

# **Fuerzas Sísmicas en los Países Bolivarianos**

R. Aguiar Falconí

**Monografías de Ingeniería Sísmica**

Editor A.H. Barbat

**Fuerzas Sísmicas en los  
Países Bolivarianos**

Roberto Aguiar Falconí  
Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Politécnica del Ejército  
Quito-Ecuador

CENTRO INTERNACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA  
Edificio C1, Campus Norte UPC  
Gran Capitán s/n  
08034 Barcelona, España

**MONOGRAFÍAS DE INGENIERÍA SÍSMICA**

Editor A.H. Barbat

ISSN: 1134-3249

**FUERZAS SÍSMICAS EN LOS PAÍSES BOLIVARIANOS**

Monografía CIMNE IS 42

© El autor

ISBN: 84-89925-74-7

Depósito legal: B-52788-2000

# ÍNDICE GENERAL

## PRESENTACIÓN

### 1 ZONIFICACIÓN SÍSMICA EN LOS PAÍSES BOLIVARIANOS

1.1 TECTÓNICA DE PLACAS .....	2
1.2 MAPAS DE ZONIFICACIÓN SÍSMICA .....	3
1.3 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE VENEZUELA .....	4
1.3.1 Norma COVENIN 1756-82 .....	4
1.3.2 Norma COVENIN 1756-98 .....	5
1.4 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE COLOMBIA .....	6
1.4.1 Norma ACIS 100-81 .....	6
1.4.2 Norma NSR-98 .....	7
1.5 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL ECUADOR .....	8
1.5.1 Primer mapa de zonificación .....	8
1.5.2 Código Ecuatoriano CEC-2000 .....	9

1.6 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL PERÚ .....	11
1.6.1 Primeros mapas de zonificación .....	11
1.5.2 Norma Técnica NTE.030 .....	12
1.7 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CAF .....	13
1.8 FACTOR DE IMPORTANCIA .....	13
1.9 COMENTARIOS .....	14
REFERENCIAS .....	15

## **2 ESPECTROS ELÁSTICOS EN LOS PAÍSES BOLIVARIANOS**

2.1 ESPECTROS DE RESPUESTA .....	18
2.1.1 Sistema de un grado de libertad .....	18
2.1.2 Fracción del amortiguamiento crítico .....	20
2.2 ESPECTROS DE DISEÑO ELÁSTICO .....	20
2.3 ESPECTRO DE LA NORMA VENEZOLANA .....	22
2.3.1 Normativa de Venezuela de 1982 .....	23
2.3.2 Comparación entre las normativas de 1982 y 1998 de Venezuela .....	25
2.4 ESPECTRO DE LA NORMA COLOMBIANA NSR-98 .....	27
2.4.1 Perfiles de suelo de la Norma Colombiana .....	28
2.5 ESPECTRO DEL CÓDIGO ECUATORIANO .....	29
2.5.1 Clasificación de suelos .....	31
2.6 ESPECTRO DE LA NORMA DEL PERÚ .....	33

2.7 ESPECTRO DE DISEÑO ELÁSTICO DEL UBC-97 .....	34
2.7.1 Perfiles de suelo del UBC-97 .....	36
2.8 EQUIVALENCIA ENTRE LOS PERFILES DE SUELO .....	36
2.9 COMPARACIÓN DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS PAÍSES DE LA CAF .....	37
2.10 VELOCIDAD DE LA ONDA DE CORTE .....	39
2.10.1 Relación entre $V_s$ y N del SPT .....	40
2.10.2 Profundidad del perfil de suelo .....	40
2.10.3 Velocidad ponderada de la onda de corte .....	36
2.11 COMENTARIOS ADICIONALES SOBRE ESPECTROS DE DISEÑO ...	43
REFERENCIAS .....	43

### **3 FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA**

3.1 INTRODUCCIÓN .....	47
3.2 NORMATIVA VENEZOLANA .....	48
3.2.1 Niveles de diseño y tipologías estructurales .....	48
3.2.2 Estructuras irregulares .....	49
3.2.2.1 Irregularidad vertical .....	49
3.2.2.2 Irregularidad en planta .....	50
3.3 NORMA COLOMBIANA .....	51
3.3.1 Tipologías estructurales de la norma NSR-98 .....	52
3.3.2 Irregularidades en planta .....	52
3.3.3 Irregularidades en elevación .....	54
3.4 CÓDIGO ECUATORIANO .....	56

3.4.1 Tipologías estructurales del CEC-2000 .....	58
3.4.2 Irregularidades en planta $\phi_p$ del CEC-2000 .....	58
3.4.3 Irregularidades en elevación $\phi_e$ del CEC-2000 .....	58
3.5 NORMA DEL PERÚ .....	59
3.5.1 Tipologías estructurales de la norma NTE.030 .....	59
3.5.2 Irregularidades en elevación de la norma NTE.030 .....	60
3.5.3 Irregularidades en planta de la norma NTE.030 .....	60
3.6 RESUMEN DE IRREGULARIDADES ESTRUCTURALES .....	61
3.7 FACTOR R DEL ATC 3-05 .....	63
3.8 FACTOR $R_w$ DEL UBC .....	63
3.9 CONCLUSIONES .....	64
REFERENCIAS .....	65

#### 4 DESEMPEÑO ESTRUCTURAL Y FUERZAS DE DISEÑO

4.1 FILOSOFÍA DE DISEÑO TRADICIONAL .....	67
4.2 DESEMPEÑO ESTRUCTURAL SEGÚN VISION 2000 .....	68
4.3 ANÁLISIS CON ESPECTRO ELÁSTICO .....	69
4.4 ANÁLISIS CON ESPECTRO INELÁSTICO .....	70
4.5 INERCIAS PARA EL ANÁLISIS SÍSMICO .....	71
4.6 MODELO ELASTOPLÁSTICO .....	71
4.7 CAPACIDAD RESISTENTE .....	74
4.8 SOBRRRESISTENCIA DE LAS ESTRUCTURAS .....	75
4.8.1 Factores que aportan a la sobrerresistencia .....	76

4.9 DUCTILIDAD GLOBAL $D$ .....	77
4.10 DESEMPEÑO ESTRUCTURAL Y EL VALOR $R_w$ .....	77
4.11 COMENTARIOS .....	79
REFERENCIAS .....	80

## 5 ANÁLISIS SÍSMICO Y DESEMPEÑO ESTRUCTURAL

5.1 VARIABLES DE LA MODELACIÓN .....	83
5.2 VALORES REFERENCIALES .....	85
5.3 DEMANDA SÍSMICA .....	85
5.4 CAPACIDAD SÍSMICA .....	86
5.5 ÍNDICES DE DAÑO LOCAL .....	87
5.6 INTERPRETACIÓN DE LOS ÍNDICES DE DAÑO LOCAL .....	89
5.6.1 Descripción del daño en elementos en función del $I_D$ .....	89
5.6.2 Daño a nivel de piso .....	90
5.6.3 Daño a nivel de la estructura .....	90
5.7 APLICACIÓN .....	91
5.7.1 Valores iniciales para el análisis sísmico .....	92
5.7.2 Demanda sísmica encontrada .....	92
5.7.3 Capacidad resistente de la estructura analizada .....	94
5.7.4 Puntos notables .....	96
5.7.5 Relación demanda-capacidad .....	97
5.7.6 Índices de daño local .....	98
5.8 CONCLUSIONES .....	99
REFERENCIAS .....	100



## PRESENTACIÓN

El 11 de octubre del 2000, en el Palacio Nacional de Convenciones de Ginebra Suiza, las Naciones Unidas, me confirió un *Diploma de Distinción del Premio Sasakawa*, por las publicaciones y trabajos desarrollados en el campo de la prevención de los desastres naturales. Este premio sin lugar a dudas es el mejor estímulo que un investigador puede recibir. Escribir es una tarea muy compleja que demanda una gran cantidad de tiempo y no hay nada más reconfortante que el saber que las contribuciones que uno realiza son apreciadas y galardonadas por la comunidad científica internacional.

El 5 de marzo de 1987, un sismo superficial de magnitud 6.8, afectó a la población ecuatoriana y dejó una pérdida de mil millones de dólares, en esa época representaba la décima parte de la deuda externa del país. El sismo tuvo una duración de 40 segundos y es increíble como en tan poco tiempo se destruyó lo que costó años de edificarlo, con mucho sacrificio. Este sismo y otros desastres naturales registrados por esas fechas, llevó a que Naciones Unidas declare a la década de los noventa como la *década internacional para la reducción de los desastres naturales*.

Teóricamente el decenio debió finalizar en 1999, pero lamentablemente, para que ésto no termine, en 1999 se registraron varios eventos sísmicos que dejaron gran destrucción y lágrimas. En forma cronológica, basta mencionar el sismo del 25 de enero, que afectó al eje cafetero de Colombia; el 15 de junio y el 30 de septiembre, el pueblo mexicano se vió estremecido por dos nuevos sismos; el 17 de agosto, el mundo entero vió con impotencia la destrucción registrada por el sismo de Turquía; el 7 de septiembre, Grecia pasó a ser noticia por un sismo de menor intensidad que los anteriores pero que produjo daño en poblaciones cercanas a Atenas; a los catorce días, el 21 de septiembre, el mundo nuevamente se conmovió por las imágenes desgarradoras que presentaban los medios de comunicación sobre el sismo de Taiwán; el 12 de noviembre, Turquía, volvió a sentir un sismo y como si todo esto fuera poco, la desgracia mayor en cuanto al número de víctimas se registró en Venezuela, la noche del 15 al 16 de

diciembre de 1999, cuando cerca de 50000 personas fallecieron a causa de los deslaves producidos por las lluvias en el Estado Vargas.

Todas estas desgracias, obligan a los investigadores a seguir escribiendo obras, como el presente texto, cuyo único objetivo es, aportar mediante el conocimiento, a tener estructuras más seguras ante la acción sísmica.

Por otra parte, dentro del marco de la globalidad que se vive en el mundo a inicios del nuevo milenio, no es descabellado pensar, en tener una sola normativa de ingeniería sismo resistente, al menos para los países de la Comunidad Andina de Fomento CAF. Con esta idea, se ha escrito la presente obra, en la que se muestra las normativas vigentes en Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú, en lo referente a las acciones sísmicas de diseño.

En el capítulo primero, para cada uno de los países de la CAF, se comparan los mapas de zonificación sísmica de la década de los años ochenta, cuando se iniciaban los estudios de peligrosidad sísmica en términos probabilísticos, con los que están vigentes en las normativas actuales y a su vez todas estas zonificaciones, se comparan con el trabajo realizado por CERESIS en forma global. Por otra parte, se analizan los factores de uso o de importancia de las edificaciones para una aceleración máxima del suelo del 40% de la aceleración de la gravedad y se determina la probabilidad de excedencia.

En el capítulo dos, se describen los espectros de diseño elástico de los países de la CAF. Además se presenta el espectro de diseño del UBC-97, toda vez que la normativa de California ha servido de modelo para algunas de las normativas de los países bolivarianos. Por otro lado, se describe con bastante detalle, los perfiles y tipos de suelo de cada una de las normativas y se comparan entre ellas.

El capítulo tres, está dedicado al factor de reducción de resistencia sísmica  $R$ , con el que trabajan las normativas de Venezuela y Colombia, y al factor  $R_w$ , que contemplan las normativas de Perú y Ecuador. Se indica además los diferentes tipos de irregularidades, tanto en planta como en elevación, que consideran las normas de la CAF. Se tendrían estructuras muy seguras ante la acción de los sismos, si se proyectan edificaciones sin las irregularidades contempladas en las diferentes normativas.

En el capítulo cuatro, se trata un tema que es motivo de estudio en varios centros de investigación del mundo, se trata sobre el desempeño estructural y las fuerzas de diseño. En efecto se presenta, lo propuesto por el SEAOC-95 en su documento VISION 2000 y lo propuesto por el ATC-33, en su guía NEHRP. Son temas de actualidad, basados en una triste realidad, de que se piensa que al diseñar la estructura para el sismo raro, que tiene un período de retorno de 475 años, ya se cubre el buen comportamiento de la edificación ante sismos menores y la realidad es diferente, debido a que ha existido demasiado daño con sismos de moderada magnitud. Esto obliga a involucrar al desempeño estructural esperado en el diseño sísmico.

En el capítulo cinco, se propone una metodología de cálculo para realizar el análisis sísmico de una edificación básica, compuesta por vigas y columnas, en la que se verifica el desempeño estructural a la luz de las recomendaciones formuladas por el SEAOC-95 y el ATC-33. En la metodología propuesta, se da importancia a la formulación del modelo numérico de cálculo, concretamente a la modelación de los nudos, de los apoyos, de las inercias a considerar y del factor de reducción de resistencia. En la metodología propuesta, se recomienda el uso de la técnica del pushover para determinar la capacidad soportante de la estructura.

Deseo dejar constancia del agradecimiento a mi querida familia, por el continuo estímulo que recibo de ellos, por el amor de mi querida esposa Alice y la felicidad que me dan cada uno de mis hijos: Roberto, Alice, María José, Nicolás, Gabriel y Felipe. Finalmente, pero en primer lugar a Dios, porque con su ayuda puedo todo.

Roberto Aguiar Falconí  
Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Politécnica del Ejército



## *CAPÍTULO 1*

# **ZONIFICACIÓN SÍSMICA EN LOS PAÍSES BOLIVARIANOS**

Se analiza en forma general la tectónica de placas, que originan los sismos en los países bolivarianos. Luego se presenta el mapa de isoaceleraciones, realizado por CERESIS en 1996, para América Latina, con el cual se ve el grado de correlación que existe, con las zonificaciones vigentes en Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú.

Posteriormente, se compara las zonificaciones obtenidas en los indicados países, a principios de la década de los ochenta, cuando se empezó a calcular la peligrosidad sísmica en términos probabilísticos, con las zonificaciones que constan en las normativas y códigos a principios del siglo XXI. Los mapas de zonificación que se analizan determinan la aceleración máxima del suelo en roca y en suelo firme, para una vida útil de la estructura de 50 años y con una probabilidad de excedencia del 10%.

Si se desconoce o se evalúa en forma incorrecta la peligrosidad sísmica de una zona, en la cual se piensan realizar obras ingenieriles como puentes, edificios, obras hidráulicas, etc. El cálculo estructural que se realice no estará bien, a pesar de que se utilicen programas muy sofisticados para el análisis estático y dinámico de las estructuras. De ahí la gran importancia de conocer sobre esta temática, toda vez que es la base para la definición de espectros de diseño que se van a utilizar en el análisis sísmico de las estructuras.

Finalmente, se indica el factor de importancia de las diferentes normativas analizadas, y se determina la probabilidad de excedencia, para una aceleración máxima del suelo del 40% de la gravedad, en edificaciones esenciales, especiales y básicas.

## 1.1 TECTÓNICA DE PLACAS

Tres son las placas tectónicas que afectan a la sismicidad de los países de la Corporación Andina de Fomento CAF y son las placas de Nazca, Americana y del Caribe, las mismas que se indican en la figura 1.1.

