PELIGRO SÍSMICO EN EL PERÚ

Jorge L. Castillo Aedo [1]
Jorge E. Alva Hurtado [2]

INTRODUCCIÓN

El Perú está comprendido entre una de las regiones de más alta actividad sísmica que existe en la tierra, por lo tanto está expuesto a este peligro, que trae consigo la pérdida de vidas humanas y pérdidas materiales. Es necesario efectuar estudios que permitan conocer el comportamiento más probable de este fenómeno para poder planificar y mitigar los grandes efectos que trae consigo. Una forma de conocer el probable comportamiento sísmico de un lugar es mediante la evaluación del peligro sísmico en términos probabilísticos, es decir predecir las posibles aceleraciones que podrían ocurrir en un lugar determinado.

En las normas de diseño se especifican las cargas sísmicas, por lo que no es necesario realizar investigaciones detalladas de la actividad sísmica del área donde se construirán estructuras comunes. El coeficiente de diseño sísmico a ser usado en el diseño sísmico pseudo-estático se determina en base a la zona, condición del suelo e importancia de la estructura. Si la estructura es flexible, la carga sísmica se modifica tomando en cuenta su periodo fundamental. Sin embargo, cuando se planifican estructuras importantes, deben evaluarse sus capacidades de resistir terremotos en base a estudios detallados de peligro sísmico. Tales estructuras incluyen: grandes presas, puentes con luces grandes, túneles y centrales nucleares. También se necesitan estudios detallados para la evaluación del peligro sísmico en una zona grande por urbanizar.

El análisis de peligro sísmico se realiza aplicando la metodología desarrollada por Cornell (1968) en términos probabilísticos, metodología que fue modificada e implementada en el programa de cómputo RISK por McGuire (1976). Esta metodología integra información sismotectónica, parámetros sismológicos y leyes de atenuación regionales para los diferentes mecanismos de ruptura. El resultado es una curva de peligro sísmico, donde se relaciona la aceleración y su probabilidad anual de excedencia.

(1) Asistente de Investigación del CISMID-FIC-UNI
(1) Director del CISMID-FIC-UNI

Ponencia presentada en el VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Lima, 6-10 Diciembre 1993.

SISMOTECTÓNICA

La actividad sísmica en el país es el resultado de la interacción de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana y de los reajustes que se producen en la corteza terrestre como consecuencia de la interacción y la morfología alcanzada por el Aparato Andino.

Principales Rasgos Tectónicos

Los principales rasgos tectónicos de la región occidental de Sudamérica, como son la Cordillera de los Andes y la Fosa Oceánica Perú-Chile, están relacionados con la alta actividad sísmica y otros fenómenos telúricos de la región, como una consecuencia de la interacción de dos placas convergentes cuya resultante más saltante precisamente es el proceso orogénico contemporáneo constituido por los Andes. La teoría que postula esta relación es la Tectónica de Placas o Tectónica Global (Isacks et al, 1968). La idea básica de esta teoría es que la envoltura más superficial de la tierra sólida, llamada Litósfera (100 Km), está dividida en varias placas rígidas que crecen a lo largo de estrechas cadenas meso-oceánicas casi lineales; dichas placas son transportadas en otra envoltura menos rígida, la Astenósfera, y son comprimidas o destruidas en los límites compresionales de interacción, donde la corteza terrestre es comprimida en cadenas montañosas o donde existen fosas marinas (Berrocal et al, 1975). Los rasgos tectónicos superficiales más importantes en el área de estudio son :

- La Fosa Oceánica Perú-Chile.
- La Dorsal de Nazca.
- La porción hundida de la costa norte de la Península de Paracas, asociada con un zócalo continental más ancho.
- La Cadena de los Andes.
- Las unidades de deformación y sus intrusiones magmáticas asociadas.
- Sistemas regionales de fallas normales e inversas y de sobreescurrimientos.

Sismicidad

Sismicidad Histórica

Silgado (1978) realizó la más importante descripción ordenada de la historia sísmica del Perú. Desde el siglo XVI hasta el siglo XIX solo se reportan los sismos sentidos en las ciudades principales, indicando que dicha actividad sísmica no es totalmente representativa, ya que pueden haber ocurrido sismos importantes en regiones remotas, que no fueron reportados. Dorbath et al (1990) analizaron los grandes sismos históricos y obtuvieron cantidades estimadas de longitudes de ruptura en un diagrama espacio-tiempo de los grandes sismos históricos del Perú. Se muestra la existencia de tres zonas diferentes correspondientes a la segmentación de la placa de Nazca subducida en la placa Sudamericana. La actividad sísmica en el Norte y

Centro del país es compleja debido a la irregularidad de las longitudes de ruptura, la zona Sur tiene un modelo sísmico simple y regular, ya que ha experimentado cuatro grandes sismos cuyo tiempo de recurrencia es del orden de un siglo; ésta es una zona de alto riesgo sísmico.

Sismicidad Instrumental

La información sismológica instrumental del Perú se encuentra recopilada en el Catálogo Sísmico del Proyecto SISRA (Sismicidad de la Región Andina, 1985), que tiene eventos desde el año de 1900. Este catálogo fue actualizado hasta 1990-I con los datos verificados por el ISC (International Seismological Centre). Para la elaboración de este catálogo se consideraron los registros cuya magnitud m_b es mayor ó igual a 4.0, ya que a partir de este valor los sismos adquieren importancia ingenieril. La información sismológica de 1990-II a 1991-II tiene carácter preliminar y ha sido recopilada del NEIC (National Earthquake Information Center) y del IGP (Instituto Geofísico del Perú).

Dentro de la metodología para el cálculo del peligro sísmico se considera que los eventos sísmicos presentan una distribución de Poisson, que se caracteriza por suponer independencia entre los tiempos de ocurrencia, ya que cada uno de los sismos se considera como un evento aislado e independiente. Por ello es necesario depurar del catálogo todas las réplicas y premonitores, quedando los sismos como eventos principales.

