNA/CIS | -12.3700 | -76.6000 | 51 | 49.71 | 4.25 | 4.15 | 4.63 | 5.40 | | 4.00 |
| 08/07/20004 | CIS | -13.0600 | -76.3000 | 67 | 99.60 | 4.30 | 4.30 | 4.35 | 5.80 | | 4.00 |
| 19/05/20004 | NNA | -12.1100 | -77.5000 | 51 | 73.57 | 4.60 | 4.50 | 4.70 | 5.30 | | 4.00 |
| 09/07/20004 | NNA | -12.8900 | -76.7000 | 64 | 102.06 | 3.80 | 3.80 | 4.95 | 5.10 | | 4.10 |
| 11/07/20004 | CIS | -12.4500 | -76.5900 | 50 | 75.61 | 4.30 | 4.20 | 4.49 | 6.10 | | 4.10 |
| 12/07/20004 | NNA | -12.4500 | -76.5900 | 50 | 58.25 | 3.80 | 3.70 | 3.98 | 5.33 | 4.4 | 3.70 |
| 15/07/20004 | NNA | -12.2600 | -77.1200 | 45 | 44.07 | 3.60 | 3.60 | 4.11 | 4.90 | 5.3 | 5.40 |
| 15/07/20004 | CIS | -12.2600 | -77.1200 | 45 | 28.78 | 3.50 | 3.60 | 4.35 | 5.00 | 5.3 | 5.40 |
| 29/07/20004 | NNA/CIS | -11.3800 | -78.7900 | 25 | 208.07 | 5.40 | 5.40 | 5.20 | 6.30 | 4.2 | 4.20 |
| 30/07/20004 | NNA/CIS | -11.9200 | -75.9200 | 106 | 157.39 | 4.60 | 4.50 | 4.60 | 5.50 | 4.2 | 4.20 |
| 31/07/20004 | NNA | -12.4400 | -76.6600 | 58 | 54.35 | 3.80 | 3.60 | 3.96 | 5.10 | | 4.00 |
| 31b/07/20004 | NNA | -12.4500 | -76.6900 | 52 | 54.28 | 3.90 | 3.90 | 4.22 | 5.30 | | 3.80 |
| 31/07/20004 | CIS | -12.4400 | -76.6600 | 58 | 62.37 | 4.60 | 4.40 | 4.81 | 5.90 | | 4.00 |
| 22/08/20004 | CIS | -12.6900 | -77.5300 | 35 | 54.33 | 4.50 | 4.30 | 4.72 | 5.30 | | 4.10 |
| 22/08/20004 | NNA | -12.6900 | -77.5300 | 35 | 156.15 | 4.60 | 4.60 | 4.60 | 5.60 | | 4.10 |
| 05/09/20004 | CIS | -11.9200 | -77.3200 | 57 | 30.75 | 3.70 | 3.80 | 4.52 | 4.70 | | 3.90 |
| 15/09/20004 | CIS | -12.6700 | -75.1800 | 45 | 64.06 | 3.50 | 3.40 | 3.72 | 5.60 | | 3.70 |
| 27/09/20004 | CIS | -12.4500 | -77.2500 | 34 | 53.41 | 4.00 | 3.80 | 4.26 | 5.70 | | 3.90 |
| 01/10/20004 | CIS | -11.9900 | -77.0600 | 59 | 2.42 | 3.00 | 3.10 | 4.56 | 4.30 | | 4.50 |
| 18/10/20004 | CIS | -12.6000 | -76.7400 | 66 | 73.54 | 4.80 | 4.70 | 4.94 | 6.30 | | 3.90 |
| 18/10/20004 | NNA | -12.6000 | -76.7400 | 66 | 69.56 | 4.90 | 4.80 | 5.08 | 5.50 | | 3.90 |