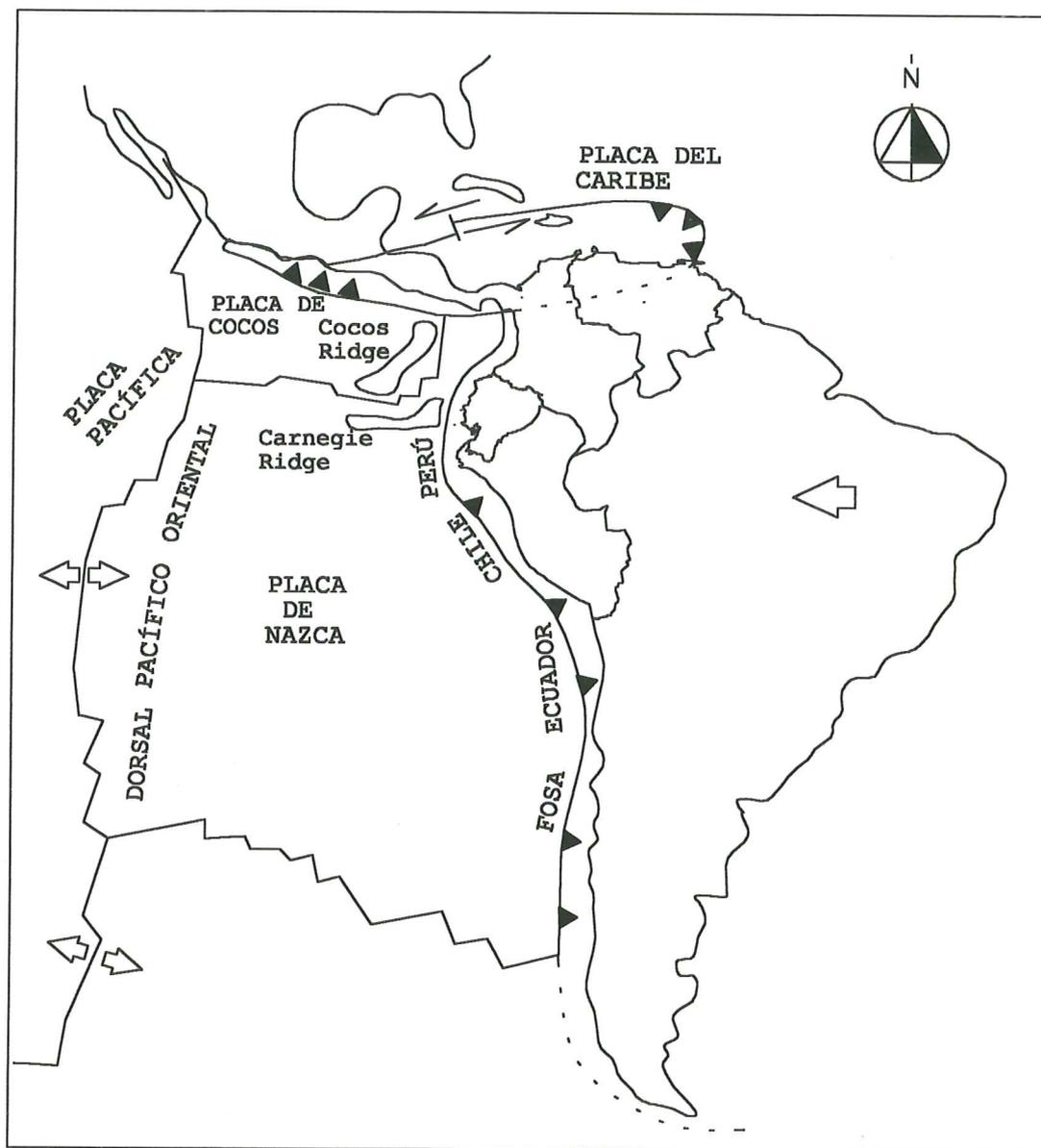


Figura 1.1 Placas Tectónicas, adaptado de referencia 1.

A pesar de la gran cantidad de investigaciones que se han realizado, todavía no se conoce a ciencia cierta los límites de la placa del Caribe, se estima que se desplaza a una velocidad de 1 a 2 cm/año en dirección E-SE, con respecto a la placa Americana. Por otra parte, la velocidad de la placa de Nazca<sup>(1,2)</sup>,

varía entre 5 y 7 cm/año, con relación a la placa Americana que se mueve en sentido contrario a una velocidad relativa del orden de 1 a 2 cm/año.

En fin hay varios aspectos de la Tectónica y la Geología que se desconocen, lo único que se sabe a cabalidad, es que las cadenas montañosas, los volcanes y los sismos son consecuencia del movimiento lento pero continuo de las placas tectónicas, que al moverse en sentido contrario, han originado que la placa de Nazca se doble y penetre hacia el interior de la tierra, formando la Fosa del Pacífico, o la Fosa Centroamericana, y es allí donde se registran los mayores sismos.

Al observar la figura 1.1, se comprende por qué en la costa de los países bolivarianos, se tiene una mayor peligrosidad sísmica, la misma que disminuye conforme se avanza hacia el continente.

## 1.2 MAPAS DE ZONIFICACIÓN SÍSMICA

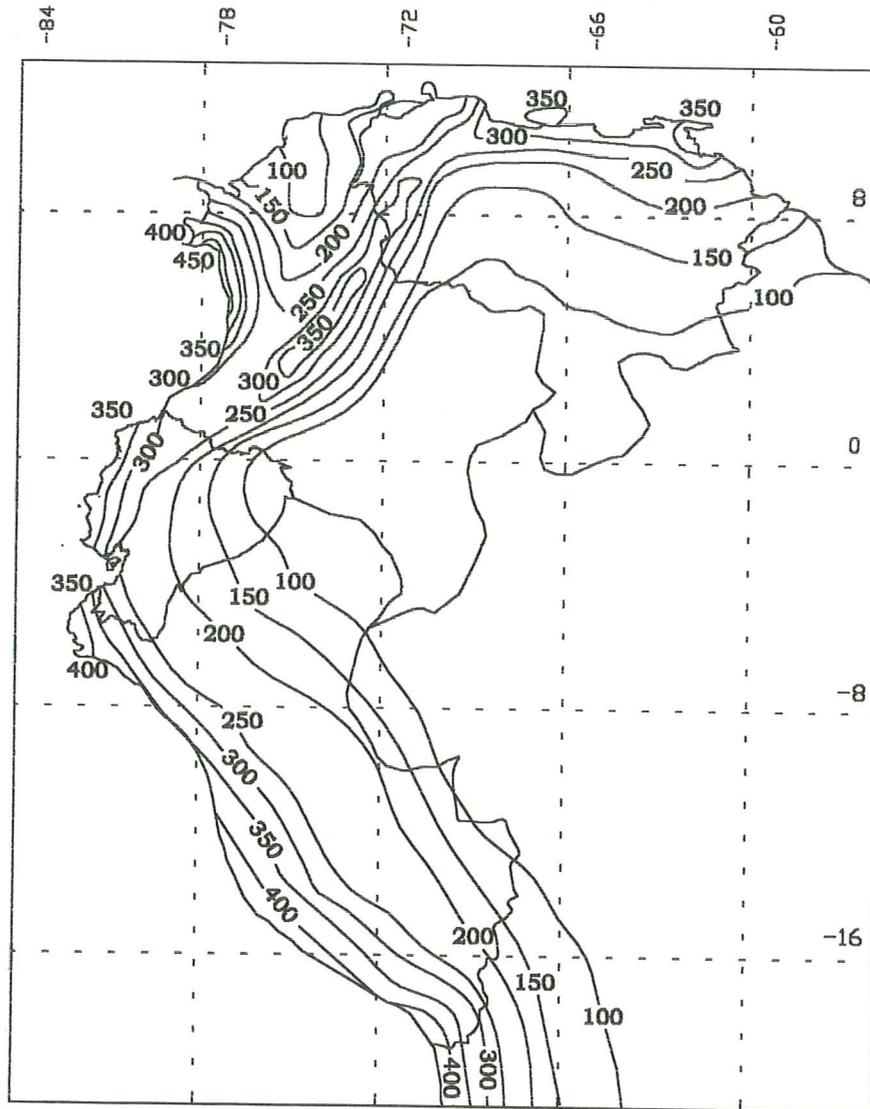
Existen algunas formas de cuantificar y presentar los mapas de zonificación sísmica de una determinada región. Una de ellas es en base al análisis de las curvas isosistas de eventos registrados en el pasado. Para ello, los daños o efectos, producidos por un sismo son evaluados en función de la Intensidad. Con esta variable, como base se han realizado algunas zonificaciones a nivel de País, como es el caso de la primera norma sísmica de Perú de 1971.

Otra forma, de zonificar un País, aunque un tanto más elaborada es por medio de los mapas sismotectónicos, que incluyen: información tectónica, geológica, geofísica, geotécnica y sísmica. Desde el punto de vista de Ingeniería Sismo resistente, esta zonificación no aporta con parámetros con los cuales se pueda determinar las fuerzas de diseño sísmico de la estructura. Por esta razón, la corriente más utilizada para zonificar sísmicamente un País, es la que se indica a continuación.

En la tercera forma de cálculo, se procede a evaluar la peligrosidad sísmica en términos probabilísticos. En esta corriente de evaluación el Applied Technology Council ATC<sup>(3)</sup>, plantea la construcción de espectros de aceleración elástica en base a la aceleración máxima del suelo en roca o en suelo firme, la misma que se obtiene de mapas de regionalización sísmica originados en curvas de igual aceleración para una vida útil de la estructura de 50 años y con una probabilidad de excedencia del 10%. A manera de ejemplo, en la figura 1.2, se presenta el mapa probabilístico de peligro sísmico, elaborado por CERESIS<sup>(4)</sup>, para Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú.

En la figura 1.2, se aprecia que la aceleración máxima del suelo es 350 gals, en el Caribe. En Colombia es de 450 gals, en la costa norte del Océano Pacífico. En Ecuador, es de 350 gals, en la mayor parte de la zona costera y en Perú la aceleración máxima es de 400 gals.

Las zonificaciones sísmicas que se presentan posteriormente para Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú, tienen en cuenta la vida útil y probabilidad de excedencia indicados anteriormente. Es decir 50 años y 10% de probabilidad de excedencia.

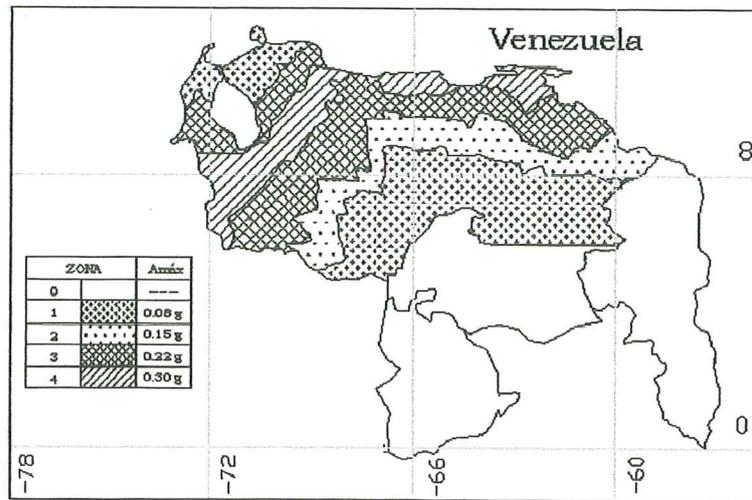


**Figura 1.2** Curva de isoceleraciones máximas para Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú<sup>(4)</sup>, calculadas para una vida útil de 50 años y con una probabilidad de excedencia del 10%.

### 1.3 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE VENEZUELA

#### 1.3.1 Norma COVENIN 1756-82

En la figura 1.3, se indica lo que podría ser, el primer mapa de zonificación sísmica de Venezuela, que fue publicado en la Norma COVENIN 1756-82<sup>(5)</sup>. Este trabajo fue realizado en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales por José Grases, para el efecto se implementó en un computador H.P. 1000 E., el



**Figura 1.3** Zonificación Sísmica de Venezuela, según COVENIN 1756-82.

programa “Seismic Risk Analysis”, desarrollado por Robin McGuire<sup>(6)</sup> en 1975.

Se destaca que se han definido cuatro zonas sísmicas, cuya aceleración máxima del suelo en roca, varía desde 0.08 g (8% de la aceleración de la gravedad) para la zona uno, hasta 0.30 g, para la zona cuatro. Las zonas dos y tres están caracterizadas por aceleraciones de 0.15 g. y 0.22 g, respectivamente.

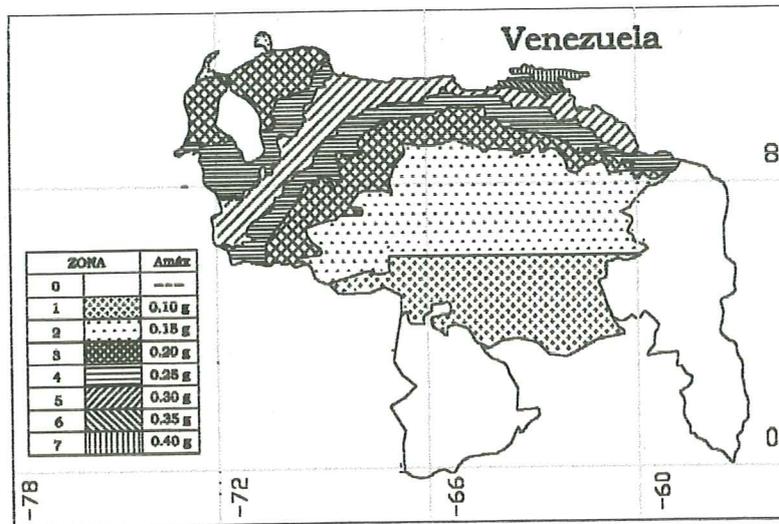
### 1.3.2 Norma COVENIN 1756-98

En 1998, se publica la Norma Covenin 1756-98<sup>(7)</sup> y en ella se presenta la nueva zonificación sísmica de Venezuela, que podría considerarse como la última publicada a nivel de normativa para edificaciones sismorresistentes, la misma que se indica en la figura 1.4

En la Norma Venezolana de 1998, se clasifica el País, con fines de Ingeniería Sísmica, en siete zonas, que van desde 0.10 g, en la zona uno hasta 0.40 g, en la zona de mayor peligrosidad sísmica, que es la siete.

Los cambios más significativos que se han dado en los dos mapas, indicados en las figuras 1.3 y 1.4, son que en la Norma Covenin 1756-98 la zona 1, está caracterizada por una aceleración de 0.10 g, antes en 1982, la aceleración era nula. Por otra parte, en las zonas seis y siete de la Norma de 1998, se espera una aceleración máxima del suelo en roca de 0.35 g. y 0.40 g, en la norma de 1982 estas dos zonas estaban definidas por una peligrosidad sísmica de 0.30 g.

