

**Zonificación Sísmica**  
**y**  
**Aceleraciones Máximas Esperadas en 100, 150, 200 y 500 años**  
**Para el Tramo de la Carretera Puno - Ilave**  
**(km 1363+000 – km 1413+000)**

Elaborado para:

Consultora de Proyectos Andinos E.I.R.L.

PhD. Hernando Tavera  
Geofísico

Octubre, 2008

## **INDICE**

### **1.- ZONIFICACION SISMICA**

#### 1.1.- INTRODUCCION

#### 1.2.- DISTRIBUCION ESPACIAL DE LOS SISMOS

##### 1.2.1.- Sismicidad Histórica

##### 1.2.2.- Sismicidad Instrumental

#### 1.3.- DEFORMACION CORTICAL

#### 1.4.- ZONIFICACION SISMICA

##### Bibliografía

### **2.- PELIGRO SISMICO**

#### 2.1.- INTRODUCCION

#### 2.2.- METODO Y DATOS

#### 2.3.- ACELERACIONES MÁXIMAS

##### Bibliografía

### **3.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 1.- ZONIFICACION SISMICA

### 1.1.- INTRODUCCION

El borde occidental de América del Sur es una de las regiones sísmicamente más activas en el mundo y su actividad más importante esta asociada al proceso de subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana. El Perú es parte de esta región y frente a su línea de costa se genera de manera frecuente sismos de diversas magnitudes a diferentes niveles de profundidad, siendo los más grandes los que han generado destrucción importante en los diversos departamentos distribuidos, de norte a sur, cercanos a la costa. Un segundo tipo de sismicidad es la producida por las deformaciones corticales, presentes sobre la Cordillera Andina y a lo largo de la zona denominada Subandina, en donde se producen sismos menores en magnitud y frecuencia. La ocurrencia continua de sismos en el Perú, como en cualquier otra región sísmicamente activa, juegan un rol importante en los diversos procesos sismotectónicos que se producen en el tiempo como la deformación de rocas, formación de fallas, fenómenos precursores de grandes sismos y la ruptura sísmica que en general, tiene duraciones del orden de 60 segundos para un sismo de magnitud Ms igual a 7.0.

La información sobre la actividad sísmica en Perú es dividida en sismicidad histórica e instrumental. La primera considera a los sismos ocurridos entre 1500 y 1959; mientras que, la segunda a los ocurridos a partir de 1960, fecha en que se inicia la instalación de la Red Sísmica Mundial (World Wide Seismological Standart Network) y la puesta en operatividad de redes sísmicas regionales en cada país.

### 1.2.- DISTRIBUCION ESPACIAL DE LOS SISMOS

#### 1.2.1. - *Sismicidad Histórica*

La información disponible sobre la sismicidad histórica de Perú viene del tiempo de la conquista y colonización del país, y se encuentra esparcida en diferentes obras inéditas, manuscritos, crónicas, narraciones, informes administrativos de

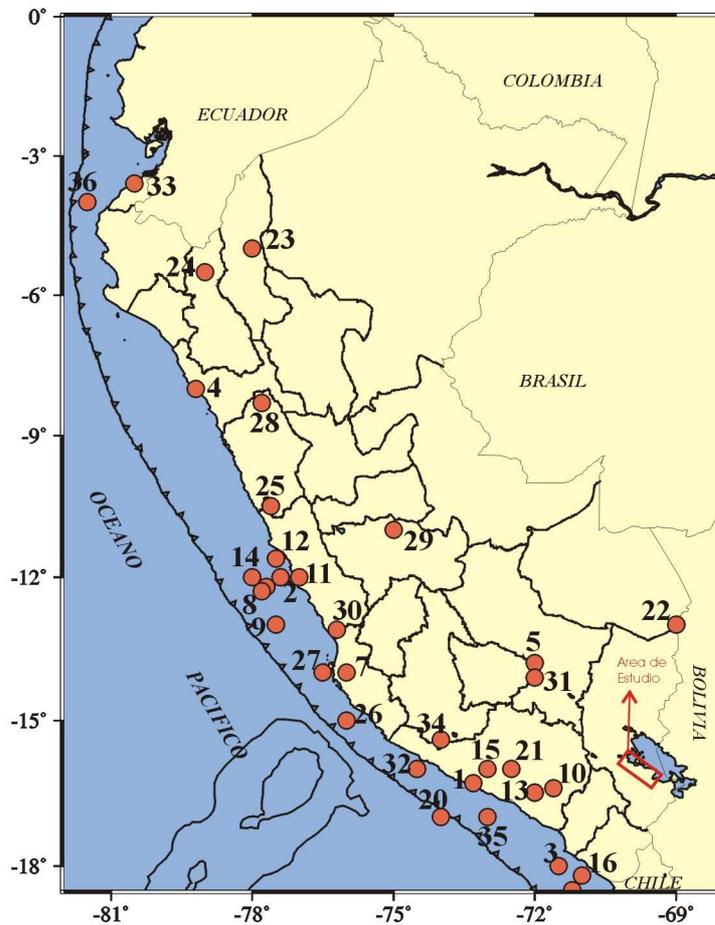
aquellos años. Gran parte de esta información ha sido recolectada y publicada por Silgado (1978) y Dorbath et al (1990). Es importante considerar que la calidad de estos datos depende de la distribución y densidad de la población en las regiones afectadas en el pasado; por lo tanto, es posible que hayan ocurrido sismos importantes en áreas no pobladas o próximas a localidades con las cuales era difícil establecer comunicación. Esto explicaría la ausencia de información sobre sismos que pudieran haber ocurrido en la Alta Cordillera y zona Subandina.

En la Figura 1 se muestra la localización epicentral de los sismos históricos ocurridos entre 1513 y 1959 ( $I_{max} > VII$  en la escala Mercalli Modificada), los mismos que en su mayoría se distribuyen principalmente entre la línea de fosa y la costa, siendo mayor el número de sismos en la región Centro y Sur de Perú debido probablemente a que estas regiones eran las mas pobladas y donde se constituyeron las ciudades más importantes después del siglo XVI. Según la figura, en el interior del continente el número de sismos disminuye considerablemente. Es necesario indicar que, al margen de los posibles errores en la localización epicentral, la profundidad focal de los sismos históricos no ha sido determinada con precisión; sin embargo, debido a los daños que ellos produjeron es posible considerar que los sismos ocurrieron a profundidades superficiales ( $h < 60$  km).