En el catálogo sísmico (1900,1990-I) depurado se cuenta con 4276 sismos. La estadística sísmica no es homogénea o íntegra; la mayor parte de los eventos ocurridos antes de 1960 no tienen reportada su magnitud. Sólo a partir de 1963 los datos instrumentales son más precisos, año en el cual la red de sismógrafos WWSSN (World Wide Standard Seismograph Network) estaba finalmente instalada. La base de datos que se utilizó en el presente trabajo está conformada por los sismos comprendidos entre 1963 y 1990, los mismos que corresponden a 3892 eventos principales e independientes.

El análisis de peligro sísmico se realiza en función de la magnitud. Las escalas de magnitud utilizadas son m_b y M_s , calculadas a partir de las ondas de cuerpo y de superficie respectivamente. Se calculó la siguiente relación entre estas dos magnitudes, de manera que se pueda utilizar cualquiera de ellas para homogenizar la muestra de datos.

$$m_b = 3.30 + 0.40\ M_s$$

La distribución espacial de la actividad sísmica no es uniforme. Está principalmente concentrada en los bordes de los grandes bloques tectónicos, denominados placas tectónicas. La actividad sísmica en el Perú y áreas vecinas es el resultado de la interacción de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, y el proceso de reajuste tectónico del Aparato Andino (Ocola, 1989).

En la Figura 1 se presentan todos los hipocentros del Catálogo Sísmico SISRA (1963-1990) y los rasgos neotectónicos indicados por Macharé et al (1991). Se observa que la actividad sísmica en la zona Norte y Centro del país está distribuida en dos fajas sísmicas longitudinales a los Andes; una occidental a los Andes y exclusivamente producto de la subducción con hipocentros mayormente superficiales y algunos intermedios; y la otra, oriental a los Andes que involucra tanto a procesos de subducción (para hipocentros de profundidades intermedias, hasta 300 Km), como también a procesos secundarios, tal como la acción compresiva del escudo brasilero contra el cinturón andino. Estas dos fajas sísmicas se unen en la zona de transición sismotectónica (13^{o}-14^{o} Sur), para constituir una sola amplia faja sísmica en la región sismotectónica del Perú (Deza, 1990).

Existe una actividad sísmica superficial causada por el proceso de reajuste tectónico del Aparato Andino. En la Figura 1 se observa agrupamientos importantes de eventos en algunas estructuras neotectónicas, tales como las fallas de Huaytapallana, fallas ubicadas en la sierra central y en Moyobamba, en donde la actividad sísmica se encuentra en los primeros 40 Km de profundidad. Los sismos recientes e históricos de Ayacucho, Cusco, Urcos y norte del lago Titicaca, son manifestaciones de esta zona sísmica, muy superficial y destructiva (Ocola, 1989).

En el Ecuador se observa concentración de la actividad sísmica superficial en la zona de Pisayambo y en los alrededores de Quito, que está relacionada con la actividad generada por el volcán Guagua Pichincha (Bonilla y Ruiz, 1992). En la zona norte de Chile la actividad sísmica está asociada al proceso de subducción.

DETERMINACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS Y LOS PARÁMETROS DE RECURRENCIA PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO

Determinación de las Fuentes Sismogénicas

La distribución espacial de la actividad sísmica y las características neotectónicas en el Perú, han permitido definir 20 fuentes sismogénicas con características sismotectónicas particulares. Se presentan estas fuentes como áreas, ya que no existen suficientes datos como para modelar las fallas como fuentes lineales.

El hecho que la actividad sísmica en el Perú es el resultado de la interacción de las placas Sudamericana y de Nazca y el proceso de reajuste tectónico del Aparato Andino, nos permite agrupar a las fuentes en: Fuentes de Subducción y Fuentes Continentales.
Las Fuentes de Subducción modelan la interacción de las placas Sudamericana y de Nazca. Las Fuentes 1, 2, 3, 4 y 5 están ubicadas a lo largo de la costa y representan la sismicidad superficial en la zona de Benioff (0-70 Km). Las Fuentes 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19 representan la sismicidad intermedia (71 a 300 Km). La Fuente 20 representa la sismicidad profunda en la superficie de Benioff (500 a 700 Km). Las Fuentes Continentales 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 están

relacionadas con la actividad sísmica superficial andina. Las fuentes ubicadas en la zona Norte, frontera con el Ecuador y en el Sur, frontera con Chile, fueron definidas considerando las fuentes propuestas por Bonilla y Ruiz (1992) y Aiquel (1990), respectivamente. En la Figura 2 se muestra la ubicación de las Fuentes Continentales y Fuentes de Subducción Superficiales (0-70 Km), formando 2 fajas longitudinales a los Andes. En la Figura 3 están ubicadas las Fuentes de Subducción Intermedias (71-300 Km) y Profundas (500-700 Km).

Determinación de los Parámetros Sismológicos

Cada una de las fuentes sismogénicas tiene características propias definidas por sus parámetros sismológicos: magnitud mínima de homogeneidad (M_{min}), pendiente de la distribución Gutenberg-Richter (b), tasa media anual de actividad sísmica (m) y magnitud máxima (M_{max}). Las escalas de magnitud más utilizadas son m_b y M_s. Dependiendo de la escala utilizada, los sismos muestran valores asintóticos a partir de una cierta magnitud (Idriss, 1985). Para evitar este problema de saturación de la magnitud se utilizará la magnitud M definida como $\max\{m_b, M_s\}$.

Para determinar la sismicidad de cada zona sismogénica se utiliza la expresión de Gutenberg y Richter:

$$\text{Log } N = a - b\,M$$

donde:

N = Número acumulativo de sismos de magnitud M ó mayor por unidad de tiempo.
a,b= Parámetros que dependen de la sismicidad de la zona.

La expresión anterior se puede escribir como:

$$N = 10^{a}\, e^{-\beta M}$$

donde:

$$\beta = b\, \ell n\, 10$$

Para determinar los valores de a y b se utilizó el método de la máxima verosimilitud que ajusta la recta al valor medio de los datos sobre la magnitud mínima de homogeneidad, incluida la máxima magnitud observada, normalizando el aporte que hacen los sismos de diferentes magnitudes. Esto hace que el valor de b refleje de mejor forma las características de la región (Bonilla y Ruiz, 1992).