Otra diferencia que existe entre las dos normas de 1982 y 1998, en cuanto se refiere a la determinación de la aceleración máxima del suelo en duro, es la incorporación en la Norma Covenin 1756-98 del factor de corrección  $\varphi$ , el cual modifica la aceleración, indicada en la figura 1.4, en función del tipo de suelo. En efecto, en suelos en los cuales hay menos probabilidad de amplificación de



**Figura 1.4** Zonificación Sísmica de Venezuela, según COVENIN 1756-98.

las ondas sísmicas, como se tiene en los suelos duros, se puede disminuir hasta en un 15%, la aceleración especificada en la figura 1.4.

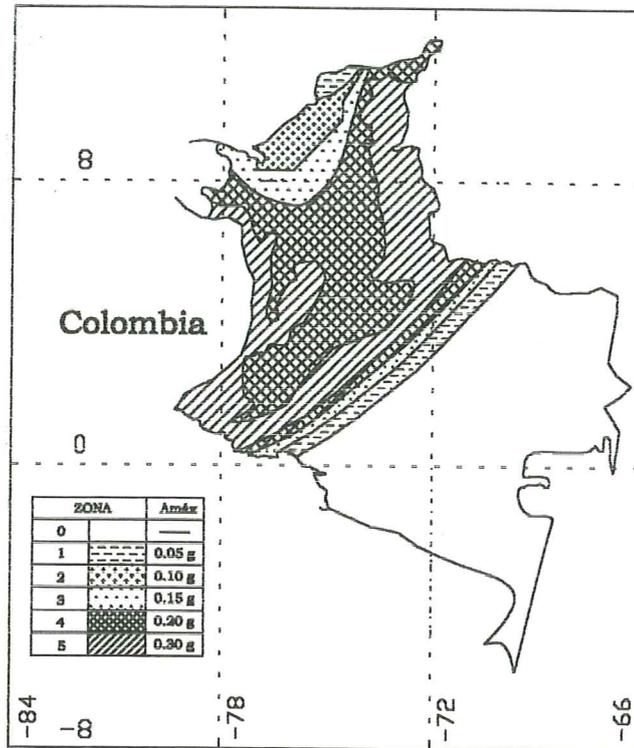
## 1.4 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE COLOMBIA

### 1.4.1 Norma ACIS 100-81

Cuando se habla de Peligrosidad Sísmica de Venezuela, es importante estudiar los trabajos desarrollados por José Grases<sup>(8,9)</sup>, de igual forma cuando este tema es tratado sobre Colombia, se deben conocer las contribuciones realizadas por Alberto Sarria<sup>(10)</sup>.

En efecto, en Colombia Alberto Sarria ha sido autor o coautor de destacados trabajos, uno de ellos fue el que dirigió a José Atuesta<sup>(11)</sup> en la Universidad de los Andes, como proyecto de grado, en 1972. Del resultado de esta investigación Colombia se clasifica en cuatro zonas definidas de cero a tres. Al analizar este trabajo con la Normativa Sismo Resistente NSR-98<sup>(12)</sup>, se observa una buena similitud, la zona cero corresponde a la que en la normativa NSR-98 la denominan “baja” y la zona 3 a la que denominan “alta”.

Antes de la aparición del primer código de construcciones sismorresistentes, en 1984, la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, publicó en 1981 la Norma ACIS 100-81<sup>(13)</sup> la misma que fue utilizada de manera voluntaria por una gran cantidad de profesionales de la ingeniería. En la figura 1.5, se indica la zonificación presentada en la Norma ACIS 100-81, se observa que al País se



**Figura 1.5** Zonificación Sísmica de Colombia, según ACIS 100-81.

lo ha dividido en 6 zonas, en la zona 1, la aceleración máxima en roca es nula y en la zona 6, la aceleración tiene un valor de 0.30 g.

#### 1.4.1 Norma NSR-98

En la Norma Colombiana de Diseño y Construcciones Sismo Resistente NSR-98, se consideran nueve zonas sísmicas, que van desde 0.05 g, para la región de menor sismicidad que es la zona uno, hasta 0.40 g, para la zona nueve, como se aprecia en la figura 1.6.

A nivel de frontera, con el Ecuador en el ACIS 100-81, la aceleración a partir de la longitud 77, hacia la costa era de 0.3 g, en ese tramo en el NSR-98 hay cambios y ahora varía desde 0.25 g. hasta 0.4 g. En la frontera con Venezuela, en el sector en que la aceleración era 0.3 g, con ACIS 100-81, ahora varía entre 0.15 g. y 0.30 g. El sustento teórico del mapa de zonificación sísmica de Colombia, se encuentra en la referencia (2).

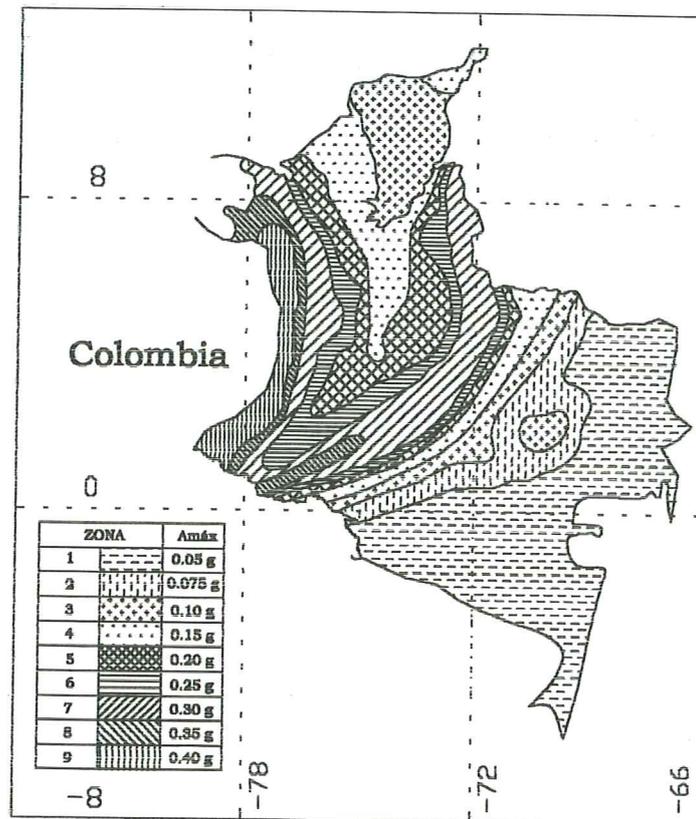


Figura 1.6 Zonificación Sísmica de Colombia, según NSR-98

## 1.5 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL ECUADOR

### 1.5.1 Primer mapa de zonificación

El primer mapa de Zonificación Sísmica del Ecuador, fue elaborado en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, de la Universidad Central de Venezuela, por Roberto Aguiar en 1982<sup>(14)</sup>, bajo la dirección de José Grases. El resultado de la investigación se indica en la figura 1.7, en la que se aprecian cinco zonas sísmicas, la de mayor peligrosidad corresponde a la costa norte que está definida por 0.35 g, y la de menor peligrosidad es la región nororiental con 0.15 g.

En el mapa de zonificación sísmica indicado en la figura 1.7, a más de la aceleración máxima en roca  $A_{max}$ , se indica la aceleración más probable que se espera durante la vida útil de la estructura.

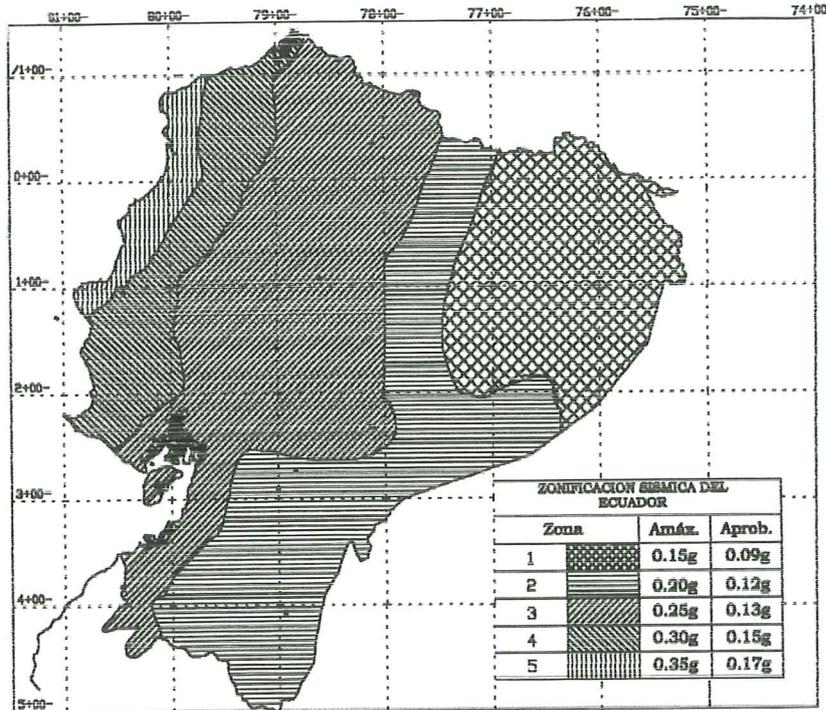


Figura 1.7 Zonificación Sísmica del Ecuador realizada por R. Aguiar en 1982<sup>(14)</sup>.

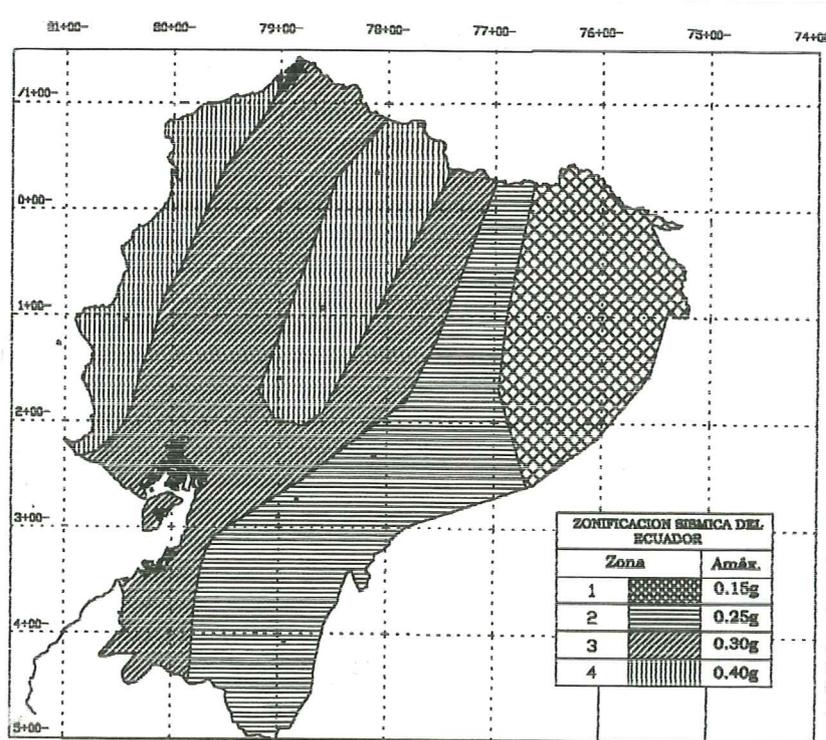


Figura 1.8 Zonificación Sísmica del Ecuador, del futuro Código Ecuatoriano de la Construcción, CEC-2000.

### 1.5.2 Código Ecuatoriano CEC-2000

En la figura 1.8, se presenta la última versión del mapa de Zonificación

Sísmica del Ecuador, del Código Ecuatoriano de la Construcción CEC-2000<sup>(15)</sup>. Se tienen cuatro zonas, que van desde 0.15 g, en la región nororiental a 0.40 g, en la costa norte.

La diferencia que existe entre los dos mapas de zonificación sísmica, del Ecuador, indicados en las figura 1.7 y 1.8, se presenta en el callejón interandino. En efecto, de acuerdo al CEC-2000, la sierra está definida por una peligrosidad sísmica de 0.40 g. En cambio, en el mapa de Aguiar-1982 este valor es de 0.25 g.

La diferencia se debe a que en la evaluación de la peligrosidad sísmica, el CEC-2000 incorporó los sismos históricos. En cambio en el estudio realizado por Aguiar<sup>(14)</sup>, los sismos históricos sirvieron de base únicamente para definir las áreas fuentes, no se consideró en la evaluación porque en las crónicas, algunos eventos importantes están sobredimensionados, como los sismos del 4 de febrero de 1797<sup>(16)</sup> que afectó a la antigua ciudad de Riobamba o el sismo del 22 de febrero de 1757 que afectó a Latacunga y Pujilí<sup>(17)</sup>.

A más de lo indicado, existe una buena correlación entre los dos mapas de zonificación sísmica del Ecuador. En algunos lugares la aceleración máxima del suelo en roca coinciden y en otros el CEC-2000 presenta valores ligeramente mayores en 0.05 g.

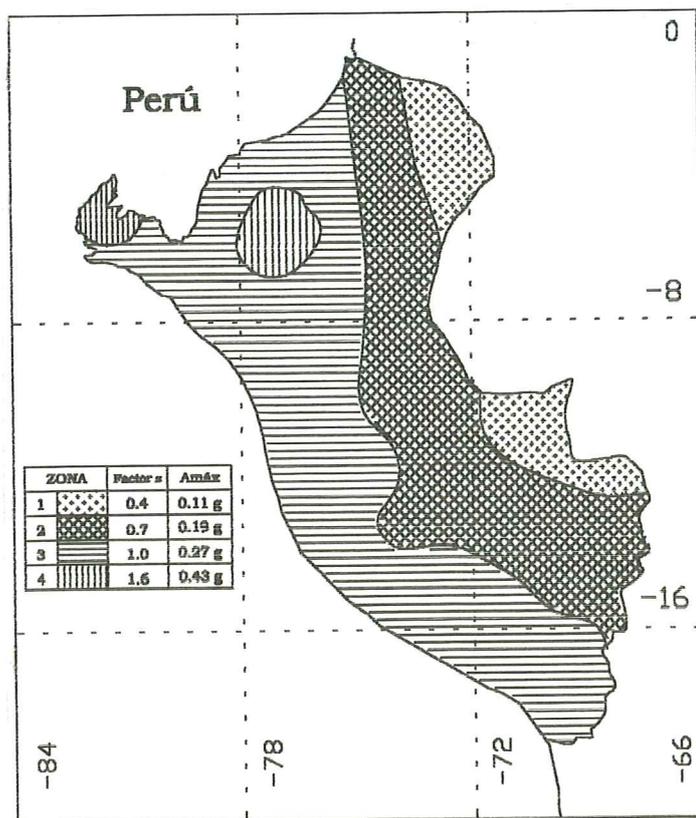
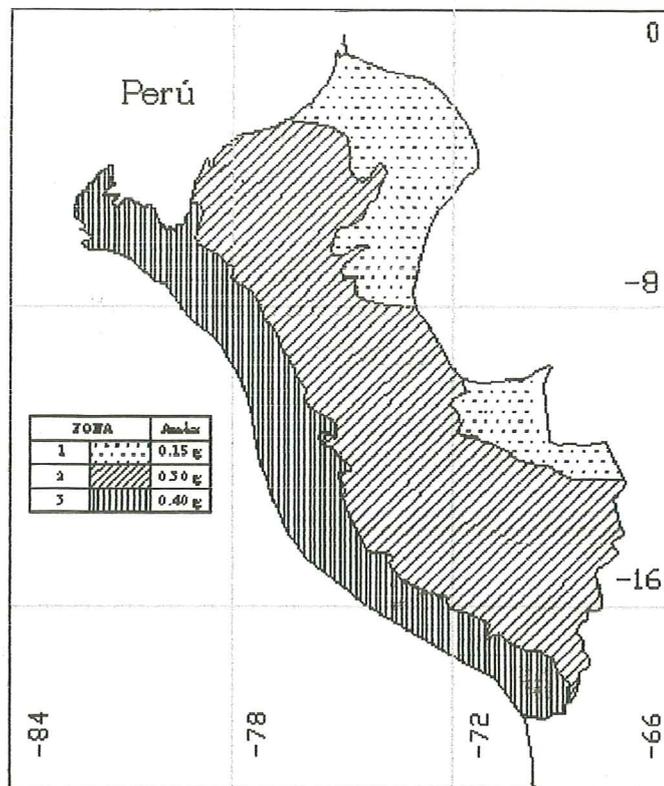


Figura 1.9 Zonificación Sísmica del Perú realizada por Casaverde y Vargas<sup>(9)</sup>.