Entre los sismos más importantes ocurridos durante el periodo histórico se tiene a los de 1619 y 1953 (VIII MM) que produjeron muerte y destrucción en las ciudades de Trujillo y Tumbes. Los sismos de 1586 (IX MM), primer gran sismo para el cual se tiene documentación histórica; 1687 (VIII MM) y 1746 (X MM) destruyeron casi completamente a la ciudad de Lima. Este último generó un tsunami con olas de 15-20 metros de altura que inundo totalmente al puerto del Callao. Asimismo, los sismos de 1604 (IX MM), 1784 (X MM) y 1868 (X MM) destruyeron parcialmente a las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna, Puno y Norte de Chile. Según la información disponible, estos sismos habrían producido daños moderados en la ciudad de Puno.

En el interior del continente, la información disponible solamente permite considerar a los sismos de 1650 (VII MM), 1946 (IX MM) y 1947 (VIII MM) que produjeron muerte y destrucción en las ciudades de Cuzco, Huaraz y Satipo respectivamente. Para este periodo de tiempo (1500-1959), no existe información sobre los sismos ocurridos en la Alta Cordillera y menos para el departamento de

N°	Fecha (a/m/d)	Lat. (°)	Long. (°)	Mag (Ms)	Energía (ergios)	N°	Fecha (a/m/d)	Lat. (°)	Long. (°)	Mag (Ms)	Energía (ergios)
1	1582/01/22	-16.3	-73.3	7.9	4.5E+23	19	1913/07/28	-17.0	-73.0	7.0	2.0E+22
2	1586/07/09	-12.2	-77.7	8.1	8.9E+23	20	1913/08/06	-17.0	-74.0	7.7	2.2E+23
3	1604/11/24	-18.0	-71.5	8.4	2.5E+24	21	1922/10/11	-16.0	-72.5	7.4	7.9E+22
4	1619/02/14	-08.0	-79.2	7.8	3.2E+23	22	1928/04/09	-13.0	-69.0	6.4	2.5E+21
5	1650/05/31	-13.8	-72.0	7.2	4.0E+22	23	1928/05/14	-05.0	-78.0	7.3	5.6E+22
6	1655/11/13	-12.0	-77.4	7.4	7.9E+22	24	1928/07/18	-05.5	-79.0	7.0	2.0E+22
7	1664/05/12	-14.0	-76.0	7.8	3.2E+23	25	1940/05/24	-10.5	-77.6	8.2	1.3E+24
8	1678/06/16	-12.3	-77.8	7.0	2.0E+22	26	1942/08/24	-15.0	-76.0	8.4	2.5E+24
9	1687/09/20	-13.0	-77.5	8.2	1.3E+24	27	1946/09/30	-14.0	-76.5	7.0	2.0E+22
10	1687/10/21	-16.4	-71.6	7.0	2.0E+22	28	1946/11/10	-08.3	-77.8	7.2	4.0E+22
11	1725/01/22	-12.0	-77.0	7.0	2.0E+22	29	1947/11/01	-11.0	-75.0	7.5	1.1E+23
12	1746/09/28	-11.6	-77.5	8.4	2.5E+24	30	1948/05/28	-13.1	-76.2	6.7	7.1E+21
13	1784/05/13	-16.5	-72.0	8.0	6.3E+23	31	1950/05/21	-14.1	-72.0	6.0	6.3E+20
14	1806/12/07	-12.0	-78.0	7.5	1.1E+23	32	1951/03/04	-16.0	-74.5	6.7	7.1E+21
15	1821/07/10	-16.0	-73.0	7.9	4.5E+23	33	1953/12/12	-03.6	-80.5	7.7	2.2E+23
16	1833/09/18	-18.2	-71.0	7.0	2.0E+22	34	1955/07/21	-15.4	-74.0	6.7	7.1E+21
17	1868/08/13	-18.5	-71.2	8.6	5.0E+24	35	1958/01/15	-16.5	-72.0	7.3	5.6E+22
18	1877/05/09	-19.5	-71.0	7.5	1.1E+23	36	1959/02/07	-04.0	-81.5	7.2	4.0E+22



**Figura 1.-** Distribución epicentral de la actividad sísmica histórica de Perú para el periodo 1513-1959 según Silgado (1978). Todos los sismos habrían presentados intensidades iguales o mayores a VIII (MM). Los números deben ser correlacionados con la tabla en la cual se indica fecha, magnitud y energía sísmica liberada. El recuadro indica la ubicación del área de estudio.

Puno, pero es posible que el sismo de 1650 haya sido sentido con intensidades del orden de V (MM) en llave con daños menores.

En el interior del continente, la información disponible solamente permite considerar a los sismos de 1650 (VII MM), 1946 (IX MM) y 1947 (VIII MM) que produjeron muerte y destrucción en las ciudades de Cuzco, Huaraz y Satipo respectivamente. Para este periodo de tiempo (1500-1959), no existe información sobre los sismos ocurridos en la Alta Cordillera y menos para el departamento de Puno, pero es posible que el sismo de 1650 haya sido sentido con intensidades del orden de V (MM) en llave con daños menores.

En la Figura 1 se indica el área de estudio y en ella los sismos históricos que también habrían producido daños en el departamento de Puno y cuyo detalle se presenta a continuación (Silgado, 1978):

- 1650** *Mayo 31 a 14h, se produjo un terremoto de magnitud 7.2 que derribo todos los templos del Cusco y Andahuaylas. Existen daños en toda la meseta del Collao hasta Sicasica (Bolivia). Se observaron grandes desplazamientos de tierra en Pisac y Paucartambo. Intensidad máxima en el Cusco de VIII (MM) y del orden de V en Puno (evento 5, Figura 1)*
- 1928** *Abril 9 a 12h 30 min (hora Local). Terremoto de magnitud 6.9 produce en Carabaya-Puno (al NE de la ciudad de Puno, límite con Madre de Dios) gran destrucción de viviendas/iglesias y las viviendas que no fueron destruidas quedaron inhabitables. Las localidades de Ituata y Macusani con severos daños. En el pueblo de Olachea, varios testigos oyeron derrumbes subterráneos y sacudimientos de tierra. Del nevado Allinocapae se desprendieron grandes bloques de hielo. Aproximadamente 50 km de longitud fueron afectados, desde el río Esquilaya hasta Inambari con anchos de 1-4 km (evento 22, Figura 1).*