La tasa μ es la tasa media anual de ocurrencia de eventos mayores o iguales que la magnitud mínima de homogeneidad. Para determinar la tasa μ se utiliza una variación del diagrama de Gutenberg y Richter, que consiste en dibujar un número acumulativo de eventos mayores a una determinada magnitud versus el tiempo. De estos gráficos se puede determinar la magnitud mínima de homogeneidad (M_{min}) y la tasa μ. La magnitud mínima de homogeneidad corresponderá al gráfico cuyo diagrama acumulativo versus tiempo muestre un comportamiento lineal y monotónicamente creciente, mostrando que a partir de esa magnitud el catálogo es homogéneo y completo. La tasa μ es la pendiente de la curva acumulativa de eventos mayores o iguales a M_{min} versus el tiempo. M_{max} es la magnitud máxima probable que puede ser liberada como energía sísmica (McGuire,1976). Para determinar esta magnitud se utiliza el criterio de que el más grande evento que ha ocurrido en la fuente en el pasado, es el máximo sismo que se espera en el futuro.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros sismológicos de las veinte fuentes sismogénicas. Para determinar las profundidades representativas de los hipocentros en las zonas sismogénicas se realizó un análisis estadístico de cálculo de frecuencias de sismos versus profundidad.

Leyes de Atenuación

Se utilizaron dos leyes de atenuación de aceleraciones, la primera es la propuesta por Casaverde y Vargas (1980) y ha sido empleada para las fuentes asociadas al mecanismo de subducción. Esta ley está basada en los registros de acelerógrafos de las componentes horizontales de diez sismos peruanos registrados en Lima y alrededores. La segunda ley de atenuación de aceleraciones utilizada es la propuesta por McGuire (1974) para la Costa Oeste de los Estados Unidos y ha sido empleada para las fuentes asociadas a sismos continentales.

EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO

El peligro sísmico se define por la probabilidad que en un lugar determinado ocurra un movimiento sísmico de una intensidad igual o mayor que un valor fijado. En general, se hace extensivo el término intensidad a cualquier otra característica de un sismo, tal como su magnitud, la aceleración máxima, el valor espectral de la velocidad, el valor espectral del desplazamiento del suelo, el valor medio de la intensidad Mercalli Modificada u otro parámetro. La ocurrencia de un evento sísmico es de carácter aleatorio y la Teoría de las Probabilidades es aplicable en el análisis del riesgo de su ocurrencia. Aplicando esta teoría se puede demostrar que si la ocurrencia de un evento A depende de la ocurrencia de otros eventos : E_1, E_2, ... E_n, mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos; entonces, de acuerdo al teorema de la "Probabilidad Total" se tiene para la probabilidad de ocurrencia de A:

$$P(A) = \sum_{i}^{n} P\,(A/\,E_i) * P\,(E_i)$$

donde P (A/E_i) es la probabilidad condicional que A ocurra, dado que E_i ocurra.

La intensidad generalizada (I) de un sismo en un lugar fijado puede considerarse dependiente del tamaño del sismo (la magnitud o intensidad epicentral) y de la distancia al lugar de interés. Si el tamaño del sismo (S) y su localización (R) son considerados como variables aleatorias continuas y definidas por sus funciones de densidad de probabilidad, $f_S(s)$ y $f_R(r)$ respectivamente; entonces, el peligro sísmico definido por la probabilidad que la intensidad I sea igual o mayor que una intensidad dada, será: P ($I \geq i$) y está dada por:

$$P\,(I \geq i) = \int\int P\,[I/(s,r)]\, f_S\,(s)\, f_R\,(r)\, ds\, dr$$

Esta es la expresión que resume la teoría desarrollada por Cornell en 1968, para analizar el peligro sísmico. La evaluación de esta integral es efectuada por el programa de cómputo RISK desarrollado por McGuire (1976) en el cálculo del peligro sísmico.

Nivel de Confidencia

En el presente estudio de peligro sísmico, el nivel de excedencia ($RISK_t$) y probabilidad extrema se definen como la probabilidad que, en un tiempo determinado (tiempo de vida útil) ocurra un sismo de intensidad igual o mayor a una intensidad dada. El nivel de excedencia se expresa de la manera siguiente:

$$RISK = 1 - e^{-\frac{t}{Ry(a)}}$$

donde:

t : tiempo de vida útil

Ry(a) : periodo de retorno promedio en años de un sismo de intensidad > a.

El nivel de confidencia se expresa como:

$$Nivel\ de\ confidencia = 1 - RISK_t$$

Los movimientos de diseño que el ingeniero debe seleccionar están asociados a un nivel de excedencia suficientemente pequeño durante la vida útil de la edificación. En la Tabla 2 se muestran valores representativos de criterios empleados en la selección de movimientos sísmicos de diseño (Grases, 1989). La selección de los movimientos sísmicos dependen del tipo de obra.

En el presente estudio se considera el 90% de nivel de confidencia para 50 y 100 años de vida útil (t) que corresponden a 475 y 950 años de período de retorno respectivamente, es decir el 10% de nivel de excedencia en un periodo de t años.

Determinación del Peligro Sísmico

Calculados los parámetros sismológicos de las fuentes (M_{min}, M_{max}, ß, μ), las profundidades representativas de los hipocentros de las fuentes y seleccionadas las leyes de atenuación, se calcularon las aceleraciones horizontales mediante el programa RISK en una malla de puntos (malla de 50x50 Km aproximadamente) en todo el territorio peruano y áreas vecinas. En las Figuras 4 y 5 se muestran los mapas de isoaceleraciones con un 10% de excedencia para 50 y 100 años de vida útil.

Se observa que los valores más altos de aceleraciones máximas están localizados a lo largo de toda la costa y van disminuyendo a medida que se avanza hacia al Este. Así, las zonas de Tumbes, Piura, Ica, Tacna y el Norte de Chile tienen los valores más altos de aceleración, 0.50g y 0.60g para 50 y 100 años de vida útil respectivamente. Debe considerarse que en estas zonas se han producido históricamente sismos muy grandes y además son las zonas que presentan una mayor tasa de ocurrencia de sismos. Los valores obtenidos en el Norte de Chile coinciden con los encontrados por Aiquel (1990) para los mismos periodos de vida útil. Se observa también altas aceleraciones en las zonas de Moyobamba, norte del departamento de Amazonas y en la zona ecuatoriana de Cuenca con 0.32g y 0.38g en 50 y 100 años respectivamente. Los valores más bajos de aceleración están localizados en la zona oriental, en el departamento de Loreto, con valores de 0.06g y 0.08g. Otra región con valores bajos de aceleración es la zona de Madre de Dios con valores de 0.10g y 0.14g.