## 1.6 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL PERÚ

### 1.6.1 Primeros mapas de zonificación

Julio Vargas, ha realizado importantes contribuciones científicas en el campo de la zonificación sísmica del Perú<sup>(18,19)</sup>, uno de esos trabajos es el indicado en la figura 1.9, que corresponde a un trabajo presentado en el “II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo Resistente”, realizado en Lima en 1980<sup>(19)</sup>. En este trabajo, a decir de sus autores, Robin McGuire les orientó en la evaluación de la peligrosidad sísmica.

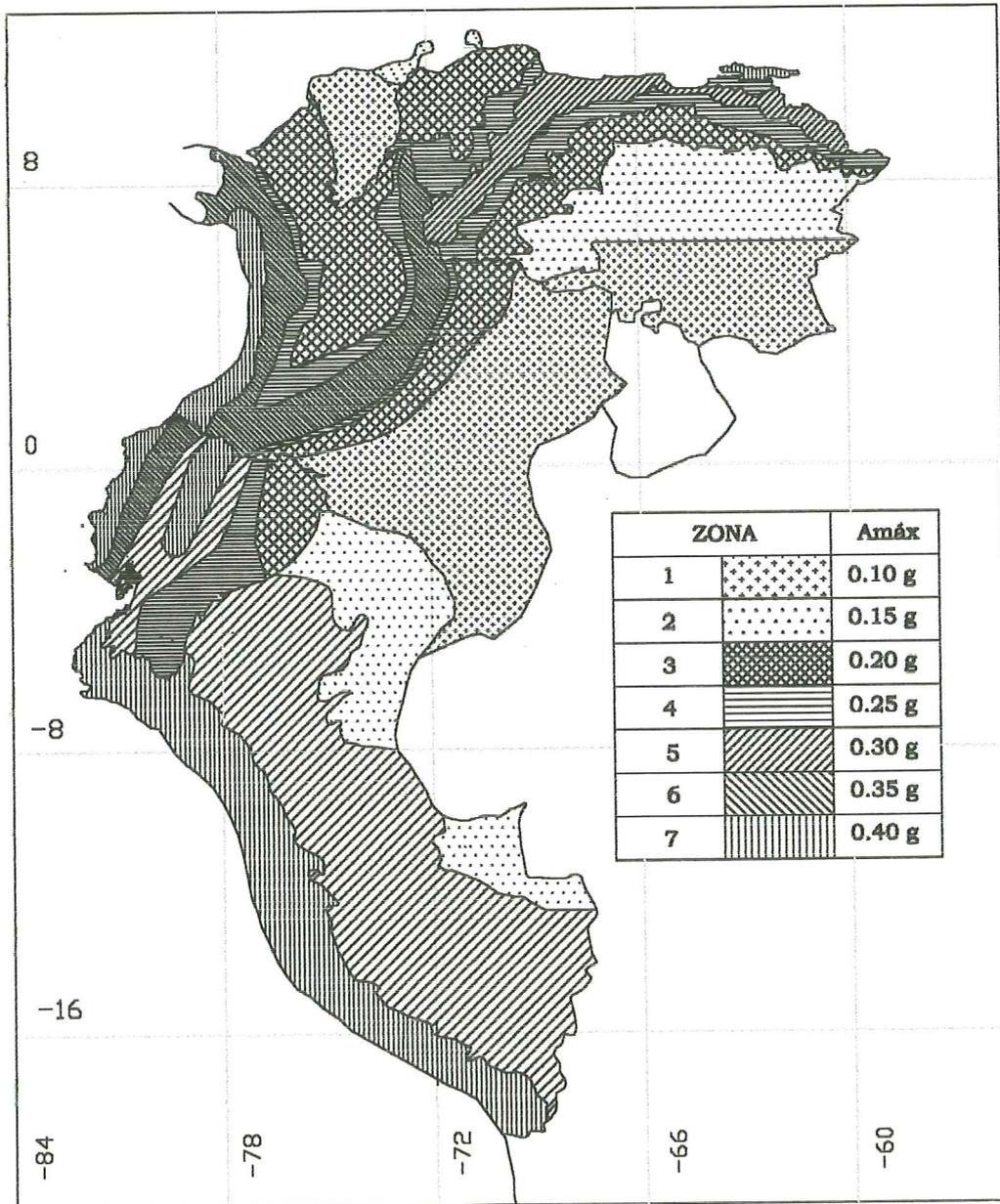


**Figura 1.10** Zonificación Sísmica del Perú, de acuerdo a la Norma Técnica de Edificación NTE.030<sup>(20)</sup>

En la figura 1.9, se observa que se ha zonificado a Perú, en cuatro zonas, con un factor de zona  $Z$ , que varía desde 0.4 para la zona uno, hasta 1.6 para la zona cuatro. Del análisis del trabajo se puede inferir que la zona uno está caracterizada por una aceleración máxima en roca de 0.11 g. y la zona cuatro por 0.43 g. En la figura 1.9, se indican los restantes valores.

### 1.6.2 Norma Técnica NTE.030

En la figura 1.10, se indica la zonificación sísmica de Perú, de acuerdo a la Norma Técnica de Edificación NTE.030, editada en 1997<sup>(20)</sup>. Se aprecia que existen tres zonas; en la zona uno la aceleración máxima del suelo es 0.15 g, en la dos 0.30 g. y en la zona tres, la de mayor peligrosidad sísmica la aceleración es 0.4 g.



**Figura 1.11** Zonificación Sísmica de acuerdo a las normas vigentes en Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú.

### 1.7 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA C.A.F.

En la figura 1.11, se presenta la Zonificación Sísmica de las normas vigentes, al año 2000, en algunos Países de la Corporación Andina de Fomento, C.A.F. Del análisis de esta gráfica se desprende lo siguiente:

- Llama la atención que Perú, siendo un País, con una tectónica muy compleja y una extensión considerable de territorio tenga únicamente tres zonas sísmicas. En contraste, Colombia tiene nueve zonas sísmicas.
- Si bien es cierto a nivel de fronteras no existe una coincidencia de valores, desde un punto de vista riguroso, no es menos cierto que en términos generales la aproximación es bastante buena.

**Tabla 1** Factor de importancia de las normativas COVENIN 1756-98, NSR-98, CEC-2000 y NTE 030

EDIFICACIÓN	VENEZUELA 1998	COLOMBIA 1998	ECUADOR 2000	PERÚ 1997
ESENCIAL	1.3	1.3	1.5	1.5
ESPECIAL	1.15	1.1	1.3	1.3
BÁSICA	1.0	1.0	1.0	1.0

### 1.8 FACTOR DE IMPORTANCIA

En la tabla 1, se indica el factor de importancia o de uso de la edificación, estipuladas en las normativas vigentes en los países de la CAF, analizados. En forma general, la *edificación esencial*, es aquella cuyo funcionamiento es vital luego de un sismo o cuyo colapso puede representar un riesgo adicional. Por otra parte, la *edificación especial*, reúne a una gran cantidad de personas, y finalmente, la *edificación básica*, es de baja ocupación.

En la tabla 1, se observa que el factor de importancia, para los países de la CAF, varían entre 1 y 1.5. Un valor mayor a la unidad implica disminuir la probabilidad de excedencia de los movimientos del suelo. Esta probabilidad está asociada a la aceleración máxima del suelo y a la vida útil de la edificación.

En la tabla 2, se presenta la probabilidad de excedencia, que se ha obtenido siguiendo la metodología aproximada propuesta por Grases<sup>(21)</sup>, para una aceleración máxima del suelo del 40% de la aceleración de la gravedad y

**Tabla 2** Probabilidad de excedencia, para una aceleración  $A_o = 0.4g$ , de acuerdo a las normas sismo-resistentes de la CAF.

EDIFICACIÓN	VIDA ÚTIL AÑOS	VENEZUELA 1998	COLOMBIA 1998	ECUADOR 2000	PERÚ 1997
ESENCIAL	30	1	1	1	1
	50	2	2	1	1
	100	5	5	3	3
ESPECIAL	30	2	3	1	1
	50	4	5	2	2
	100	7	9	5	5
BÁSICA	30	4	4	4	4
	50	10	10	10	10
	100	13	13	13	13

para las vidas útiles de 30, 50 y 100 años. Se aprecia que la probabilidad de excedencia de una edificación esencial es muy baja, de la especial es más alta y de la básica es la mayor.

## 1.8 COMENTARIOS

Se han presentado varias zonificaciones sísmicas de algunos países de la Corporación Andina de Fomento, que fueron publicados por 1980, los mismos que se han comparado con las zonificaciones que se encuentran en las normativas vigentes al año 2000, en los países indicados. Por otra parte, se analizó los valores obtenidos a nivel de frontera. Del estudio realizado se desprenden los siguientes comentarios:

- En Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú, la zona de mayor peligrosidad sísmica, está definida por una aceleración máxima del suelo de  $0.4g$ . (40% de la aceleración de la gravedad).
- Las zonificaciones sísmicas que fueron publicadas en los años ochenta, en los Países de la C.A.F. tienen una buena aproximación con las zonificaciones que están vigentes al año 2000. Lógicamente, en la actualidad se tiene una mayor información lo que ha permitido delimitar con mayor precisión la amenaza sísmica especialmente en Venezuela y Colombia.
- En forma general, las curvas de isoaceleraciones realizadas por CERESIS en 1996, tienen una muy buena correlación con los mapas de zonificación sísmica de las normas vigentes al año 2000, en los países bolivarianos estudiados.
- Las zonificaciones sísmicas de Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú, que constan en las respectivas normativas sismo resistentes, responden al nivel

de información sismológica disponible al año 2000.

- Los mapas de peligrosidad sísmica determinan un solo punto del espectro de diseño, que en el capítulo siguiente se denomina  $A_0$  y es el valor de la aceleración asociada al período de la estructura  $T = 0$ .
- Dependiendo el tipo de estructura (puente, edificio, presa, etc) se define la vida útil para el estudio de peligrosidad sísmica y en base a la importancia de la estructura se define la probabilidad de excedencia. Por ejemplo, si se trata de una estructura provicional la probabilidad de excedencia se puede considerar del orden del 22% o más alto.
- Es importante conocer que durante la vida útil de la estructura, existe la posibilidad aunque muy remota, de que se presente un sismo cuya aceleración máxima sea mayor a la reportada en los estudios de peligrosidad sísmica. Pero de igual forma el proyectista estructural sabe que su estructura cuenta con una reserva de energía sísmica, cuenta además con una sobrerresistencia.
- Para una aceleración máxima del suelo del 40% de la gravedad, un factor de importancia igual a 1.5 es demasiado alto, debido a que la probabilidad de excedencia es muy baja.

## REFERENCIAS

1. M. Gutscher, J. Malavieille, S. Lallemand y J. Callot, "Tectonic segmentation of the North Andean Margin: Impact of the Carnegie Ridge Collision", *Earth and Planetary Science Letters*, France, 1999.
2. L. E. García y tros, "Estudio General de la Amenaza Sísmica de Colombia", *Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Comité AIS 300, Amenaza Sísmica*, 252 pp, Segunda Edición INGEOMINAS, Bogota, 1998.
3. Applied Technology Council, ATC, "Final review draft of recommended comprehensive seismic design provisions for buildings", *Applied Technological Council, Palo Alto, California*, Sponsored by N.S.F.R. Applied to National Needs Program and N.B.S. California, **ATC-3-05**, 1978.
4. CERESIS, "Mapa Probabilístico de peligro sísmico en Sudamérica", Compilado y procesado por J. Castano y M. Millán, 1996.
5. Comisión Venezolana de Normas Industriales COVENIN, "Edificaciones Antisísmicas. Norma Venezolana", *MIMDUR-FUNVISIS-COVENIN Provisional 1756-80 82*, 67 p + Comentarios, Caracas, Venezuela, 1982.
6. R. McGuire, "Fortran computer program for seismic risk analysis", *United States Department of the Interior Geological Survey*, Open-File Report 76-67, 90 pp, 1976.
7. FUNVISIS, "Edificaciones Sismorresistentes", *Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. Norma Covenin 1756-98*, 194 pp, Caracas, Venezuela, 1998.
8. J. Grases, "Fundamentos para la elaboración del nuevo mapa de zonificación sísmica de Venezuela", *FUNVISIS Fundación Venezolana de Ingeniería Sísmica, Serie Técnica 05-84*, 32 p, Caracas, 1985.
9. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, "Diseño Sismorresistente.