| 23/10/20004 | NNA/CIS | -12.6400 | -76.7900 | 58 | 73.45 | 3.75 | 3.70 | 3.79 | 5.50 | | 4.00 |
| 26/10/20004 | CIS | -12.3200 | -76.7600 | 69 | 46.48 | 4.20 | 4.10 | 4.63 | 5.60 | | 4.30 |
| 26/10/20004 | NNA | -12.3200 | -76.7600 | 69 | 38.52 | 3.40 | 3.40 | 3.89 | 5.00 | | 4.30 |
| 28/10/20004 | NNA/CIS | -12.3200 | -77.7600 | 98 | 57.45 | 4.10 | 3.70 | 4.40 | 5.20 | | 4.30 |
| 09/11/20004 | CIS | -17.7800 | -70.4700 | 41 | 78.91 | 5.00 | 4.90 | 5.07 | 6.20 | | 4.30 |
| 10/11/20004 | NNA | -12.6800 | -77.0600 | 40 | 81.61 | 4.30 | 4.20 | 4.35 | 5.30 | | 4.30 |
| 10/12/20004 | CIS | -12.3300 | -76.8200 | 72 | 98.91 | 4.40 | 4.40 | 4.51 | 5.70 | | 3.90 |
| 11/12/20004 | NNA | -12.1500 | -77.7600 | 23 | 101.90 | 3.90 | 3.90 | 3.90 | 4.90 | | 4.00 |
| 24/12/20004 | NNA | -12.4400 | -76.8500 | 50 | 51.15 | 3.80 | 3.70 | 4.01 | 5.20 | 3.7 | 4.90 |
| 24/12/20004 | CIS | -12.4400 | -76.8500 | 50 | 53.41 | 4.30 | 4.20 | 4.62 | 5.60 | 3.7 | 4.90 |
| 10/01/20005 | NNA | -12.2300 | -76.4000 | 109 | 114.19 | 4.50 | 4.50 | 4.76 | 5.50 | | 3.80 |
| 17/01/20005 | NNA | -12.1000 | -76.7800 | 54 | 14.38 | 2.40 | 2.60 | 3.44 | 4.10 | 5.4 | 5.10 |
| 16/02/20005 | CIS | -11.0200 | -76.1000 | 124 | 105.99 | 5.40 | 5.40 | 5.51 | 6.50 | | 4.10 |
| 19/02/20005 | NNA | -11.9800 | -76.9100 | 65 | 8.62 | 2.20 | 2.40 | 3.45 | 3.50 | | 5.10 |
| 02/03/20005 | NNA/CIS | -11.8600 | -76.1400 | 124 | 75.52 | 6.00 | 6.00 | 6.03 | 6.40 | | 3.80 |
| 11/03/20005 | CIS | -11.8500 | -76.4100 | 50 | 45.06 | 3.30 | 3.20 | 3.73 | 5.30 | | 4.40 |
| 11/10/20005 | CIS | -12.3300 | -76.8200 | 49 | 43.32 | 3.80 | 3.70 | 4.28 | 5.00 | 4.5 | 3.70 |
| 14/10/20005 | CIS | -12.4000 | -76.7400 | 74 | 55.57 | 4.83 | 4.70 | 5.20 | 5.90 | 4.5 | 3.70 |
| 17/02/20005 | NNA | -11.0100 | -76.1000 | 98 | 133.48 | 4.10 | 4.10 | 4.27 | 5.40 | 4.9 | 5.70 |
| 24/01/20006 | NNA | -11.8600 | -76.8200 | 96 | 126.26 | 2.70 | 2.80 | 4.05 | 3.90 | 4.1 | 3.70 |