Las curvas de isoaceleraciones prácticamente se mantienen paralelas a la costa, lo que coincide con el mecanismo de subducción. En la zona Noreste del país se produce una separación y cambios en la orientación de las curvas asociadas a la alta sismicidad de esta zona, especialmente el nido sísmico de Rioja-Moyobamba. Se observa también cambios en la inclinación de las curvas a la altura de la Contorsión Norte de Arequipa, zona en la cual se produce la más importante inclinación de la Placa de Nazca.

Casaverde y Vargas (1980) han presentado distribuciones de aceleraciones en el Perú, aunque los valores no son comparables por haberse usado otro porcentaje de probabilidad, nuevas fuentes sismogénicas y otra metodología para determinar los parámetros sismológicos.

Los resultados que muestran las Figuras 4 y 5 tienen una buena correlación con el mapa de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas (Alva et al, 1984), en el cual se observa que las zonas de Tumbes, Piura, Lima, Arequipa, Tacna y el Norte de Chile tienen intensidades entre VIII y IX Mercalli Modificada y las intensidades más bajas se presentan en la zona oriental con valores por debajo de V MM.

Los valores de aceleraciones máximas deben considerarse como valores medios esperados en suelo firme, donde no se considera la influencia de las condiciones locales del suelo, ni los efectos de la interacción suelo-estructura. Por estar el país en una zona altamente sísmica, debe realizarse una evaluación del peligro sísmico más específico en los emplazamientos de las estructuras tales como grandes presas, puentes, autopistas, edificios, etc. El costo de construir cada una de estas estructuras y su importancia para el país es demasiado alto como para permitir apoyarse solamente en mapas generales de peligro sísmico.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Considerando que el territorio peruano se halla ubicado en una de las regiones de más alto índice de actividad sísmica de la tierra, ha sido necesario evaluar apropiadamente el peligro sísmico existente, prediciendo probabilísticamente las aceleraciones máximas que podrían ocurrir en cualquier punto del país, utilizando leyes de atenuación de aceleraciones y correlacionando la sismicidad y la tectónica para determinar las fuentes sismogénicas y sus respectivos parámetros sismológicos.

La subducción de la placa de Nazca bajo el Continente Sudamericano y los reajustes que se producen en la corteza terrestre como consecuencia de la interacción y morfología alcanzada por el aparato andino, constituyen los principales elementos que afectan la sismicidad en el país.

La sismicidad histórica proporciona criterios cualitativos de la actividad sísmica del país a partir del siglo XVI, pero dicha actividad no es totalmente representativa pues los registros históricos de sismos no son homogéneos.

En la sismicidad instrumental (a partir de 1963), la estadística sísmica es homogénea, aunque el período de registros es significativamente menor al de la sismicidad histórica. Se realizó un filtrado del catálogo, eliminando réplicas y premonitores, quedando los sismos como eventos principales para ser modelados como una distribución de Poisson.

La distribución espacial de la actividad sísmica está distribuida en dos fajas sísmicas longitudinales a los Andes; una occidental a los Andes y exclusivamente producto de la subducción; y la otra, oriental a los Andes que involucra tanto a procesos de subducción, como también a procesos secundarios, tal como la acción compresiva del escudo brasilero contra el cinturón andino.

Correlacionando la información tectónica y la sismicidad instrumental se definieron 20 fuentes sismogénicas asociadas al proceso de subducción y al proceso del reajuste del aparato andino. Se determinaron los parámetros sismológicos dentro de un esquema estadístico confiable.

Se evaluó el peligro sísmico, basado en la teoría de Cornell, utilizando el programa de cómputo RISK, obteniéndose mapas de isoaceleraciones para una excedencia de 10% en 50 y 100 años de vida útil.

La concentración de valores más altos de aceleración ocurre a lo largo de la costa y van disminuyendo a medida que se avanza hacia el Este. Estos valores deben considerarse al nivel de suelo firme, donde no se considera la influencia de las condiciones locales, ni los efectos de interacción suelo-estructura.

Los valores de aceleración obtenidos en la evaluación del peligro sísmico dependen fundamentalmente de las leyes de atenuación utilizadas, las que dependen de los registros de aceleración disponibles. Sería recomendable completar la red nacional de acelerógrafos y proponer leyes de atenuación con la información existente y la que se obtenga de futuros sismos.

Los resultados obtenidos en el presente estudio pueden ser utilizados para fines de regionalización sísmica y otros estudios tales como, análisis de vulnerabilidad, riesgo sísmico, efectos de amplificación y obtención del espectro corregido de diseño, etc. Este estudio no es un trabajo final, pues existen parámetros que cambiarán a medida que avancen las investigaciones, produciendo mejores estimaciones del peligro sísmico en el Perú.

REFERENCIAS

1. Aiquel A. (1990), "Hacia una Nueva Regionalización y Cálculo del Peligro Sísmico en Chile", Tesis de Grado, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

2. Alva J., Meneses J. y Guzmán V. (1984), "Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en el Perú", V Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Tacna, Perú.

3. Bender B. y Campbell K. (1989), "A Note on the Selection of Minimun Magnitude for use in Seismic Hazard Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 79, No. 1, pags 199-204.

4. Berrocal J. (1974), "South American Seismotectonics from SAAS Data", Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy in the University of Edinburg.

5. Berrocal J., Deza E. y Shikiya J. (1975), "Estudio de Sismicidad para el Proyecto de Derivación del Río Mantaro a Lima", Informe del Instituto Geofísico del Perú a ELECTROPERU S.A.

6. Bolt B. (981), "Terremotos", University of California, Berkeley.

7. Bonilla F. y Ruiz M. (1992), "Evaluación del Peligro Sísmico en el Ecuador", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

8. Casaverde L. y Vargas J. (1980), "Zonificación Sísmica del Perú", II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente, Organización de Estados Americanos y Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

9. Cornell A. (1968), "Engineering Seismic Risk Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America", Vol 58, No. 5 pags. 1538-1606.