- Especificaciones y Criterios empleados en Venezuela”, *Biblioteca de la Academia*, Vol XXXIII, 662 p, Caracas 1997.
10. A. Sarria, C. Bernal y D. Echeverry, “Estudio preliminar del riesgo sísmico en Colombia con base en curvas de isoaceleración”, *Segundo Seminario Colombiano de Geotecnia*, Bogota, 1980.
  11. J. Atuesta, “Evaluación de Riesgos Sísmicos para Colombia”, *Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes*, Bogotá, 1972.
  12. NSR-98, “Normas colombianas de diseño y construcciones sismo resistente”, *Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica*, Tomo 1, Colombia, 1998.
  13. ACIS, “Requisitos Sísmicos para Edificios - Norma AIS 100-81”, *Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica*, 58 p, Bogotá, 1981.
  14. R. Aguiar, “Cuantificación de la amenaza sísmica del Ecuador en términos probabilísticos y mapa de zonificación”, *Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Central de Venezuela*, Caracas, 1982.
  15. Yépez F., “Zonificación Sísmica del Ecuador”, *Código Ecuatoriano de la Construcción CEC-2000. Última versión enviada por Internet en Mayo del 2000*, Quito, Mayo del 2000.
  16. R. Aguiar, “El sismo del 4 de febrero de 1797”, *VI Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural*, 16 pp, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Noviembre de 1991.
  17. R. Aguiar y R. Lozada, “El sismo de Pujilíde 1996 y el CEC-99”, *XIII Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural. Universidad Católica de Quito*, 296-305, Quito, Marzo del 2000.
  18. A. Espinosa, L. Casaverde, J. Michael, J. Alva y J. Vargas, “Earthquake catalog of Peru”, *Instituto Geográfico Nacional*, Madrid, 1985.
  19. L. Casaverde y J. Vargas, “Zonificación sísmica del Perú”, *II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismorresistente*, Lima 1980.
  20. Norma Técnica de Edificación E.030, “Diseño Sismorresistente”, *Reglamento Nacional de Construcciones*, Perú, 1997.
  21. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, “Diseño Sismorresistente. Especificaciones y Criterios empleados en Venezuela”, *Biblioteca de la Academia*, Vol XXXIII, 662 p, Caracas 1997.

## CAPÍTULO 2

### ESPECTROS ELÁSTICOS EN LOS PAÍSES BOLIVARIANOS

Se presentan los espectros elásticos de las normativas sismo resistentes de Venezuela 1998, de Colombia 1998, Ecuador 2000 y Perú 1997. Es importante analizar las variables que están involucradas en la definición de los espectros de las normativas indicados, toda vez que estos constituyen el estado del arte, a principios del siglo XXI, en los países bolivarianos mencionados.

Si bien es cierto, en las cuatro normativas se han definido cuatro perfiles de suelo denominadas S1, S2, S3 y S4, no es menos cierto que las clasificaciones de los suelos, son diferentes. Únicamente para el CEC-2000 y el NTE.030, son las mismas para los tipos de suelo S1, S2 y S3.

Fuente de consulta de las normativas indicadas en lo referente al espectro de diseño elástico, es el UBC-97. Por esta razón se presenta la forma espectral elástica del UBC-97. Todo esto con el objeto de que el lector pueda realizar un análisis crítico de los espectros indicados en las normativas sismo resistentes, de los países bolivarianos anotados.

La velocidad de la Onda de Corte  $V_s$ , es un parámetro fundamental para la determinación del perfil de suelo. Por este motivo, se describe con detalle como determinar la profundidad del sondeo y como encontrar los valores de  $V_s$  y el número de golpes  $N$ , ponderados, de un perfil de suelo, a partir de los datos obtenidos en diferentes estratos.

## 2.1 ESPECTROS DE RESPUESTA

Las acciones sísmicas se determinan, mediante la utilización de espectros sean estos de respuesta o de diseño. El *espectro de respuesta*, se obtiene encontrando la máxima respuesta de un conjunto de osciladores de un grado de libertad y de un mismo amortiguamiento, sometidos a la acción de un sismo determinado. Se pueden encontrar espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad, aceleración, energía, etc. El más utilizado es el espectro de respuesta de aceleración que relaciona la aceleración máxima esperada en el sistema de un grado de libertad con el período de vibración  $T$ .

Se pueden obtener espectros de respuesta elásticos o inelásticos. Para encontrar los *espectros de respuesta elásticos*, la rigidez de los osciladores se mantiene constante, durante todo el tiempo de duración de la acción sísmica. En cambio, para determinar los *espectros inelásticos*, la rigidez de los osciladores varía de acuerdo al grado de daño que experimenta durante el sismo de análisis, el mismo que está definido por un acelerograma.

### 2.1.1 Sistema de un grado de libertad

La ecuación diferencial del movimiento para un sistema de un grado de libertad sometida a una acción sísmica, es:

$$m\ddot{q}(t) + c\dot{q}(t) + kq(t) = -m\ddot{U}_g(t) \quad (2.1)$$

donde  $m$ ,  $c$ ,  $k$  son la masa, amortiguamiento y rigidez del sistema que se considera constante,  $q(t)$ ,  $\dot{q}(t)$ ,  $\ddot{q}(t)$  son el desplazamiento, velocidad y aceleración relativos de la masa con respecto al suelo,  $\ddot{U}_g(t)$  es la aceleración de la excitación sísmica. La ecuación (2.1) es para el análisis sísmico lineal en el cual se ha considerado amortiguamiento viscoso. Por otra parte, se define:

$$W_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.2)$$

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2\sqrt{m k}} \quad (2.3)$$

$$W_n = \frac{2\pi}{T} \quad (2.4)$$

siendo  $W_n$  la frecuencia natural no amortiguada y  $\zeta$  la fracción de amortiguamiento crítico. En función de estas últimas variables, la ecuación (2.1) puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\ddot{q}(t) + 2\zeta W_n \dot{q}(t) + W_n^2 q(t) = -\ddot{U}_g(t) \quad (2.5)$$

En general, existe dos formas de encontrar la solución de la ecuación diferencial de segundo orden indicada en la ecuación (2.5) que son: i) encontrar una solución analítica exacta, y, ii) encontrar una solución aproximada empleando

métodos numéricos. Para la solución analítica se puede trabajar con la integral de Duhamel<sup>(1)</sup>, cuya respuesta, es:

$$q(t) = -\frac{1}{W_a} \int_0^t \ddot{U}_g(\tau) e^{-\zeta W_n(t-\tau)} \text{Sin}[W_a(t-\tau)] d\tau \quad (2.6)$$

$$W_a = W_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.7)$$

La ecuación (2.6) corresponde a la solución particular de la ecuación diferencial (2.5). La solución homogénea no se incluye en la ecuación (2.6) toda vez que la excitación se aplica cuando el sistema está en reposo. En estas condiciones los términos correspondientes a la vibración libre (solución homogénea) son nulos.

La segunda forma de solución, es mediante métodos numéricos. En este contexto uno de los algoritmos más utilizados es el Método de Newmark<sup>(2)</sup>, utilizando el valor de  $\beta = 1/6$  que corresponde a variación lineal de la aceleración.

Al derivar, con respecto al tiempo  $t$  la ecuación (2.6), se obtiene una expresión para calcular la velocidad  $\dot{q}(t)$  y derivando de nuevo se encuentra la aceleración  $\ddot{q}(t)$ .

Los espectros de respuesta en desplazamiento  $S_d$ , velocidad  $S_v$  y aceleración  $S_a$ , se obtienen para un determinado acelerograma, como los máximos valores de la respuesta del sistema.

$$S_d = |q(t)|_{max} \quad (2.8)$$

$$S_v = |\dot{q}(t)|_{max} \quad (2.9)$$

$$S_a = |\ddot{q}(t)|_{max} \quad (2.10)$$

En la figura 2.1 se indica en forma gráfica la construcción de los espectros de respuesta. Es importante hacer las siguientes observaciones de los espectros de respuesta elásticos:

- Para sistemas de período muy pequeño ( $T \rightarrow 0$ ), edificaciones muy rígidas, se observa que:  $S_d \rightarrow 0$ ,  $S_v \rightarrow 0$  y  $S_a \rightarrow \ddot{U}_{gmax}$ . Siendo  $\ddot{U}_{gmax}$  la máxima aceleración del acelerograma.
- Para sistemas de período muy alto ( $T \rightarrow \infty$ ), edificaciones muy flexibles, se observa:  $S_d \rightarrow U_{gmax}$ ,  $S_v \rightarrow \dot{U}_{gmax}$ ,  $S_a \rightarrow 0$ . Siendo  $U_{gmax}$ ,  $\dot{U}_{gmax}$  los valores máximos de desplazamiento y velocidad del acelerograma.
- Los espectros de respuesta suministran la respuesta máxima de cualquier oscilador de un grado de libertad, definido por sus propiedades dinámicas  $T$  y  $\zeta$ .
- Con un acelerograma se pueden encontrar por lo menos tres espectros de respuesta:  $S_d$ ,  $S_v$ , y  $S_a$ .

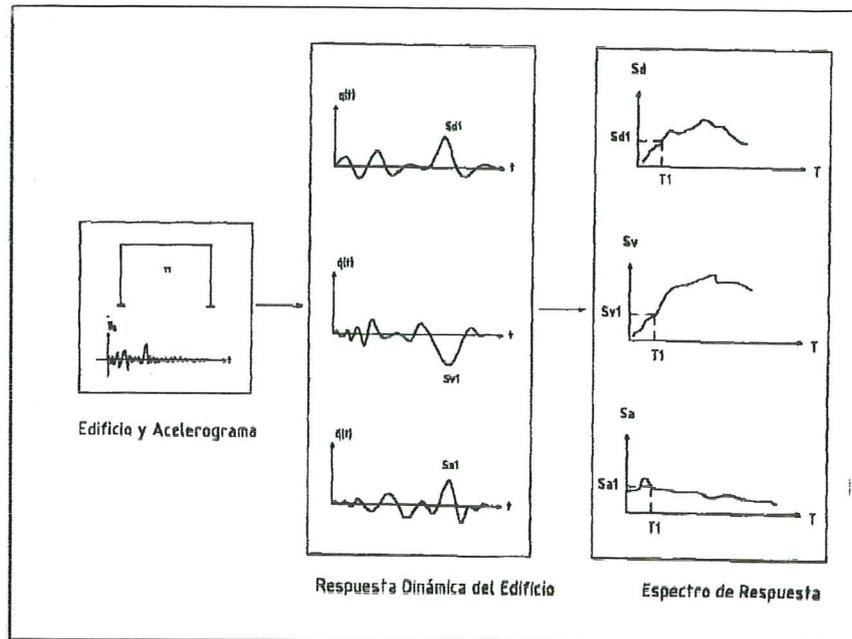


Figura 2.1 Determinación de los espectros de respuesta elásticos.

### 2.1.2 Fracción del amortiguamiento crítico

Como se indicó los espectros de respuesta elásticos se construyen para una determinada fracción de amortiguamiento  $\zeta$ , el mismo que se considera constante en la evaluación de la respuesta dinámica.

El valor de  $\zeta$  depende del tipo de material, estructura y fundamentalmente del nivel de esfuerzos a que está sometida la estructura. Newmark y Hall<sup>(3)</sup>, recomiendan los valores de  $\zeta$ , indicados en la tabla 2.1.

## 2.2 ESPECTROS DE DISEÑO ELÁSTICO

Los espectros de diseño elástico, se los obtiene a partir de un análisis estadístico, de un conjunto de espectros de respuesta elásticos, que han sido obtenidos para sismos registrados en una misma región y cuyos registros han sido previamente clasificados.

Por lo general, los acelerografos son ubicados en cuatro tipos de suelo, a saber: roca, semiduro, blando y muy blando, de esta forma los registros sísmicos se obtienen para los cuatro tipos de suelo. Con los acelerogramas de cada tipo de suelo, se obtienen los espectros de respuesta y posteriormente los espectros de diseño.

El trabajo de Seed et al<sup>(4)</sup> ha servido de base para la formulación espectros que se han incluido en algunas normativas iberoamericanas, lógicamente adaptados al sitio de interés como lo realizó Ugas<sup>(5)</sup> para la norma de Venezuela<sup>(6,7)</sup>.

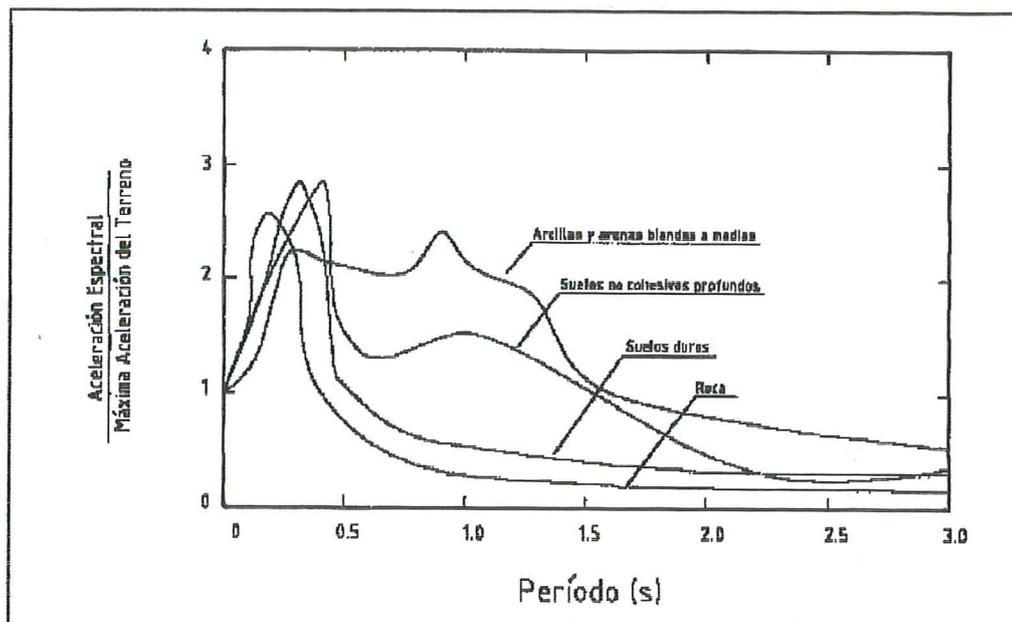
Tabla 2.1 Valores de amortiguamiento  $\zeta$  recomendados por Newmark y Hall<sup>(3)</sup>.

NIVEL DE TENSIONES	TIPO Y CONDICIÓN DE LA ESTRUCTURA	$\zeta$ (EN %)
Tensiones de servicio menores al 50% de los de fluencia	a) Tuberías Vitales	1 a 2
	b) Acero soldado, hormigón pretensado, hormigón muy reforzado con pequeño amortiguamiento	2 a 3
	c) Hormigón armado con fisuramiento considerable	3 a 5
	d) Acero apernado y/o remachado; estructuras de madera con uniones apernadas o clavadas.	5 a 7
Tensiones a nivel de fluencia o cercanos a la fluencia	a) Tuberías Vitales	2 a 3
	b) Acero soldado, hormigón pretensado sin pérdida completa de la pretensión	5 a 7
	c) Hormigón pretensado con pérdida completa del pretensado.	7 a 10
	d) Hormigón Armado	7 a 10
	e) Acero apernado y/o remachado, estructuras de madera con uniones apernadas.	10 a 15
	f) Estructuras de madera, con uniones clavadas	15 a 20

Seed, Ugas y Lysmer<sup>(4)</sup> consideraron 104 registros obtenidos en sitios en los cuales se conoce con cierta exactitud las condiciones del suelo, quienes clasificaron los registros de la siguiente manera: i) registros en roca (28), ii) registros en suelo duro con espesor inferior a 60 m. (31), iii) registros en suelos granulares con profundidad superior a 75 m. (30), y iv) registros para arcillas medias o arenas (15).