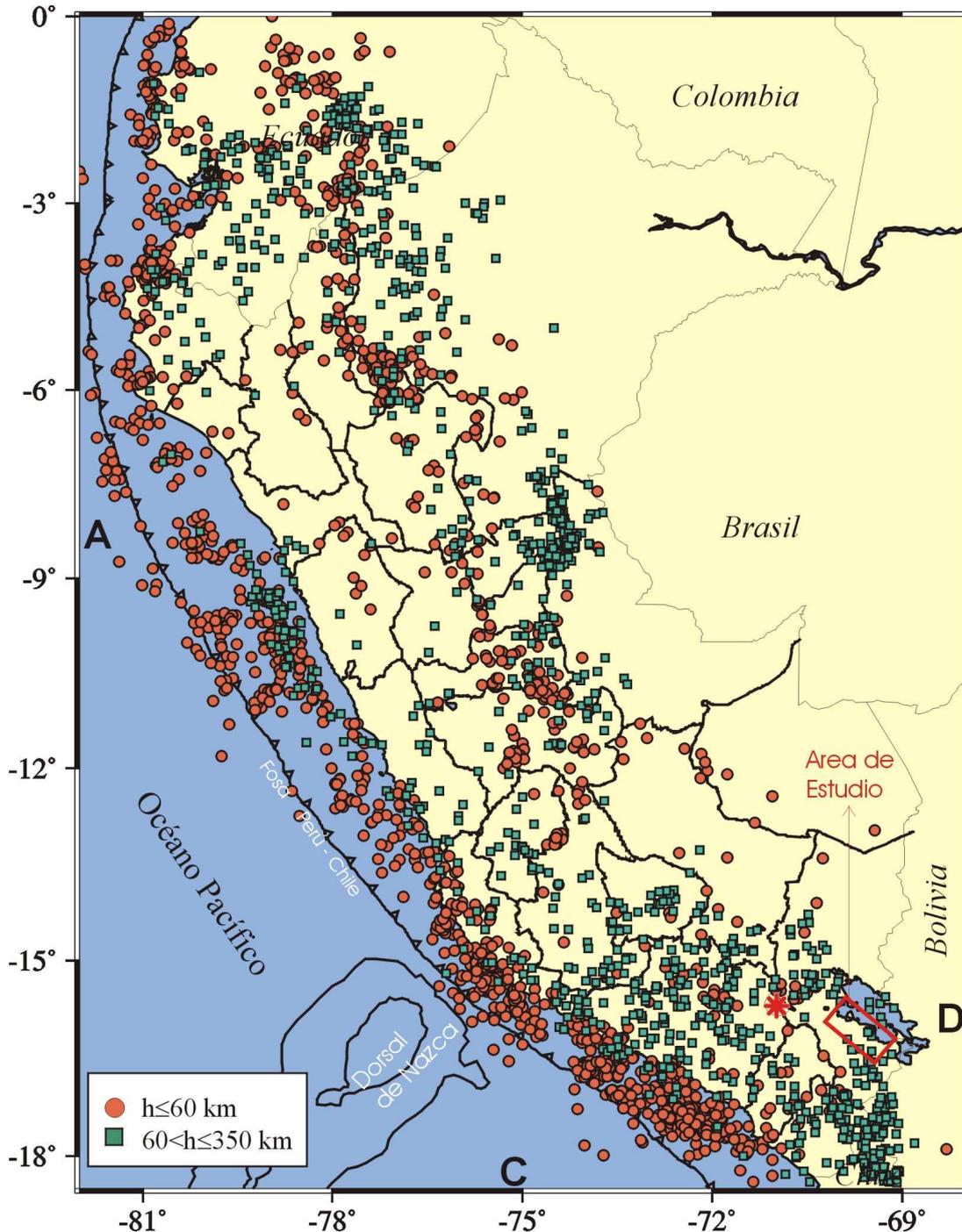
#### 1.2.2.- **Sismicidad Instrumental**

El análisis y evaluación de la distribución espacial de los sismos ocurridos en Perú durante el periodo instrumental, ha sido realizado por diversos autores utilizando información telesísmica (Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 2001 y Bernal, 2002) y

regional (Hasegawa y Sacks, 1981; Grange, 1984; Schneider y Sacks, 1987; Rodríguez y Tavera, 1991) y los resultados obtenidos han permitido conocer las características de la geometría de las principales fuentes sismogénicas asociadas a la deformación cortical y al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana.

La Figura 2 muestra que los sismos con foco superficial, representados con círculos, se producen en la zona oceánica y se distribuyen, de norte a sur, en dirección paralela a la línea de costa. En esta zona la ocurrencia de sismos es continua y con relativa frecuencia se producen sismos de magnitud elevada como los ocurridos en el año 2001 ( $M_s=8.0$ ) que afectaron a los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna con intensidades de VII-VIII (MM) y año 2007 ( $M_S=8.0$ ) que produjo daños-destrucción en el departamento de Ica, siendo ambos los más grandes ocurridos en los últimos 100 años en el Perú. El sismo del 2001 fue sentido en las ciudades de Ilave y Puno con intensidades de III-IV (MM) sin producir daño alguno. Un segundo grupo de sismicidad con foco superficial se localiza en el interior del continente y debe su origen al proceso de subsidencia del escudo brasilero bajo la Cordillera Andina y a la deformación cortical que se produce en la Alta Cordillera, siendo estos sismos menor en magnitud y frecuencia.