NNA : Ñaña ML_R : Richter (1935) ML_H : Hutton (1987)
 CIS : CISMID ML_J : Jennings (1983) ML_E : Espinosa (1989)

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los Ing. Jorge Espinoza, David Portugal y Adolfo Inza por su apoyo para la disponibilidad inmediata de los datos de aceleración de la red del IGP. Al Sr. Edmundo Vila por el apoyo logístico y al Sr. Henry Salas por

su apoyo en el manejo de los datos. El apoyo del Sr. Simeon Rodriguez ha sido importante para el manejo del algoritmo elaborado para el analisis de los datos de aceleración. Nuestro agradecimiento al revisor por sus comentarios y sugerencias para mejorar el presente estudio.

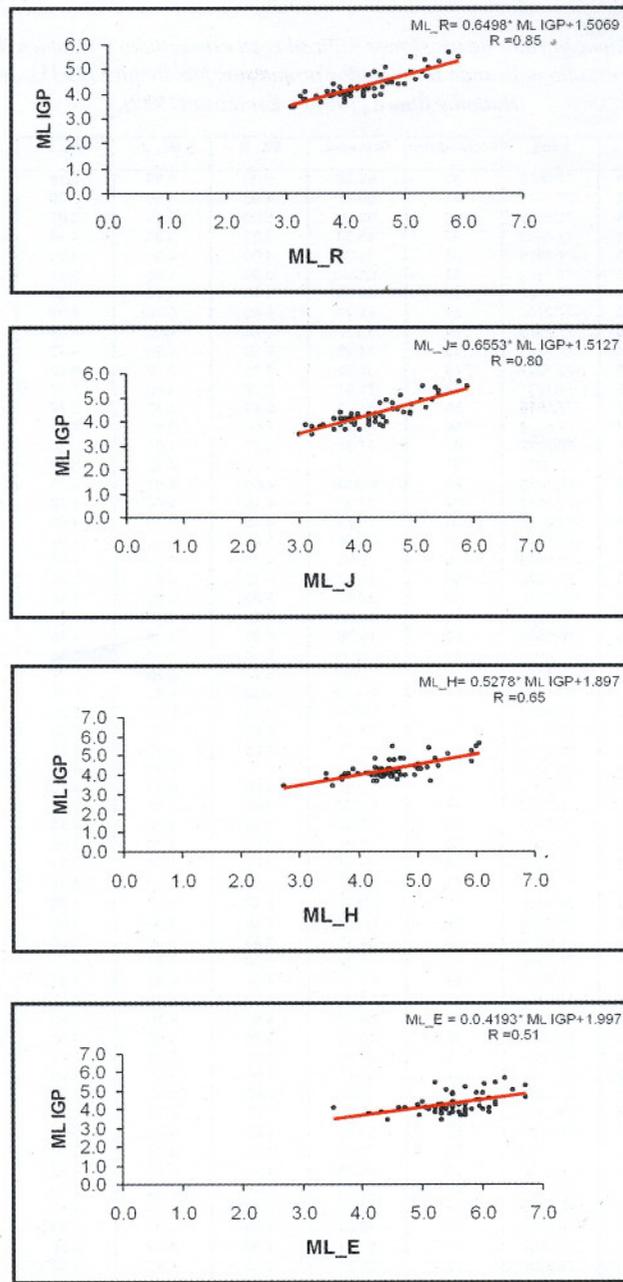


Figura 5.- Relaciones de las magnitudes ML obtenidas en este estudio con las ML(d) reportadas por el IGP para los sismos utilizados en este estudio.

REFERENCIAS

Anderson, J. A. & Wood, H. O. (1925). Description and Theory of the Torsion Seismometer. Bull. Seism. Soc. Am., Vol15, pp 1-72.

Bolt, B. (1989). Estimación de los movimientos fuertes del suelo. Física de la Tierra, N°1, pp 11-50. Edit. Univ. Com. Madrid, 1989.

Ccallo, F. & Tavera, H. (2002). La magnitud de sismos locales y regionales ocurridos en Perú a partir de la onda LG y duración de sus registros. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, V.94, 61-69.

Espinosa, A. F. (1989): Determinación de la magnitud local a partir de acelerogramas de movimientos fuertes del suelo, Física de la tierra, num. 1. 105-129 Ed. Univ. Comp. Madrid.

Hutton, L. K. & Boore, M. (1987): The ML scale in Southern California. Bull. Seism. Soc. Am., Vol1 77, pp. 2074-2094.

Jennings, P. C. & H. Kanamori (1983). Effect of distance on local magnitudes from strong-motion records. Bull. Seism. Soc. Am., Vol 73, pp 265-280.

Richter, C. (1935): An instrumental earthquake magnitude scale, Bull. Seism. Soc. Am., Voll 25, pp.1-32.