Seed et al<sup>(20)</sup>, luego de la clasificación de los registros, construyeron los espectros de respuesta elásticos para un 5% de amortiguamiento y en la figura 2.2 se indican los espectros de aceleración promedios para los cuatro tipos de suelo, indicados. Del análisis de la figura 2.2 se puede indicar:

- La respuesta máxima espectral de los registros en roca se dió para un período de 0.2 s y tiene un factor de amplificación de 2.5.
- En los suelos duros con espesores inferiores a los 60 m, la respuesta máxima se dió para períodos de 0.4 s con un factor de amplificación de 2.8.
- El espectro promedio de suelos no cohesivos profundos tiene dos picos máximos, uno a los 0.45 s de período con un factor de amplificación de 2.7 y otro a los 0.90 s de período con un factor de 1.9.
- Los registros de arcillas blandas a medias, producen un espectro con un factor de amplificación de 2.1, que se dá para un rango de períodos que



**Figura 2.2** Espectros promedios de aceleraciones, normalizados, para un amortiguamiento del 5%, para diferentes condiciones de suelo. Seed et al<sup>(20)</sup>.

varía de 0.3 a 1.0 s.

### 2.3 ESPECTRO DE LA NORMA VENEZOLANA

La forma del espectro elástico, de la Norma Covenin 1756-98, para el análisis sismorresistente de edificaciones<sup>(8)</sup>, se indica en la figura 2.3. Se destaca que el espectro de diseño elástico de la norma venezolana, presenta tres ramas definidas por las siguientes ecuaciones:

$$T < T_0 \quad A_d = \alpha \varphi A_0 \left[ 1 + \frac{T}{T_0} (\beta - 1) \right] \quad (2.11)$$

$$T_0 < T < T^* \quad A_d = \beta \alpha \varphi A_0 \quad (2.12)$$

$$T > T^* \quad A_d = \beta \alpha \varphi A_0 \left( \frac{T^*}{T} \right)^{0.8} \quad (2.13)$$

Donde:

$\alpha$  Coeficiente de uso de la estructura, varía entre 1 y 1.30 El valor de  $\alpha = 1.3$ , corresponde a edificaciones esenciales que deben estar funcionando en condiciones de emergencia, como hospitales, estaciones de bomberos, de policía o cuarteles militares. También se consideran como esenciales, las edificaciones educacionales con más de 200 personas.. Por otra parte,  $\alpha = 1.0$  en edificaciones consideradas básicas como apartamentos, oficinas, hoteles, bancos, etc.

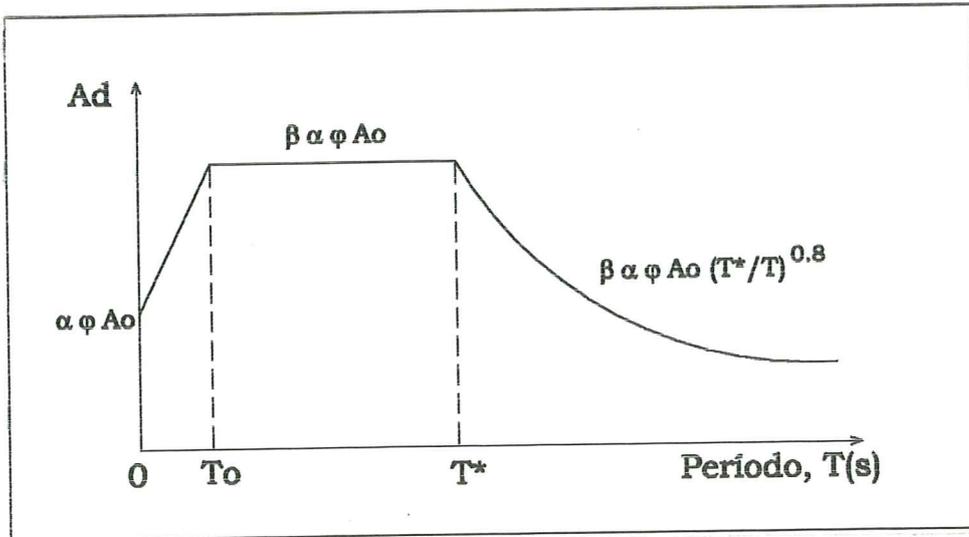


Figura 2.3 Forma del espectro elástico de la norma venezolana de 1998<sup>(8)</sup>.

$A_o$  Aceleración horizontal máxima del terreno expresada como una fracción de  $g$ . Se obtiene en los estudios de peligrosidad sísmica y están representados en los mapas de zonificación sísmica.

$\varphi$  Es el factor de corrección del coeficiente de la aceleración horizontal  $A_o$ , indicado en la tabla 2.2

En la tabla 2.2,  $H$  es la profundidad en la cual se tiene velocidad de la onda de corte,  $V_s$  mayor a 500 m/s.  $H_1$ , es la profundidad desde la superficie hasta el tope del estrato = 0.25  $H$ .  $V_{sp}$ , es la velocidad promedio de la onda de corte en el perfil geotécnico en m/s. Todo esto de acuerdo a la referencia (8).

$\beta$  Factor de magnificación promedio indicados en la tabla 2.3

$T_o, T^*$  Períodos indicados en tabla 2.3

### 2.3.1 Normativa de Venezuela de 1982

Con el objeto de comparar la normativa sismorresistente de 1982<sup>(6)</sup>, con la actual de 1998<sup>(8)</sup>, en lo referente al espectro elástico, a continuación se indican las ecuaciones del espectro de la normativa 1756-82.

$$T < 0.15 \quad A_d = \alpha A_o \left[ 1.0 + \frac{T}{0.15} (\beta - 1) \right] \quad (2.14)$$

$$0.15 < T < T^* \quad A_d = \alpha \beta A_o \quad (2.15)$$

$$T > T^* \quad A_d = \alpha \beta A_o S \left( \frac{T^*}{T} \right)^p \quad (2.16)$$

Los valores de  $\beta$ ,  $T^*$  y  $p$ , están indicados en la tabla 2.4, para tres perfiles de suelo. Por otra parte, el coeficiente de importancia  $\alpha$  varía entre 1 y 1.25 para edificaciones esenciales.

Tabla 2.2 Forma espectral y factor de corrección  $\varphi$  para diferentes tipos de materiales. normativa venezolana 1998<sup>(3)</sup>

MATERIAL	$V_{sp}$ m/s	H m	FORMA ESPECTRAL	$\varphi$
Roca sana/fracturada	> 700	-	S1	0.85
Roca blanda o meteorizada	> 400	$\leq 50$ > 50	S1 S2	0.9 0.95
Suelos muy duros o muy densos	> 400	< 30 30 - 50 > 50	S1 S2 S3	0.90 0.95 1.0
Suelos duros o densos	250 - 400	<15 15 - 50 50 - 70 > 70	S1 S2 S3 S4	0.90 0.95 1.0 1.0
Suelos firmes/ medio densos	170 - 250	$\leq 50$ > 50	S2 S3	1.00 1.00
Suelos blandos/ sueltos	< 170	$\leq 15$ >15	S2 S3	1.00 1.00
Estratos blandos intercalados con suelos rígidos	<170	< $H_1$ > $H_1$	S2 S3	1.00 0.90

Tabla 2.3 Valores de  $\beta$ ,  $T_o$  y  $T^*$  de la norma venezolana de 1998<sup>(8)</sup>

FORMA ESPECTRAL	$\beta$	$T_o$ seg	$T^*$ seg
S1	2.4	0.1	0.4
S2	2.6	0.2	0.8
S3	2.8	0.3	1.2
S4	3.0	0.4	1.6

Tabla 2.4 Valores de  $\beta$ ,  $T^*$  y  $p$  de la Norma de Venezuela de 1982<sup>(6)</sup>.

PERFIL DE SUELO	$\beta$	T* seg	p
S1	2.2	0.4	0.8
S2	2.2	0.6	0.7
S3	2.0	1.0	0.6

### 2.3.2 Comparación entre las normativas de 1982 y 1998 de Venezuela

Las diferencias que existen, en las formas espectrales de las normas de 1982 y 1998, de la República Bolivariana de Venezuela, son las siguientes:

- La norma de 1998, considera una nueva forma espectral denominada S4. La norma de 1982 consideraba tres formas espectrales.
- La norma de 1982, denomina *...perfil de suelo...* S1, S2 y S3, y cada uno de estos perfiles está definido en función de las características del suelo. En forma general estos suelos corresponden a suelos duros (S1), con velocidades de la onda de corte  $V_{sp} > 400 \text{ m/s}$ , intermedios (S2) con valores de  $V_{sp}$  comprendidos entre  $250 \text{ m/s} - 400 \text{ m/s}$  y blandos (S3) con  $V_{sp} < 250 \text{ m/s}$ . En cambio, la norma de 1998 denomina *...forma espectral...* y está definido en la tabla 2.2.

Es importante destacar que ahora la velocidad de la onda de corte no es un parámetro único para determinar la forma espectral, a más de la velocidad de la onda de corte, se considera la profundidad en la que se tiene un material duro con velocidad de la onda de corte,  $V_s > 500 \text{ m/s}$ . Esto es debido a la *sobre amplificación de la amplificación máxima del suelo en valles profundos*, por este motivo a un suelo con velocidad de la onda de corte comprendida entre 250 y 400 m/s, que de acuerdo a la norma de 1982 era S2, ahora en la norma de 1998 puede ser S4 si el suelo duro está a más de 70 m. Por otra parte, si el basamento de suelo duro se encuentra a menos de 15 m. puede ser suelo S1.

- Otra diferencia que existe entre las dos normativas de 1982 y 1998 es el factor de corrección  $\varphi$ , el cual modifica la aceleración  $A_o$ , *en suelos en los cuales hay menos probabilidad de amplificación de las ondas sísmicas*. Por lo tanto, en perfiles de suelo S1, de acuerdo a la tabla 2.2, el valor de  $A_o$  puede disminuir hasta un 15%. En perfiles S2 esta disminución llega hasta el 10% pero no en todos los perfiles de suelo S2.
- Los factores de magnificación promedio  $\beta$ , de la norma de 1998 son más altos que los especificados en la norma de 1982. En realidad los del la norma de 1982 eran bajos. Ahora las nuevas formas espectrales presentan ordenadas más altas con relación a la norma de 1982 y esta diferencia es

considerable en los perfiles de suelo S3 y S4.

Por otra parte, en la normativa de 1982, la forma del espectro elástico era para un coeficiente de amortiguamiento  $\zeta = 0.05$ , lo cual limita su uso a cierto tipo de estructuras y a un rango de comportamiento inelástico de la estructura. En la norma de 1998, es factible trabajar con diferentes valores de  $\zeta$  y esto se lo incorpora en el factor  $\beta$  con la ecuación (2.17)

$$\beta(\zeta) = \frac{\beta(5\%)}{2.3}(0.0853 - 0.739Ln\zeta) \quad (2.17)$$

Donde,  $\beta(5\%)$  es el factor de magnificación promedio indicado en la tabla 2.3.

- En la normativa de 1982, la rama descendente del espectro está definida en función de  $p$  la misma que depende del perfil de suelo y varía entre 0.6 para S3 y 0.8 para S1, como se observa en la tabla 2.4. En la norma de 1998, este valor es constante y vale 0.8. En consecuencia, la rama descendente de la norma de 1998, tiene mayores valores.
- El coeficiente de importancia  $\alpha$ , en la norma de 1982, tenía un valor máximo de 1.25, en cambio en la norma de 1998, el valor sube a 1.3. Con este cambio, se disminuye la probabilidad de excedencia  $p$ , de la aceleración máxima del suelo en roca  $A_o$ , y se aumenta el período de retorno  $T$ .

Grases<sup>(8,9)</sup> presenta una relación aproximada para zonas de alta peligrosidad sísmica, entre la aceleración máxima del suelo en roca  $A$ , la vida útil  $t$  en años y la probabilidad de excedencia  $p$ , definida en la ecuación (2.18).

$$A = 70 \left[ \frac{-Ln(1-p)}{t} \right]^{-0.260} \quad (2.18)$$

Por otra parte,  $A_o$  es la aceleración máxima del suelo en roca para  $\alpha = 1$ , para un valor cualquiera de  $\alpha$ , la aceleración máxima del suelo es  $\alpha A_o$ . Por lo tanto, se tiene:

$$A = \alpha A_o \quad (2.19)$$

El período de retorno  $T_r$  puede obtenerse en forma aproximada con la ecuación (2.20)

$$T_r \sim \frac{1}{1 - (1-p)^{\frac{1}{t}}} \quad (2.20)$$

### 2.4 ESPECTRO DE LA NORMA COLOMBIANA NSR-98

La nueva forma del espectro de diseño elástico de Colombia<sup>(10)</sup>, se indica en la figura 2.4 y está definido para un coeficiente de amortiguamiento igual al 5% del crítico. Las ecuaciones que definen el espectro, son:

$$T < T_0 \quad A_d = \alpha A_0(1.0 + 5.0T) \quad (2.21)$$

$$T_0 < T < T^* \quad A_d = 2.5\alpha A_0 \quad (2.22)$$

$$T^* < T < T^+ \quad A_d = \frac{1.2\alpha A_0 S}{T} \quad (2.23)$$

$$T > T^+ \quad A_d = \frac{\alpha A_0}{2} \quad (2.24)$$

El coeficiente de sitio S o factor de amplificación por efecto de suelo, se indica en la tabla 2.5

Tabla 2.5 Valores del coeficiente de sitio S.

PERFIL DE SUELO	S
S1 (Duro)	1.0
S2 (Semiduro)	1.2
S3 (Blando)	1.5
S4 (Muy blando)	2.0

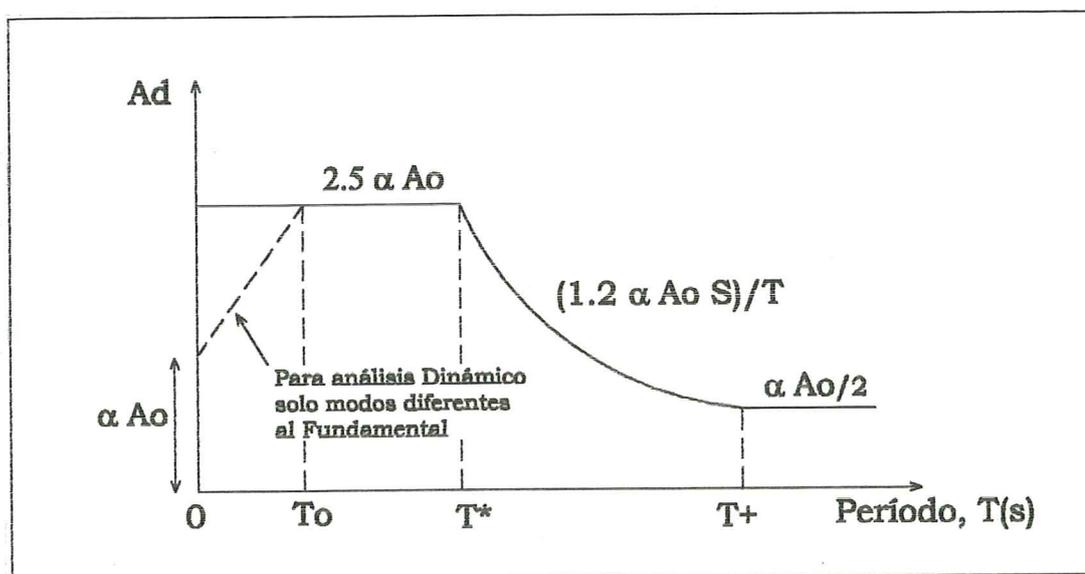


Figura 2.4 Espectro elástico de diseño de la normativa colombiana NSR-98<sup>(10)</sup>. Para un coeficiente de amortiguamiento del 5%.