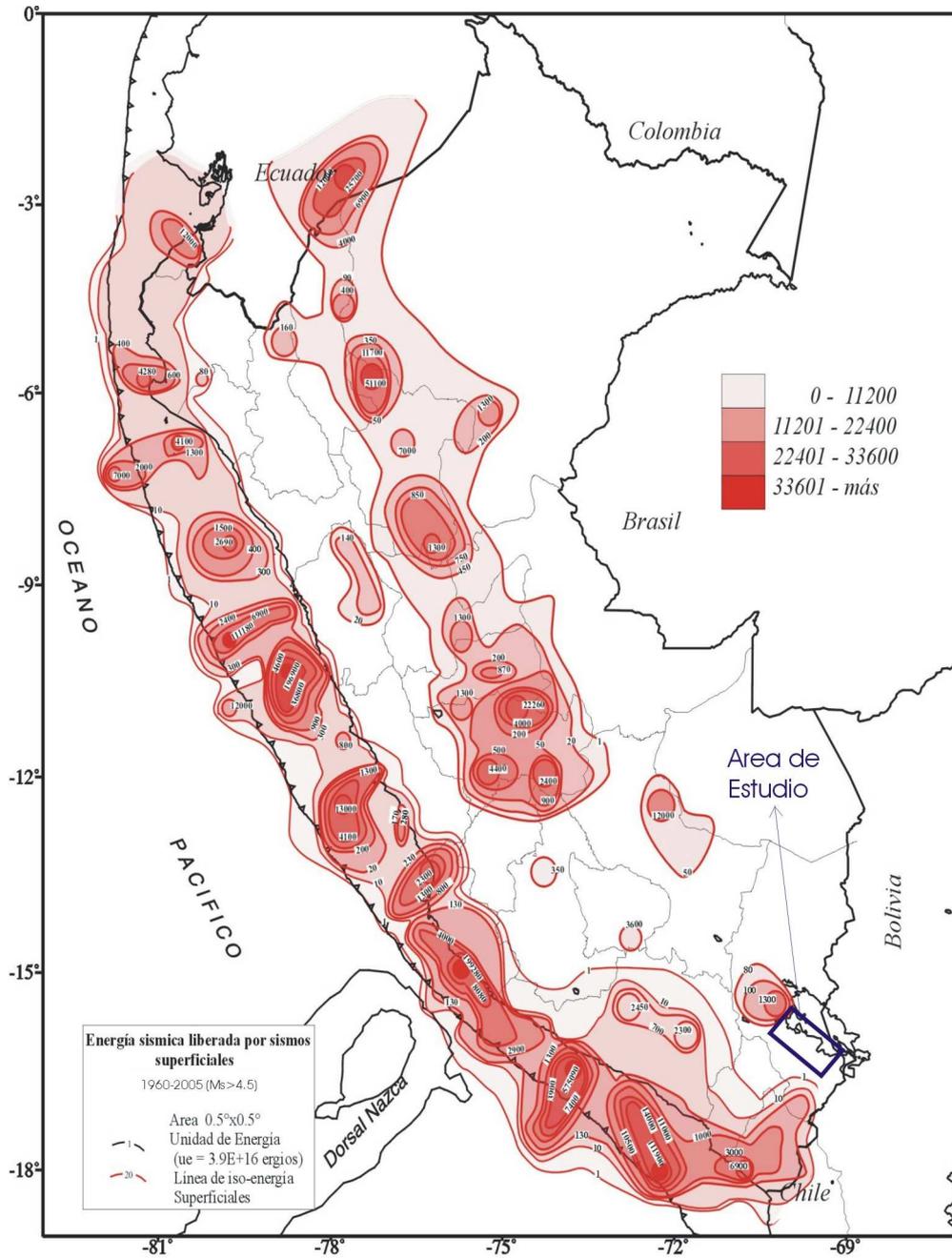
La sismicidad en el borde oriental de la Cordillera Andina es mayoritaria en las regiones norte y centro de Perú; mientras que, en la región sur el número de sismos es menor debido posiblemente a que la cordillera presenta mayor raíz (75 km) y espesor (200 km), imposibilitando el desarrollo de rápidas deformaciones y la ocurrencia frecuente de sismos. En la zona andina de la región sur, la ocurrencia de sismos es mínima, aunque en la frontera de Puno con Arequipa, se nota la presencia de un alineamiento de sismos debido probablemente a una pequeña falla presente cerca de la localidad de Santa Lucia y que fuera reactivada con el sismo de Arequipa del 2001 con un sismo de magnitud  $M_L=5.0$  (29 de Junio 2001; 22h 33 min HL) que causó alarma en las localidades de Santa Lucia y Lampa porque produjeron deslizamientos de tierra y piedras, además de emanaciones de agua. La intensidad evaluada en la ciudad de Puno e Ilave fue de IV (MM), en Juliaca y Ayaviri de III (MM).



**Figura 2.-** Distribución espacial de la actividad sísmica en el Perú para el periodo 1960 a 2007 ( $m_b > 4.5$ ). Los símbolo indican los rangos de profundidad de los sismos. El recuadro indica la ubicación del área de estudio. La estrella indica la ubicación del sismo ocurrido el 29/06/2001 (5.0ML) y que afectó a las ciudades de Puno e Ilave con intensidades de IV (MM).

Del mismo modo, en la Figura 2 se observa que los sismos con foco intermedio, representados por cuadrados, se distribuyen en superficie de manera irregular; sin embargo, es posible distinguir tres grupos. El primero paralelo a la línea de costa por debajo de los 9° Sur, el segundo en la región Norte y Centro con sismos que se distribuyen a lo largo de Cordillera Oriental y la Zona Subandina siguiendo un alineamiento N-S. El tercero y más importante, debido al gran número de sismos, se encuentra en toda la región Sur, teniendo su posible relación con la presencia de la cadena volcánica. Por debajo del departamento de Puno, el número de sismos es alto y siguen, desde el lago Titicaca, una orientación NO-SE; sin embargo, ninguno de ellos produjo daños en superficie.

En general, la distribución de sismos en todo el territorio peruano permite identificar la presencia de diversas fuentes sismogénicas y de estas, las más importantes son las que producen los sismos de elevada magnitud a niveles superficiales: proceso de subducción y deformación cortical. El potencial de estas fuentes sismogénicas puede ser cuantificado con la cantidad de energía liberada por los sismos ocurridos en dichas fuentes. Así, en la Figura 3 se puede observar que la principal fuente configura un área paralela a línea de costa en donde se observa la presencia de acumulación de valores altos de energía producto de la ocurrencia de grandes sismos debidos al proceso de contacto de placas (placa de Nazca y Sudamérica) y que fue descrito anteriormente. Una segunda fuente sismogénica con valores altos de energía liberada se ubica en el interior del continente y se distribuye paralela a la Cordillera Andina y tiene su origen en los sismos que ocurren debido a la deformación cortical puesta en evidencia con la presencia de importantes sistemas de fallas geológicas. Obsérvese que en los alrededores de la ciudad de Puno existe una pequeña concentración de valores de energía que indican la ocurrencia de sismos con magnitudes menores a 5.0Ms.