10. Deza E. (1969), "Estudio Preliminar sobre las Zonas de Transición que separan posibles Regiones Sismotectónicas del Margen Occidental de Sudamérica: Zona de Transición en el Perú", I Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Lima, Perú.

11. Deza E. y Carbonell C. (1978), "Regionalización Sismotectónica Preliminar del Perú", IV Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú.

12 Deza E. (1990), "Identificación de una Posible Estructura en Bloques en el Sur del Perú", Seminarios CISMID-UNI, Lima, Perú.

13. Dorbath L., Cisternas A. y Dorbath C. (1990), "Assessment of the Size of Large and Great Historical Earthquakes in Peru", Bulletin of the Seismological Society of America", Vol 80, No. 3 pags. 551-576.

14. Grases J. (1989), "Peligro Sísmico con fines de Ingeniería", Revista Geofísica 31, págs. 261-279.

15. Idriss M. (1985), "Evaluating Seismic Risk in Engineering Practice", Proceedings of the 11th ICSMFE, Vol. 1, San Francisco, USA.

16. Isacks B., Oliver J. y Sykes L.R. (1968), "Seismology and Global Tectonics", Journal of Geophysical Research, Vol 73, No. 18, pág. 5855-5899.

17. Kelleher J. (1972), "Rupture Zones of Large South America Earthquake and Some Predictions", Journal of Geophysical Research, Vol 77, No. 11.

18. Macharé J., Leureyro J. y Sebrier M. (1991), "Actualización del Mapa Neotectónico del Perú a Escala 1:2'000,000", VII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú.

19. McGuire R. (1974), "Seismic Structural Response Risk Analysis incorporating Peak Response Regresion on Earthquake Magnitude and Distance", MIT Report R74-51, Cambridge, Mass. USA.

20. McGuire R. (1976), "Fortran Computer Program for Seismic Risk Analysis", Open-File Report 76-67, U.S. Geological Survey.

21. Ocola L. (1989), "Patrones de Sismicidad en el Perú y Areas Vecinas", Seminarios CISMID-UNI, Lima, Perú.

22. Pacheco J. y Sykes L. (1992), "Seismic Moment Catalog of Large Shallow Earthquakes, 1900 to 1989", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 82, No. 3, pags. 1306-1349.

23. Sebrier M., Huamán D., Blanc J.L., Macharé J., Bonnot D. y Cabrera J. (1982), "Observaciones acerca de la Neotectónica del Perú", Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

24. Silgado E. (1978), "Historia de los Sismos más Notables ocurridos en el Perú (1513-1974)", Instituto de Geología y Minería, Boletín No. 3, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica, Lima, Perú.

25. SISRA (1985), "Catálogo de Terremotos para América del Sur", Vol 7a, 7b y 7c, Proyecto SISRA, CERESIS, Lima, Perú.

TABLA 1 PARÁMETROS SISMOLÓGICOS DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS

FUENTE	Mmin	Mmax	TASA	BETA	PROF (Km)
F1	4.8	8.1	1.49	2.51	50
F2	4.8	7.9	3.28	2.60	40
F3	4.8	8.0	6.43	3.14	30, 60
F4	4.8	8.2	3.79	3.24	40, 60
F5	4.8	8.2	3.95	2.82	60
F6	4.9	7.4	0.44	2.67	50
F7	4.9	7.4	0.17	3.57	40
F8	4.9	7.0	0.19	2.42	65
F9	4.9	7.5	0.88	3.30	60
F10	4.9	7.3	0.71	2.57	50
F11	4.9	7.1	3.60	3.55	40, 60
F12	4.9	7.1	0.75	4.55	50
F13	4.9	6.9	0.18	2.52	100
F14	4.9	6.5	0.86	4.75	100
F15	4.9	7.2	1.64	2.69	100
F16	4.9	7.2	3.09	3.76	115
F17	4.9	7.5	12.82	3.69	90, 125, 160
F18	4.9	7.5	2.43	2.29	110, 180
F19	4.9	7.0	2.87	3.33	120, 160
F20	4.9	7.5	0.75	1.69	610

TABLA 2 VALORES REPRESENTATIVOS DE CRITERIOS EMPLEADOS EN LA SELECCIÓN DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS DE DISEÑO

TIPO DE OBRA	VIDA UTIL (t años)	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA	TIEMPO DE RETORNO (años)
- Instalaciones esenciales con capacidad muy limitada para resistir deformaciones inelásticas y peligro de contaminación (contenedor de reactores nucleares).	50 a 100	0.01	>5,000
- Equipos de S/E eléctricas de alto voltaje.	50	0.03	1,600
- Puentes o viaductos de arterias principales.	100	0.10	950
- Tanques de almacenamiento de combustible.	30	0.05	590
- Edificaciones para viviendas.	50	0.10-0.20	225/500
- Construcciones temporales que no amenacen obras de importancia mayor.	15	0.30	40