Los valores de  $T^*$ , y  $T^+$  vienen definidos por:

$$T^* = 0.52S \quad T^+ = 2.4S \quad (2.25)$$

El coeficiente de importancia varía entre 1.0 y 1.3 de acuerdo al uso de la estructura, los valores del coeficiente de importancia  $\alpha$  se indican en la tabla 2.6

Tabla 2.6 Valores del coeficiente de importancia  $\alpha$ . Normativa NSR-98.

EDIFICACIONES	$\alpha$
IV (Indispensables)	1.3
III (Atención comunidad)	1.2
II (Ocupación especial)	1.1
I (Ocupación normal)	1.0

#### 2.4.1 Perfiles de suelo de la Norma Colombiana

Los perfiles de suelo de la Norma Sismo Resistente de Colombia NSR-98, son los siguientes:

- S1** Roca, cuya velocidad de la onda de corte es mayor o igual a 750 m/s. También es un perfil de suelo S1, si entre la roca y la superficie existen suelos duros o densos compuestos por depósitos de arenas, gravas o arcillas duras con  $V_s > 400\text{m/s}$ , con un espesor menor a 60 m., como lo ilustra la figura 2.5
- S2** En la figura 2.6, se indican las características de los suelos duros o densos de la norma NSR-98. Nótese a la izquierda que arcillas duras o suelos no cohesivos que tengan velocidad de la onda de corte mayor o igual a 400 m/s, son tipo S2, siempre que el estrato tenga una altura mayor a 60 m. Por otra parte, en la figura 2.6 a la derecha, se observa depósitos de consistencia media con velocidades  $V_s$  entre 270 y 400 m/s que son tipo S2.
- S3** Textualmente, la norma NSR-98 indica que se trata de un perfil, donde entre la roca y la superficie hay más de 20 m. de suelos que contienen depósitos de arcilla de dureza media y blanda con  $V_s$  entre 150 y 270 m/s y que dentro de ellos hay arcillas blandas pero en un espesor menor a 12 m. como lo ilustra la figura 2.7
- S4** Entre la roca y la superficie libre hay arcillas blandas con velocidad a la onda de corte menor a 150 m/s, pero el estrato de suelo tiene una altura de más de 12 m. como se aprecia en la figura 2.8.

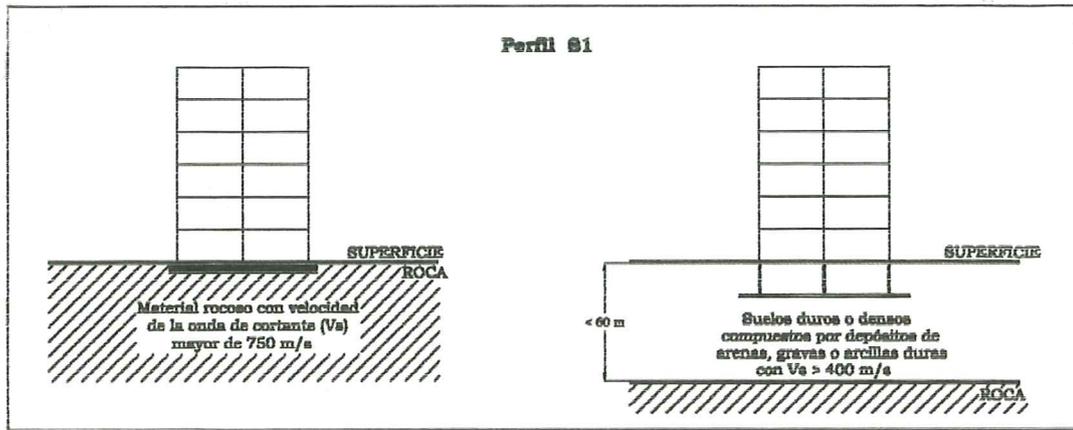


Figura 2.5 Perfil de suelo S1 de la normativa colombiana NSR-98<sup>(10)</sup>.

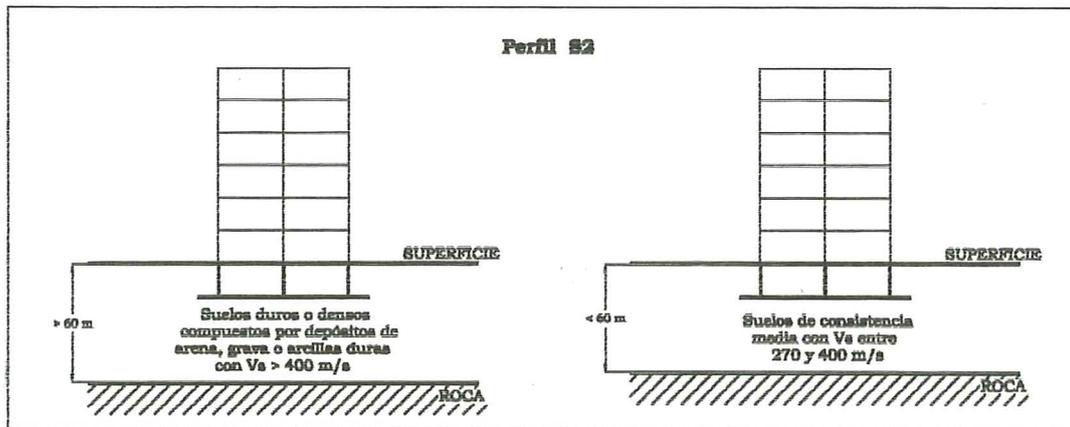


Figura 2.6 Perfil de suelo S2 de la normativa colombiana NSR-98<sup>(10)</sup>.

## 2.5 ESPECTRO DEL CÓDIGO ECUATORIANO

En la figura 2.9, se indica la forma del espectro elástico del Código Ecuatoriano de la Construcción CEC-2000<sup>(11)</sup>. Basicamente está compuesto por cuatro ecuaciones, la de la izquierda hasta  $T_0$ , corresponde a la zona ascendente, la segunda es la zona de aceleración constante que va hasta  $T^*$ , la tercera, la rama descendente que decae de la forma  $S^s$  y la cuarta, la rama de aceleración constante a partir de  $T^+$

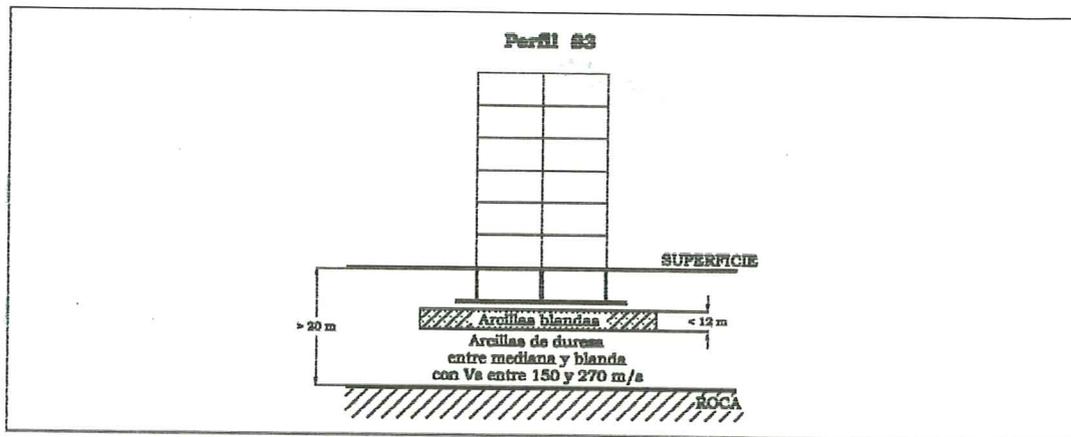


Figura 2.7 Perfil de suelo S3 de la normativa colombiana NSR-98<sup>(10)</sup>.

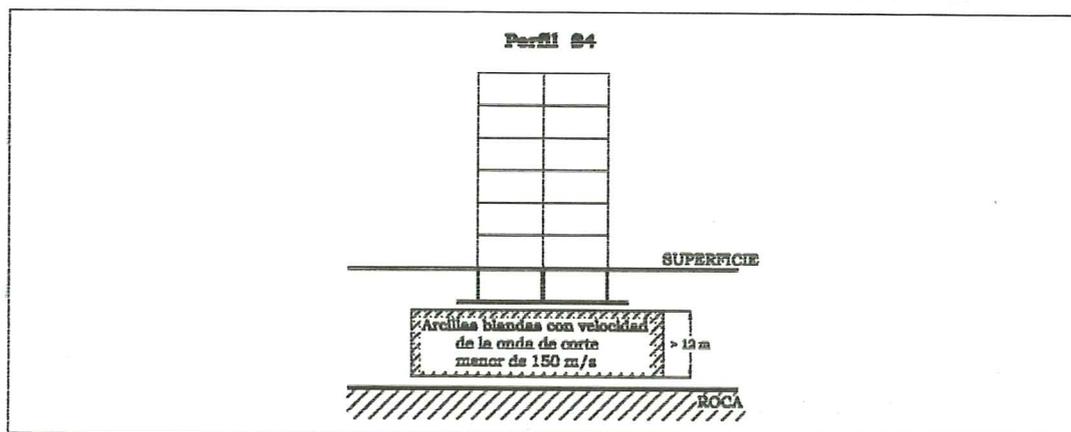


Figura 2.8 Perfil de suelo S4 de la normativa colombiana NSR-98<sup>(10)</sup>.

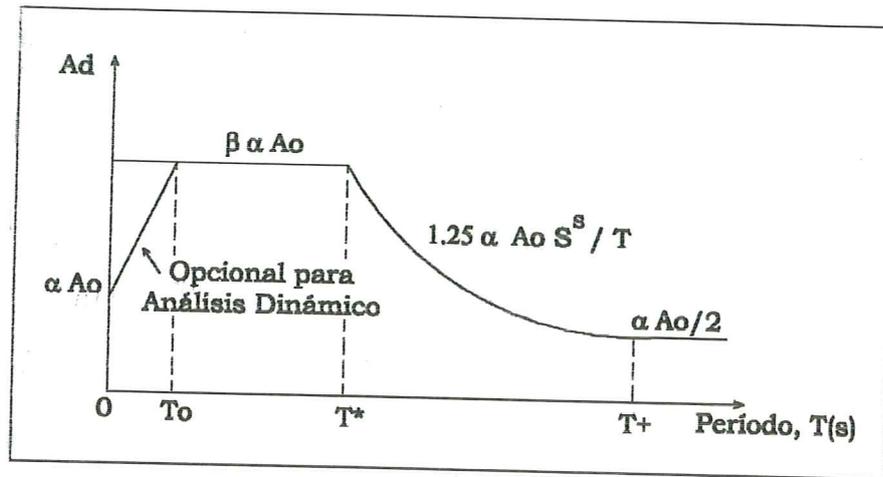
$$T < T_o \quad A_d = \alpha A_o \left[ 1.0 + \frac{T}{T_o} (\beta - 1) \right] \quad (2.26)$$

$$T_o < T < T^* \quad A_d = \beta \alpha A_o \quad (2.27)$$

$$T^* < T < T^+ \quad A_d = \frac{1.25 \alpha A_o S^s}{T} \quad (2.28)$$

$$T > T^+ \quad A_d = \frac{\alpha A_o}{2} \quad (2.29)$$

Los valores de  $\beta$ ,  $S$ ,  $T_o$ ,  $T^*$  y  $T^+$ , se encuentran en la tabla 2.7, de acuerdo al perfil del suelo. El coeficiente de importancia  $\alpha$  se indica en la tabla 2.8



**Figura 2.9** Espectro de diseño elástico del código ecuatoriano de la construcción CEC-2000.

**Tabla 2.7** Parámetros que definen el espectro de diseño elástico, del código ecuatoriano de la construcción CEC-2000.

PERFIL DE SUELO	S	$\beta$	$T_o$ seg	$T^*$ seg	$T^+$ seg
S1	1.0	2.5	0.10	0.50	2.50
S2	1.2	3.0	0.10	0.52	3.11
S3	1.5	2.8	0.16	0.82	4.59
S4	2.0	2.5	0.40	2.00	10.00

### 2.5.1 Clasificación de suelos

En forma general el perfil de suelo tipo S1, corresponde a roca o suelo firme, el tipo S2, a un suelo de dureza intermedia, el tipo S3, a un suelo blando y el tipo S4, a un suelo muy blando. Esto con relación a las normativas de Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú, que se indican en el presente capítulo. Sin embargo, en cada normativa se define en forma específica el perfil del tipo de suelo, en base a las características locales de sus suelos. En el CEC-2000, los perfiles de suelo se clasifican de la siguiente forma:

**S1** Suelos con velocidad de la onda de corte mayor a 750 m/s, con período fundamental de vibración menor a 0.20 s. Además el CEC-2000<sup>(11)</sup> incluye los siguientes suelos:

- Roca sana o parcialmente alterada, con resistencia a la compresión no confinada mayor o igual a 500 KPa = 5 Kg/cm<sup>2</sup>.

**Tabla 2.8** Coeficiente de importancia  $\alpha$  del código ecuatoriano de la construcción, CEC-2000<sup>(44)</sup>.

CATEGORÍA	TIPO DE USO, DESTINO E IMPORTANCIA	$\alpha$
ESENCIAL Y/O PELIGROSAS	Hospitales, clínicas, centros de salud. Estaciones Militares, de Policía, Bomberos. Defensa Civil. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, ...	1.5
OCUPACIÓN ESPECIAL	Escuelas y centros de educación que albergan más de 300 personas. Todas las estructuras con más de 5000 personas. Edificios públicos que operan continuamente.	1.3
OTRAS	Todas las estructuras de edificación y otras que no estén indicadas en las anteriores	1.0

- Gravas arenosas, limosas o arcillosas densas y secas.
- Suelos cohesivos duros con resistencia al corte en condiciones no drenadas mayores a 100 KPa, con espesores menores a 20 m. y que se encuentra sobre roca u otro material cuyo  $V_s$  es mayor a 750 m/s.
- Arenas densas con número de golpes del SPT:  $N > 50$ , con espesores menores a 20 m. y que se encuentren sobre roca u otro material cuyo  $V_s$  es mayor a 750 m/s.
- Suelos y depósitos de origen volcánico firmemente cementados, tobas y conglomerados con número de golpes del SPT:  $N > 50$ .