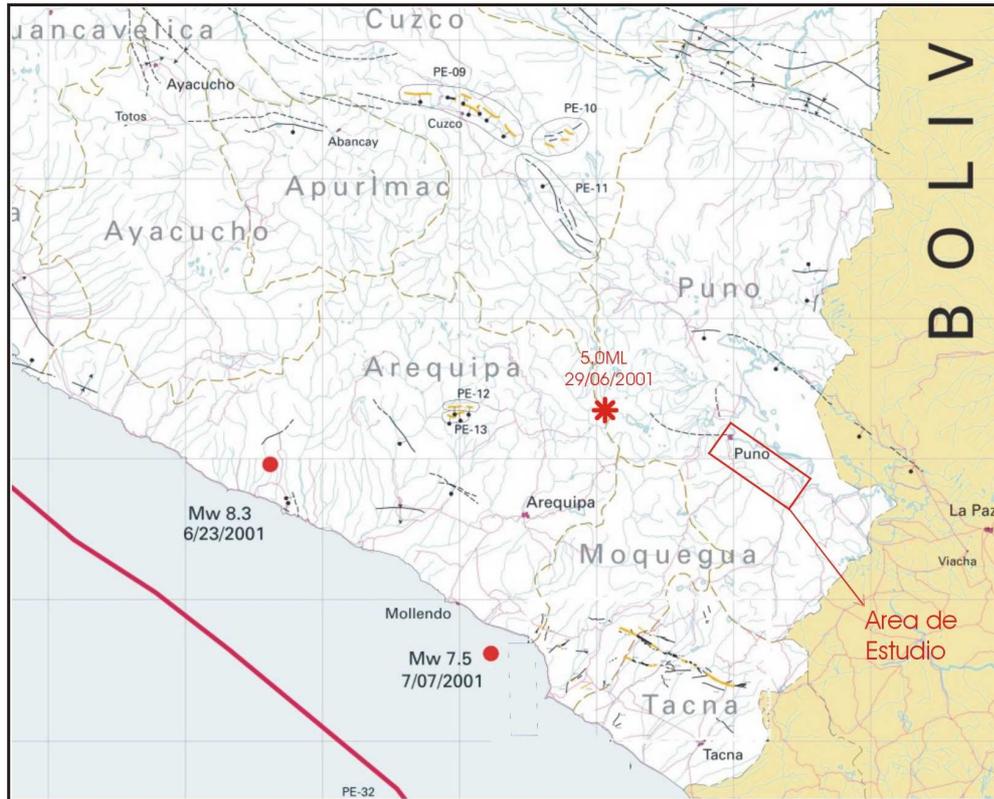
**Figura 3.-** Mapa de energía sísmica liberada en el Perú por sismos con foco superficial ocurridos entre 1960 y 2005. Los valores de energía están expresados en unidades de energía (ue) equivalente a la liberada por un sismo de magnitud 4.0Ms. El recuadro indica el área de estudio.

### 2.3.- DEFORMACION CONTINENTAL

La ocurrencia de sismos de diversa magnitud en el interior del continente, pone de manifiesto el importante nivel de deformación superficial que en él se produce. En general, esta sismicidad se concentra sobre las trazas de fallas que frecuentemente liberan mayor cantidad de energía y que en su momento produjeron sismos de magnitud elevada. Esta sismicidad, debido a que se produce próxima a la superficie, genera un alto grado de destrucción en las ciudades y localidades circundantes. Son importantes los sismos que se produjeron en 1946 con origen en la falla de Quiches (Ancash), 1969 en la falla de Huaytapallana (Huancayo) y 1986 en falla de Tambomachay (Cusco), todos sobre la Cordillera Andina. En la zona Subandina, sobresalen los sismos de 1947 con origen en la de Satipo (Junín) y los de 1990 y 1991 que reactivaron al sistema de fallas de Moyobamba y Rioja (San Martín). En la zona sur de Perú, solo han sido identificados los sistemas de fallas de Incapuquio (Tacna y Moquegua), Cotahuasi-Colca (Arequipa) y Tambomachay (Cusco); mientras que, en el departamento de Puno solo se ha logrado identificar lineamientos de posibles fallas, ubicadas en el extremo norte de la ciudad de Puno (trazos de interlineado, Figura 4).