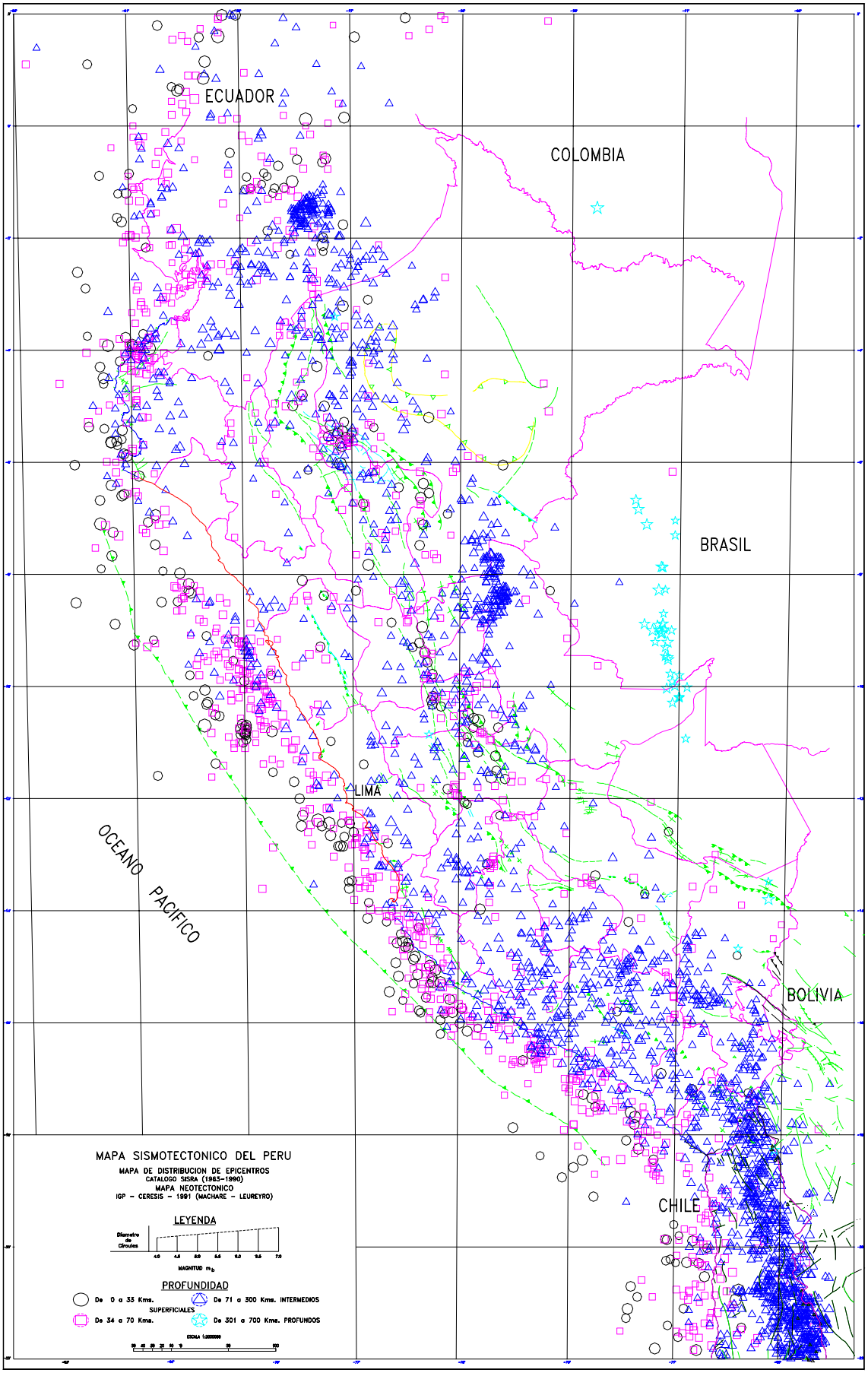

Figura Nº 1: Mapa Sismotectónico del Perú

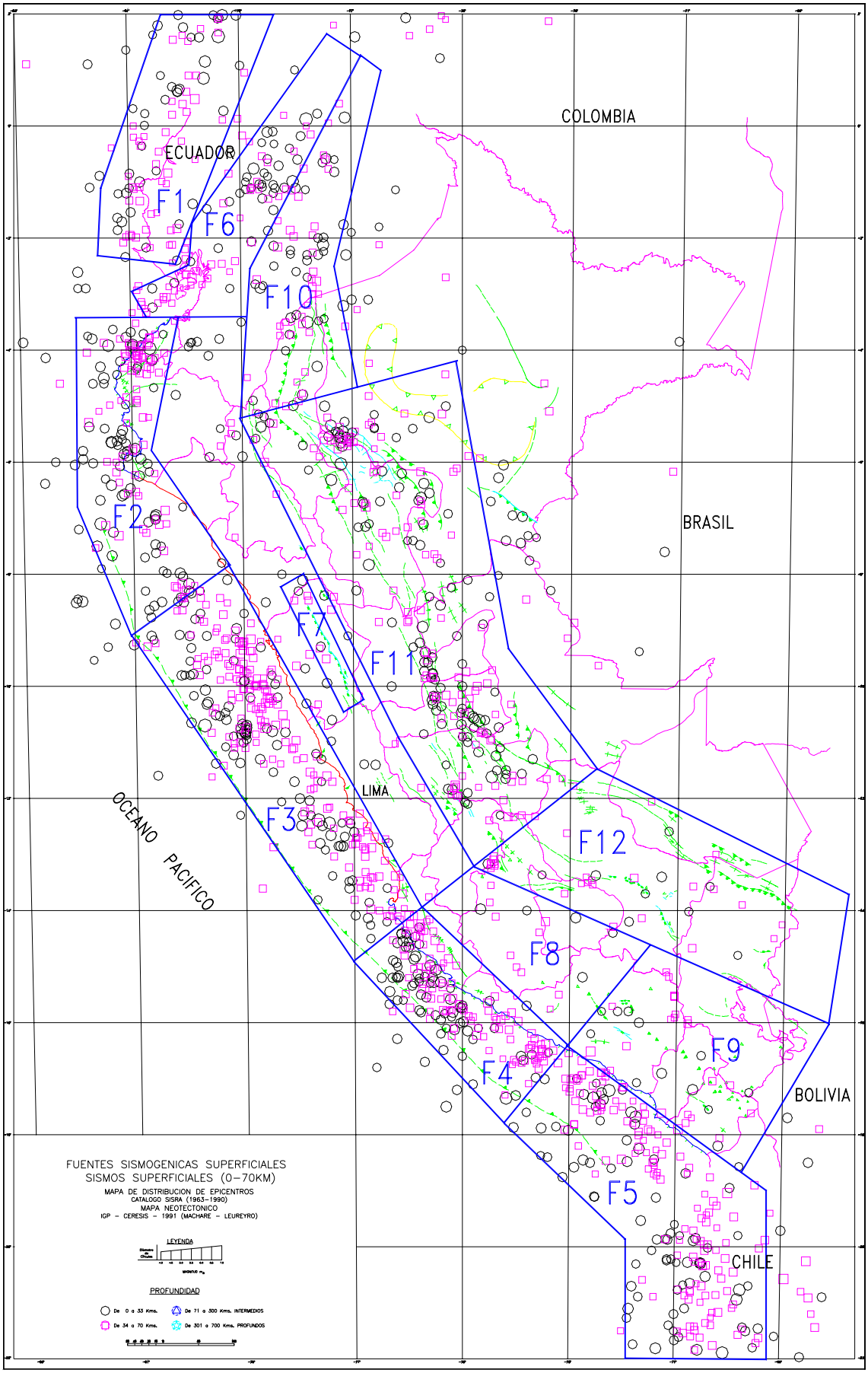

Figura Nº 2: Fuentes Sismogénicas Superficiales