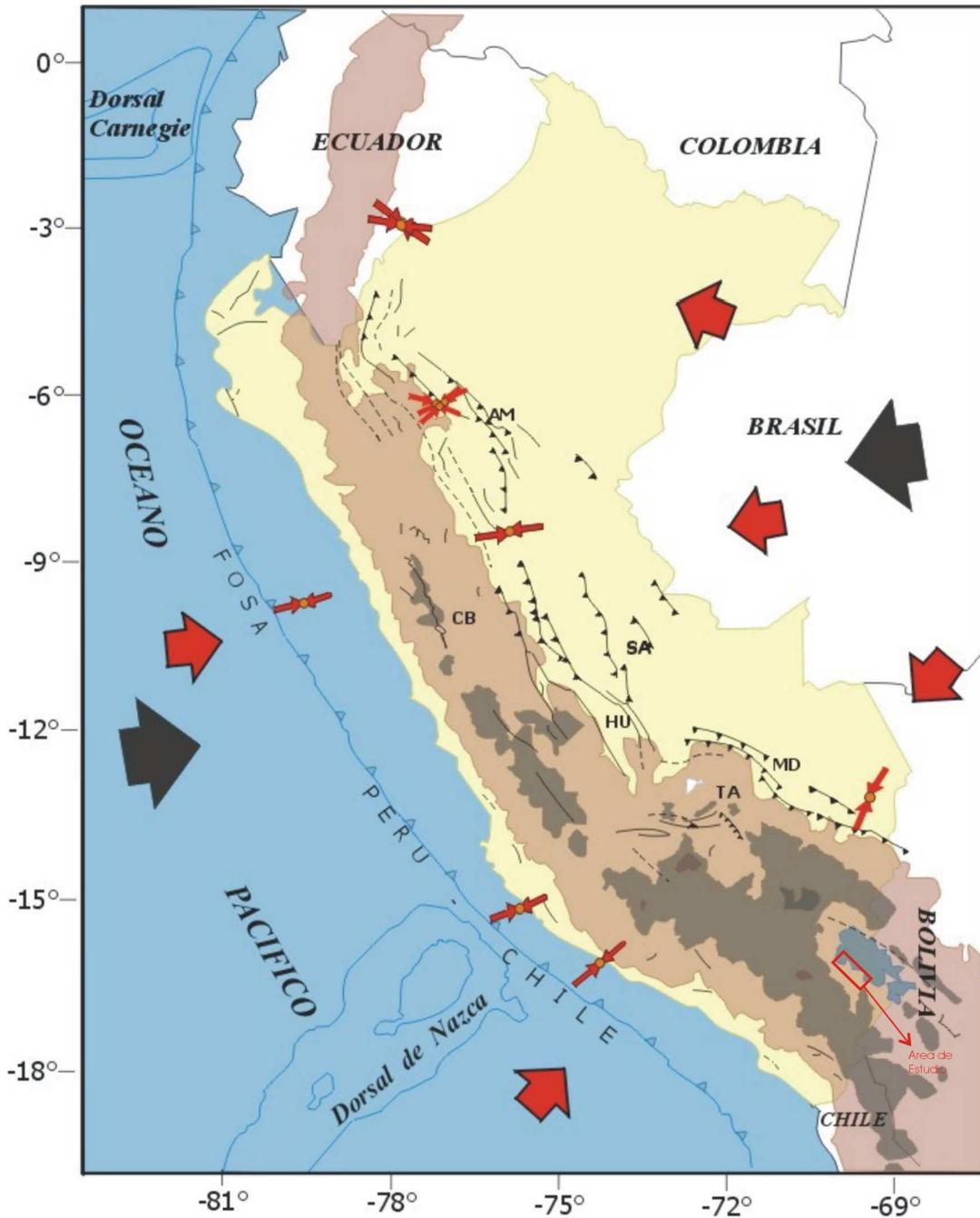
Después de ocurrido el terremoto de Arequipa del 2001, cerca de la localidad de Santa Lucia (Puno), ocurrió un sismo de magnitud 5.0ML (29 de Junio 2001; 22h 33 min HL) que produjo deslizamientos de tierra, piedras y además de emanaciones de agua en las localidades de Santa Lucia y Lampa. En las ciudades de Puno e Ilave se evaluaron intensidades de IV (MM), ver Figura 4.

En el caso de la deformación cortical, la información sísmica disponible permite considerar que los periodos de recurrencia de los sismos de magnitud elevada en el interior del continente, aparentemente son muy grandes, ya que para los últimos 500 años no se cuenta con información confiable que permita confirmar la ocurrencia de sismos. Esto sugiere que la deformación continental es lenta y poco uniforme. Los pocos sismos para los cuales se cuenta con información han permitido observar en superficie rasgos tectónicos que indican el tipo de deformación producida (fallas geológicas). En general, las zonas de mayor deformación superficial han sido identificadas y descritas por diversos autores desde el punto de vista sismológico y tectónico. Recientemente, Tavera y Buforn (2001) han estudiado la distribución de los esfuerzos que causan la deformación en el interior del continente a partir de la elaboración de mecanismos focales para sismos con magnitudes  $M_s$  mayores a 5.8.



**Figura 4.-** Principales sistemas de fallas del Cuaternario presentes en la región sur de Perú. El recuadro en rojo indica la ubicación del área de estudio (tramo Puno-Ilave) y los puntos en rojo, los epicentros de los sismos más grandes ocurridos en los últimos 100 años. Las trazas en interlineado indican la ubicación y dimensiones de las fallas presentes en la región de estudio (Machare et al, 2003). Observese que en el extremo NO de la ciudad de Puno existe un lineamiento que probablemente dio origen al sismo del 29/06/2001 con una magnitud de 5.0ML. Del mismo modo, al norte del departamento de Puno, los importantes lineamientos identificados podrían haber dado origen al sismo de Carabaya de 1928.

Los resultados indican que la deformación es mayor en la zona Subandina de la región norte en comparación con otras regiones y con la Alta Cordillera. La orientación de los esfuerzos causantes de la deformación superficial es perpendicular a la dirección que sigue la Cordillera Andina, tal como se observa en la Figura 5. En la región sur, la ausencia de sismos de magnitud elevada sustenta el desarrollo de un lento proceso de deformación que conlleva a la ocurrencia de sismos con periodos de retorno de muchas décadas.



**Figura 5.-** Esquema sismotectónico en superficie para el Perú obtenido a partir de la distribución de los esfuerzos regionales por Tavera y Buforn (2001). Las flechas pequeñas de color rojo corresponden a los esfuerzos locales, las grandes a esfuerzos regionales y las negras a la dirección de convergencia de placas. El recuadro indica la ubicación del área de estudio.

#### 1.4.- ZONIFICACION SISMICA

El mapa de zonificación sísmica, base primaria para que el Gobierno del Perú en el año 1997 elabore la Norma Sismorresistente NTE-030-97, se presenta en la Figura 6. En la elaboración de este mapa se ha considerado las condiciones regionales de sismicidad que engloban a todos los parámetros sísmicos significativos como son la ubicación de los focos sísmicos, trayectoria de recorrido de las ondas, distancia epicentral y energía liberada, todos contenidos y definidos en términos de la aceleración del suelo producido por los sismos y que son medidos sobre roca o terreno firme; a lo que se agregan las amplificaciones que sufren las ondas sísmicas por las condiciones locales.

Según el mapa de zonificación sísmica (Figura 6), la ZONA1 representa aquellas áreas en donde el potencial sísmico es bajo y no se espera la ocurrencia de sismos capaces de producir altos valores de aceleración. La ZONA 2, considera aquellas áreas en donde el potencial sísmico es intermedio y en general se producen sismos de magnitud moderada ( $M < 6.0$ ) que generan aceleraciones del orden de  $200 \text{ cm/seg}^2$ . Finalmente, la ZONA 3 representa aquellas áreas en donde el potencial sísmico es alto debido a que es afectada por la ocurrencia de sismos de magnitud elevada ( $M > 7.0$ , ver Figura 3) que producen aceleraciones mayores a  $300 \text{ cm/seg}^2$ .