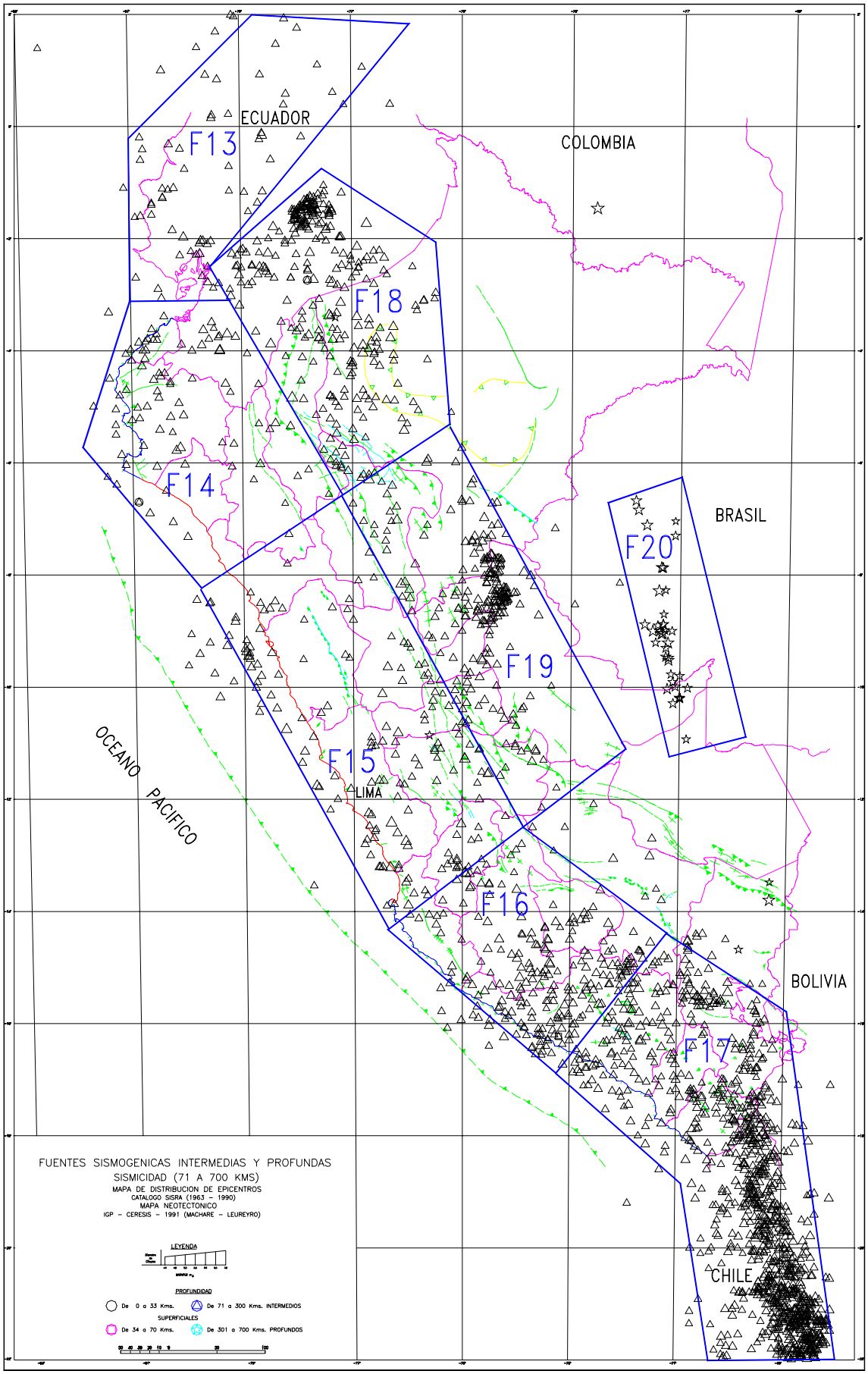

Figura Nº 3 : Fuentes Sismogénicas Intermedias y Profundas

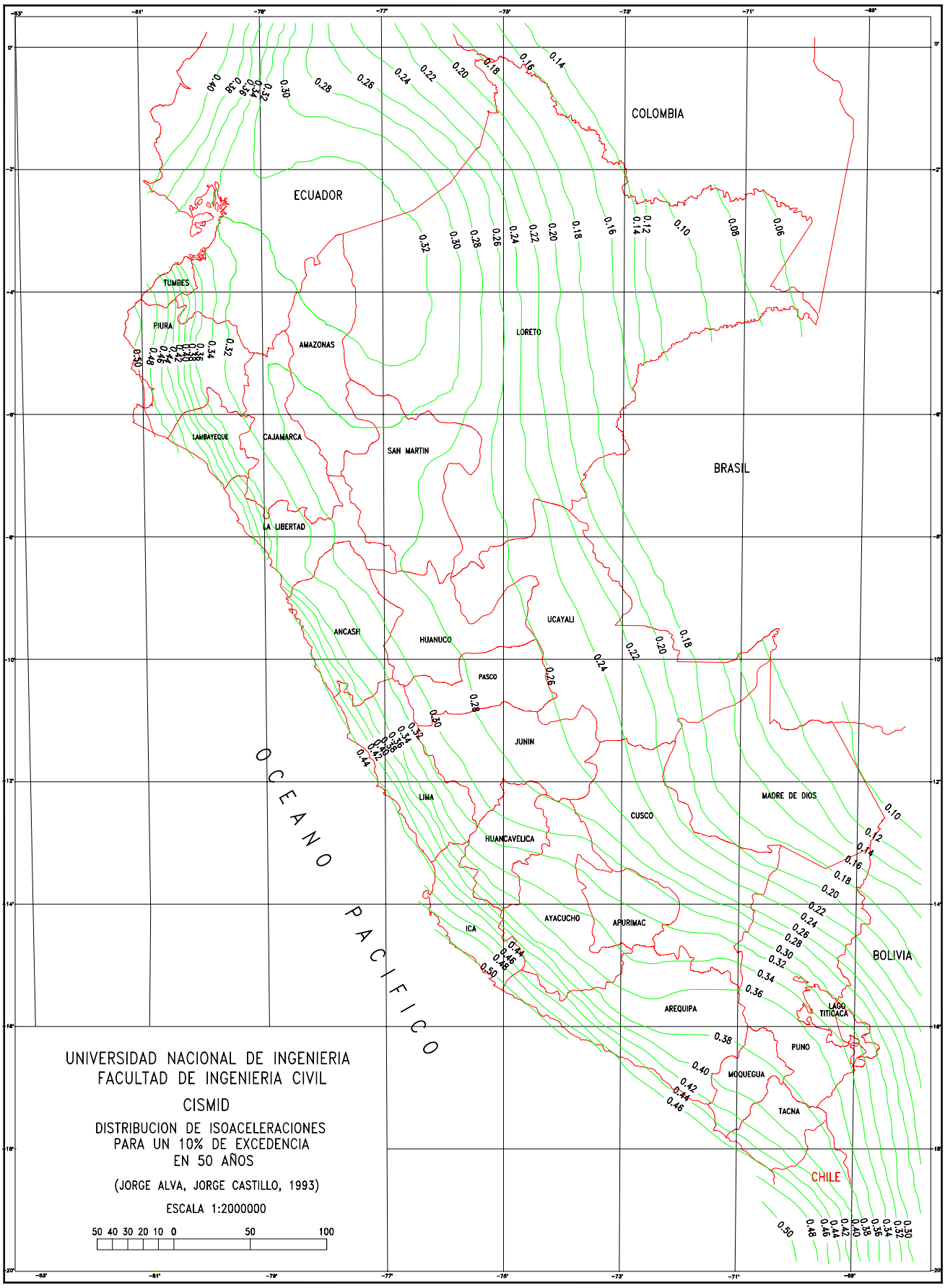

Figura Nº 4: Distribución de