En función de las características sismotectónicas y curvas de isoenergía descritas en los ítems anteriores, el área de estudio, "Tramo de la Carretera Puno-Ilave", se encuentra en la ZONA 2 (Figura 6). Estos parámetros deben ser considerados como indicadores importantes al momento de proyectar el desarrollo de obras de ingeniería.



**Figura 6.-** Mapa de zonificación sísmica para el Perú. El recuadro indica la ubicación del área de estudio: Tramo de la Carretera Puno-Ilave.

## Bibliografía

- Bernal, I. y Tavera, H. (2002). *Geodinámica, sismicidad y energía sísmica en Perú*, Monografía, CNDG-Sismología, Instituto Geofísico del Perú, 63 pags.
- Cahill, T. y Isacks, B. (1992). *Seismicity and shape of the subductec Nazca Plate*. *J. Geophys. Res.*, 97, 17503-17529.
- Deverchere, J., Dorbath, L. y Dorbath, C. (1989). *Extension related to a high topography: results from a microearthquake survey of the Andes of Peru and tectonics implications*. *Geophys. J. Int.*, 98, 281-292.
- Dorbath, L. y Cisternas, A. (1990). *Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru*. *Bull. Seism. Soc. Am.* 80, 551-576.
- Dorbath, L., Dorbath, C. y Cisternas, A. (1991). *Seismicity and tectonic deformation in the Eastern Cordillera and the sub-andean zone of central Perú*. *Jour. South. Amer. Sci.*, V4, 13-24.
- Grange, (1984). *Etude sismotectonique detaille de la subduction lithospherique au sud Perou*. Tesis Doctoral, IRIGM, Grenoble, Francia.
- Hasegawa, A. y Sacks, S. (1981). *Subduction of the Nazca plate beneath Peru as determined from seismic observations*. *J. Geophys. Res.* 86, 4971 – 4980.
- Rodriguez, L. y Tavera, H. (1991). *Determinación con alta resolución de la geometría de la zona de Wadatti-Benioff en el Perú Central*. *Revista Brasileira de Geofísica*, 9, 141-159.
- Schenider, J. y Sacks, S. (1987). *Stress in the contorted Nazca plate beneath southern Peru from local earthquakes*. *J. Geophys. Res.*, 92, 13887-13902.
- Sebrier, M., Mercier, J., Megard, F. y Laubacher, G. (1985). *Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of Peru*. *Tectonics*, 4, 739 – 780.
- Silgado, E. (1978). *Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú, 1513-1974*. Instituto Geológico Minero del Perú, Lima, Perú 131p.
- Tavera, H., y Bernal, I. (2001). *Evaluación de la vulnerabilidad de la presa de Antacoto y zona de Marcapomacocha a partir del monitoreo de la actividad sísmica local*. *Informe Final, IGP-Sedapal*, 110p.
- Tavera, H., y Buforn, E. (2001) *Source mechanics of earthquakes in Peru*. *Journal of Seismology*, 5,4, 519-540.

## **2.- ACELERACIONES MAXIMAS ESPERADAS**

### **2.1.- INTRODUCCION**

El peligro sísmico, que en un futuro se espera en un lugar puede ser determinado utilizando métodos determinísticos y probabilísticos. El primer método estima el tamaño del sismo mayor que pueda producirse en un área en función de su distancia a la fuente sismogénica. En el segundo se hace uso del procedimiento desarrollado por Cornell (1968), para estimar en términos de probabilidad, la severidad sísmica con la cual podría ser sacudida una determinada área en el tiempo y puede ser expresada en valores de diversos parámetros de diseño como aceleraciones, velocidad o desplazamiento. En estas condiciones, para el diseño apropiado de una obra de ingeniería, considerando todos los factores de seguridad, es necesario conocer el ambiente natural del área.

En este informe se presenta los valores de aceleración máxima estimados para periodos de 100, 150, 200 y 400 años para el punto medio del tramo de carretera ubicada entre las ciudades de Puno e Ilave, como parte del proyecto “Estudios para el Mantenimiento Periódico de la Carretera Puno-Ilave” a cargo de Consultora de Proyectos Andinos E.I.R.L.

### **2.2.- METODO Y DATOS**

La severidad sísmica con la cual podría ser, en términos de probabilidad, sacudida una determinada área fue descrita por Cornell (1968), Cornell y Vanmarcke (1969) y aplicada en Perú por diversos autores. Siguiendo la metodología descrita por estos autores, en este estudio se ha calculado la aceleración máxima esperada para el punto de interés utilizando el algoritmo SEISRISK (Bender y Perkins, 1987). Este algoritmo retiene el concepto de fuentes sísmicas y asume que los terremotos que ocurren en una fuente obedecen a una distribución uniforme y por lo tanto, los niveles de aceleración calculados varían suavemente en puntos cercanos a los límites de la fuente.

Asimismo, el algoritmo realiza un ajuste parcial de la magnitud que caracteriza a las fracturas a distancias cercanas como si ocurrieran sobre un mismo rango de magnitud. Esto significa que para fracturas grandes asociadas a terremotos de magnitud elevada, a lo largo de la falla, las fracturas pueden ocurrir a la misma distancia del sitio de interés y el mismo nivel de aceleración sería calculado para todas estas fracturas (Huaco y Rodriguez, 1983).

El procedimiento seguido a fin de estimar los valores de aceleración máxima, ha sido mejorado por Schmid y Schaad (1995), dejando de lado el concepto de zonas sismogénicas, zonas sísmicas o fallas activas para asumir una malla sobre el área de interés en donde cada punto se comportará como una fuente de un terremoto potencial. Este nuevo procedimiento permite interpretar de manera precisa y obtener una representación transparente del peligro sísmico

La base de datos utilizada considera únicamente la sismicidad ocurrida en Perú a partir del año 1963 a la fecha, en razón que se asume que el catálogo sísmico es completo al contar con información de la Red Sísmica Mundial (World Wide Seismic Station Network, WWSSN). El catálogo sísmico utilizado contiene información de la base de datos del National Earthquake Information Center (NEIC), del Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS) y del Instituto Geofísico del Perú, todos disponibles en Internet. La calidad de la información utilizada incrementa la confiabilidad en los parámetros focales de cada sismo que integran la base de datos considerada en el presente estudio. Asimismo, se considera las fuentes sísmicas definidas por Castillo y Alva (1993), recientemente analizadas y evaluadas por Alva (2005) utilizando diversas ecuaciones de atenuación y algoritmos para el cálculo del peligro sísmico.

### **2.3.- ACELERACIONES MAXIMAS**

La aceleración del suelo y su intensidad en un punto cualquiera, es función del tamaño del terremoto (magnitud o energía liberada), la distancia epicentral y del tipo de material o estructuras en las cuales las ondas sísmicas se propagan. Este último factor es caracterizado por los coeficientes de la ecuación de atenuación, siendo esta utilizada para estimar los valores de aceleración máxima en cualquier punto del área de interés. En el presente estudio se utiliza la ecuación de atenuación de la aceleración definida para el Perú por Casaverde y Vargas (1980), y que fuera obtenida

a partir de registros de aceleración (componentes horizontales) de 10 sismos ocurridos en la zona de subducción de la región central y registrados en estaciones que estuvieron instaladas en Lima y alrededores (Alva 2005).

En la Tabla 1 se presenta los valores de aceleración máxima esperada en **gals (cm/seg<sup>2</sup>)** para 100, 150, 200 y 500 años en el punto medio de la carretera Puno-Ilave con un 10% de excedencia.

**Tabla 1**

<b>Aceleraciones Máximas Esperadas</b>			
<b>Punto medio Carretera Puno-Ilave</b>			
<b>100 Años</b>	<b>150 años</b>	<b>200 Años</b>	<b>500 Años</b>
102.3	117.3	123.1	157.4

En general, en los diseños de ingeniería es necesario considerar que una estructura esta sujeta a una aceleración efectiva la cual puede ser menor hasta en un 35-40% de la aceleración máxima. Por ejemplo, Huaco (1981) considera que la aceleración efectiva en un rango útil viene dada por la siguiente relación:

$$ac= 0.63 a_{max}$$

donde, **a<sub>max</sub>** es la aceleración estimada en los estudios de peligro sísmico como en este caso. Sin embargo, esta reducción de la aceleración máxima es solo referencial ya que los valores reales de diseño deben ser decididos después del análisis detallado sobre las condiciones del suelo y características físicas de la obra

Los valores de aceleración estimados en este estudio para el punto de interés son coherentes con el bajo nivel de sismicidad presente en el área de estudio (ver Zonificación Sísmica). Para periodos de retorno menores a la centena de años, los valores de aceleración son menores a 100 cm/seg<sup>2</sup>; por lo tanto, mínimos en términos de cuantificar posibles niveles de daño.

## Bibliografía

- Alva, J. (2005). *Actualización de los parámetros sísmológicos en la evaluación del Peligro Sísmico en el Perú*, Ingeniería Civil N°03, 6 Págs.
- Bender, B. y Perkins, D. (1987). *SeisRisk III, A computer program for seismic hazard estimation*. US Geological Survey Bulletin, 1772.
- Casaverde, L. y Vargas, J. (1980). *Zonificación Sísmica del Perú. II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente*, OEA-PUCP, Lima-Perú.
- Castillo, J. y Alva, J. (1993). *Peligro Sísmico en el Perú.*, VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones., Lima.
- Cornell, A. (1968). *Engineering Risk Analysis*. BSSA, 58, 1583-1606.
- Cornell, A. y Vanmarcke, F. (1969). *The major influences on seismic risk*. 4<sup>th</sup> World Conf. Earthquake Engineering, Santiago, Chile.
- Huaco, D. (1981). *Peligro sísmico para la zona del Proyecto Olmos*. Instituto Geofísico del Perú, Reporte Interno, 45 p.
- Huaco, D. y Rodríguez, L. (1983). *Atenuación de la intensidad y la aceleración en el Perú*. Instituto Geofísico del Perú, 46 p.
- Schmid, E. y Schaad, W. (1995). *A database for Worldwide Seismicity Quantification*. Natural Hazard, 12, 153-160.

### 3.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos en este estudio se desprende las siguientes conclusiones:

.- En el área de estudio la frecuencia de sismos es baja, principalmente para aquellos que presentarían magnitudes igual o mayores a 4.5 ML (magnitud Richter); sin embargo, la presencia en los alrededores de algunas trazas de fallas, sugieren el desarrollo en el pasado de diversos procesos de deformación que al presente no producen sismos de manera frecuente, en este caso la deformación sería muy lenta y de ocurrir sismos lo harían con periodos de retorno de varias décadas. El único sismo de gran magnitud indicado en la data histórica habría ocurrido el 9 de Abril de 1928 con epicentro en la proximidad de la localidad de Carabaya, produciendo deslizamientos importantes de tierra y caída de bloques de hielo.

.- En el Mapa de Zonificación Sísmica, el área de estudio se encuentra en la Zona-2, lo cual advierte que su potencial sísmico es intermedio con sismos de magnitud moderada que podrían generar aceleraciones del orden de  $200 \text{ cm/seg}^2$ . Se debe considerar que dicha zona al estar cerca de la línea de costa, puede ser afectada por sismos con origen en la convergencia de placas, tal como ocurrió en el año 2001 con el terremoto de Atico y que produjo en Ilave y Puno intensidades del orden de IV (MM). Sismos de tipo cortical como el que se produjo el 29 de Junio del 2001 con epicentro en la localidad de Santa Lucia (130 km en dirección NNO), también pueden generar daños importantes y efectos secundarios como deslizamientos de tierra y piedras.

.- Las aceleraciones estimadas con métodos probabilísticos para diversos periodos de tiempo proporcionan valores coherentes con la historia sísmica del área de estudio.

De acuerdo a las características sísmicas y tectónicas del área de estudio, es necesario considerar para el futuro la posible ocurrencia de sismos con magnitudes del orden de 6.0 Ms (Mw) que podrían generar aceleraciones en el terreno del orden de  $200\text{-}250 \text{ cm/seg}^2$ , suficiente como para producir deslizamientos de tierra y piedras en

zonas en donde existan superficies con pendientes igual o mayores a 45°; por lo tanto, recomienda considerar las previsiones del caso a efectos de evitar daños en el Tramo de la Carretera Ilave-Puno.