Isoaceleraciones para 10% de Excedencia en 50 años

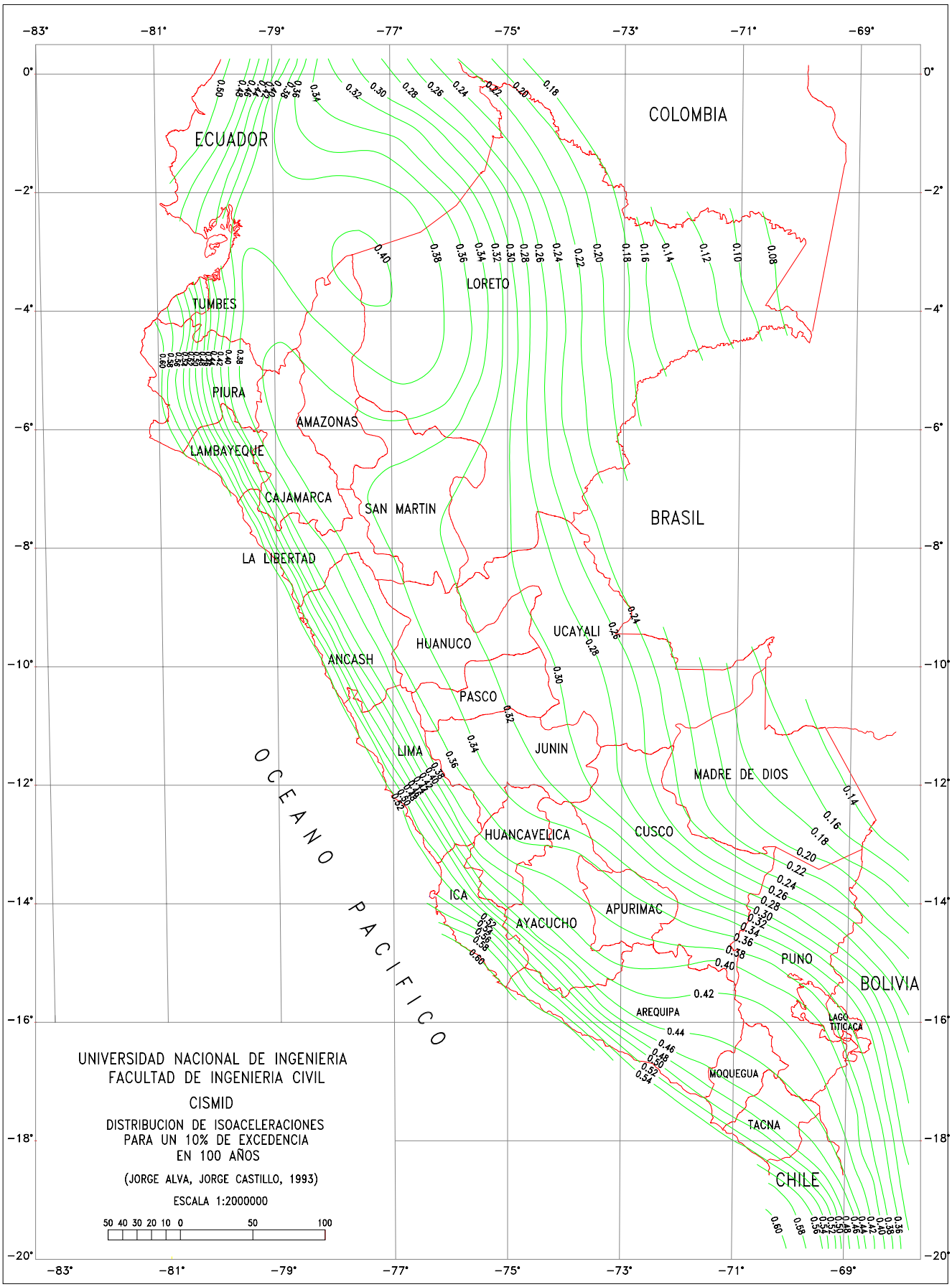

Figura Nº 5: Distribución de Isoaceleraciones para 10% de Excedencia en 100 años