**S2** Suelos con características intermedias entre los suelos tipo S1 y S3.

**S3** En las tablas 2.9 y 2.10, se indican las características de los suelos blandos o estratos de gran espesor que son considerados tipo S3, del CEC-2000<sup>(12)</sup>. El período fundamental de vibración de estos suelos es mayor a 0.6 s.

**Tabla 2.9** Suelos Cohesivos blandos o estratos profundos, tipo S3 del código ecuatoriano de la construcción CEC-2000<sup>(11)</sup>

SUELOS COHESIVOS	$V_s$ m/s	RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA $S_u$	ESPESOR DEL ESTRATO
Blandos	< 200	< 25 KPa	> 20m.
Semiblandos	200 - 400	25 KPa - 50 KPa	> 25m.
Duros	400 - 750	50 KPa - 100 KPa	> 40m.
Muy Duros	> 750	100 KPa - 200 KPa	> 60m.

Tabla 2.10 Suelos Granulares sueltos, semidensos y densos, tipo S3 del código ecuatoriano de la construcción CEC-2000<sup>(11)</sup>

SUELOS GRANULARES	$V_s$ m/s	VALORES N DEL SPT	ESPESOR DEL ESTRATO
Sueltos	< 200	4 - 10	> 40m.
Semidensos	200 - 750	10 - 30	> 45m.
Densos	> 750	> 30	> 100m.

- El CEC-2000, establece que en los sitios donde las propiedades del suelo son poco conocidas, se podrá considerar que el perfil del suelo es S3.
- S4 Son suelos con condiciones especiales. En este grupo se incluyen los siguientes tipos de suelo:
- Suelos con alto potencial de licuación, colapsibles y sensitivos.
  - Turbas, lodos y suelos orgánicos.
  - Rellenos colocados sin control ingenieril.
  - Arcillas y limos de alta plasticidad ( $IP > 75$ ).
  - Arcillas suaves y medio duras con espesor mayor a 30 m.

Los perfiles de este grupo incluyen los suelos particulares altamente compresibles y donde las condiciones geológicas y/o topográficas sean especialmente desfavorables y que requieren estudios geotécnicos no rutinarios para determinar sus características mecánicas.

## 2.6 ESPECTRO DE LA NORMA DEL PERÚ

En la figura 2.10, se indica la forma del espectro de diseño elástico de la Norma Técnica del Perú E.030 de 1997<sup>(13)</sup>. Se destaca que está conformada por dos ramas que son: la meseta horizontal y la rama descendente. Las ecuaciones que definen la aceleración espectral  $A_d$ , se indican a continuación.

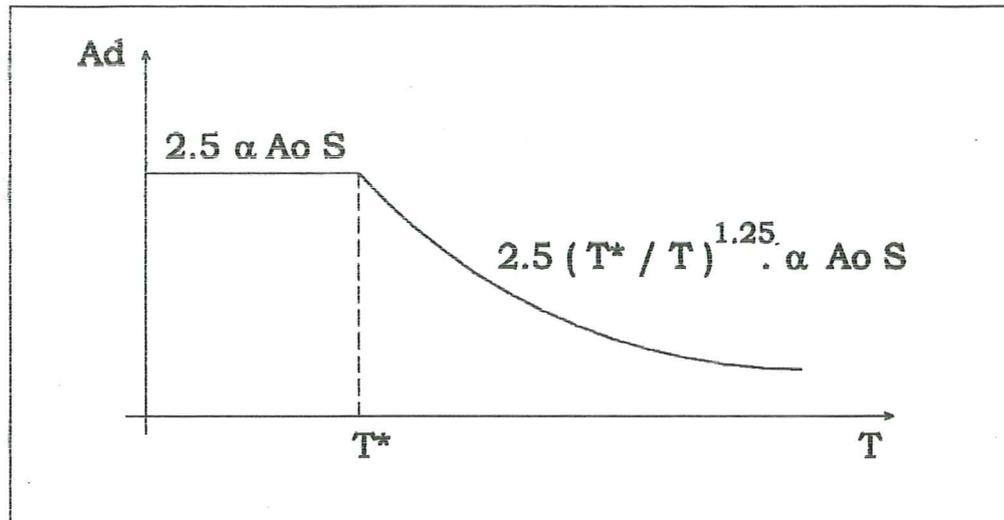
$$T < T^* \quad A_d = 2.5\alpha A_o S \quad (2.30)$$

$$T > T^* \quad A_d = 2.5\alpha A_o S \left(\frac{T^*}{T}\right)^{1.25} \quad (2.31)$$

Los valores de  $S$  y  $T^*$  se indican en la tabla 2.11. Por otra parte el coeficiente de importancia  $\alpha$  varía entre 1 y 1.5 de manera similar al código ecuatoriano de la construcción CEC-2000

Para los suelos tipo S4, los valores de  $T^*$  y  $S$  serán establecidos por el especialista pero en ningún caso serán menores que los especificados para el perfil tipo S3.

La clasificación de los suelos de la norma técnica del Perú de 1997, corresponde a la clasificación del código ecuatoriano de la construcción CEC-2000, con ligeros cambios.



**Figura 2.10** Espectro de Diseño Elástico de la Norma Técnica de Edificación del Perú, E 0.30 de 1997.

**Tabla 2.11** Valores de  $T^*$  y  $S$ , de la norma técnica de edificación del Perú NTE.030 de 1997

TIPO SUELO	DESCRIPCIÓN	$T^*$ seg	$S$
S1	Roca o suelos muy rígidos	0.4	1.0
S2	Suelos Intermedios	0.6	1.2
S3	Suelos flexibles o estratos de gran espesor	0.9	1.4
S4	Condiciones Especiales	*	*

## 2.7 ESPECTRO DE DISEÑO ELÁSTICO DEL UBC-97

Ha sido fuente de consulta para la elaboración del espectro de diseño elástico de la norma colombiana NSR-98, el código ecuatoriano CEC-200 y la norma técnica del Perú de 1997, el Código UBC-97<sup>(14)</sup>. Por esta razón en la figura 2.11, se indica la forma espectral elástica del UBC-97.

Es importante destacar que el UBC-97 denomina *Factor de Zona Z* al coeficiente de la aceleración máxima del suelo en roca  $A_0$ , que se obtiene de los mapas de zonificación sísmica. Por otra parte, con el objeto de mantener la misma nomenclatura de este capítulo, el significado de algunas variables del UBC-97 han sido cambiadas, es así como ahora  $\alpha$  es el coeficiente de importancia.

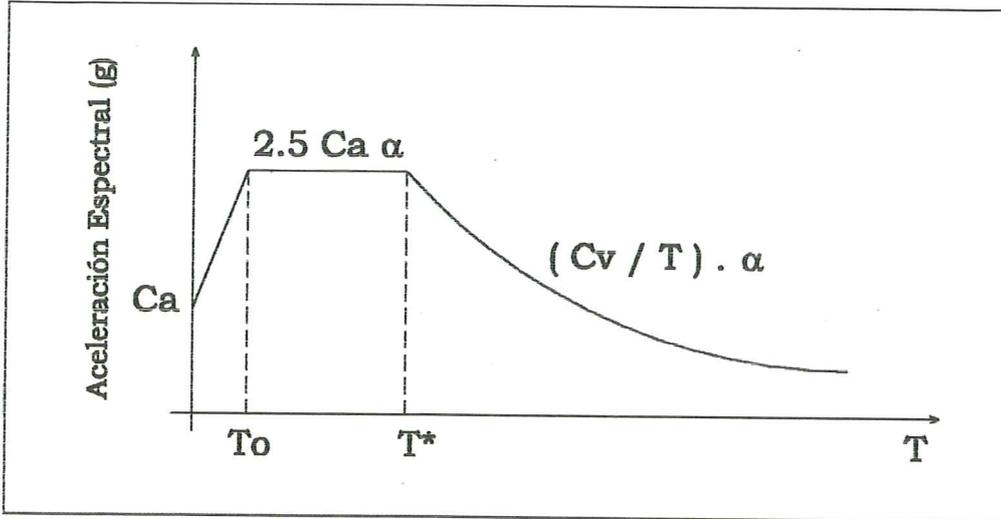


Figura 2.11 Espectro de Diseño Elástico del Código UBC-97.

$$T < T_o \quad A_d = \alpha C_a \left[ 1.0 + 1.5 \frac{T}{T_o} \right] g \quad (2.32)$$

$$T_o < T < T^* \quad A_d = \alpha 2.5 C_a g \quad (2.33)$$

$$T > T^* \quad A_d = \alpha \frac{C_v}{T} g \quad (2.34)$$

$$T_o = 0.2 T^* \quad T^* = \frac{C_v}{2.5 C_a} \quad (2.35)$$

Los valores de los factores sísmicos  $C_a$  y  $C_v$ , están en función del perfil de suelo y del factor de zona sísmica  $Z$ , y se indican en las tablas 2.12 y 2.13.

Para un perfil de suelo tipo  $S_f$ , deben realizarse estudios específicos para determinar los valores  $C_a$  y  $C_v$ .

Tabla 2.12 Factor  $C_a$ , para algunos factores de Zona sísmica  $Z$ , del UBC-97

PERFIL DE SUELO	Z=0.075	Z=0.15	Z=0.20	Z=0.30	Z=0.40
$S_a$	0.06	0.12	0.16	0.24	0.32
$S_b$	0.08	0.15	0.20	0.30	0.40
$S_c$	0.09	0.18	0.24	0.33	0.40
$S_d$	0.12	0.22	0.28	0.36	0.44
$S_e$	0.19	0.30	0.34	0.36	0.36
$S_f$					

Tabla 2.13 Factor  $C_v$ , para algunos factores de Zona sísmica  $Z$ , del UBC-97

PERFIL DE SUELO	Z=0.075	Z=0.15	Z=0.20	Z=0.30	Z=0.40
$S_a$	0.06	0.12	0.16	0.24	0.32
$S_b$	0.08	0.15	0.20	0.30	0.40
$S_c$	0.13	0.25	0.32	0.45	0.56
$S_d$	0.18	0.32	0.40	0.54	0.64
$S_e$	0.26	0.50	0.64	0.84	0.96
$S_f$					

Argudo<sup>(15)</sup>, realiza una observaciones a la forma del espectro elástico del UBC-97, en relación a lo estipulado en algunas normativas, la misma que se indica a continuación:

- Para  $T = 0$ , la aceleración espectral de diseño del UBC-97, es igual a  $C_a$ , que representa la aceleración máxima de la superficie del terreno y únicamente para el caso de un perfil de suelo  $S_b$  equivale a la aceleración máxima del suelo en roca  $A_o$ .

### 2.7.1 Perfiles de suelo del UBC-97

En la tabla 2.14, se indican la clasificación de los suelos del UBC-97. Para el suelo tipo  $S_f$  se requiere una evaluación específica del sitio y pueden ser uno de los siguientes suelos:

- Suelos vulnerables a potenciales fallas o colapso durante cargas sísmicas, tales como suelos licuables, arcillas altamente sensitivas, conglomerados débiles.
- Turbas y/o arcillas altamente orgánicas ( $H > 3.05m$ . de turba y/o arcilla altamente orgánica. Siendo  $H$  el espesor del suelo).
- Arcillas de muy alta plasticidad ( $H > 7.62m$ . con  $IP > 75$ ).
- Arcillas blandas o medianamente duras de mucho espesor ( $H > 36.58m$ .)

## 2.8 EQUIVALENCIA ENTRE LOS PERFILES DE SUELO

Para analizar las formas espectrales de las normativas de los países bolivarianos, cuyos espectros se han indicado. Es necesario diferenciar en las definiciones de los distintos tipos de suelo. Por este motivo, en la tabla 2.15, se presenta una equivalencia de los perfiles de suelo de la Norma COVENIN 1756-98 de Venezuela, NSR-98 de Colombia, CEC-2000 de Ecuador y la norma técnica NTE.030 de Perú, los mismos que se comparan con relación al UBC-97.

Tabla 2.14 Tipos de Suelos de acuerdo al UBC-97

TIPO DE SUELO	$V_s$ m/s	VALORES N DEL SPT	RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA $S_u$
$S_a$ Roca dura $S_b$ Roca $S_c$ Muy densa o Roca suave $S_d$ Firme $S_e$ Blando $S_f$ Especial	$> 1500$ $760 < V_s < 1500$ $360 < V_s < 760$ $180 < V_s < 360$ $< 180$	$> 50$ $15 < N < 50$ $< 15$	$> 100KPa$ $50KPa < S_u < 100KPa$ $< 50KPa$

Tabla 2.15 Equivalencia de los perfiles de suelo de las normativas de países Bolivarianos con el UBC-97

NOMBRE DE UBC-97	UBC-97	VENEZUELA 1998	COLOMBIA 1998	ECUADOR 2000	PERÚ 1997
Roca dura	$S_a$	S1	S1	S1	S1
Roca	$S_b$	S1	S1	S1	S1
Roca suave o muy denso	$S_c$	S1-S2	S1-S2	S1	S1
Suelo firme	$S_d$	S1-S2-S3-S4	S2-S3	S2-S3	S2-S3
Suelo blando	$S_e$	S2-S3	S3-S4	S3	S3
Suelo especial	$S_f$			S4	S4

## 2.9 COMPARACIÓN DE LAS FORMAS ESPECTRALES DE LOS PAÍSES DE LA C.A.F.

En la tabla 2.16, se han indicado los períodos  $T_o$ ,  $T^*$  y  $T^+$ . Además del valor  $\beta$ , con el objeto de que el lector analice dichos valores, con las correspondientes ecuaciones que han sido descritas en los apartados anteriores para las normativas COVENIN 1756-98 de Venezuela, NSR-98 de Colombia, CEC-2000, de Ecuador y E.030 de Perú.

- ♣ Encontrar la aceleración espectral elástica, que se obtiene al aplicar las normas: COVENIN 1756-98 de Venezuela, NSR-98 de Colombia, CEC-2000 de Ecuador, E.030 de Perú; para un edificio de vivienda de hormigón armado que tiene un período fundamental de 1.0 s y está situado en un suelo S3, en una zona cuya peligrosidad sísmica viene definida por  $A_o = 0.25g$ .

- Datos

$$\alpha = 1.0$$

$$A_o = 0.25g$$

Tabla 2.16 Valores de  $T_o$ ,  $T^*$ ,  $T^+$  y  $\beta$ , de las Normativas de los países Bolivarianos

PERFIL DE SUELO	PAÍS	$T_o$ seg	$T^*$ seg	$T^+$ seg	$\beta$
S1	VENEZUELA-98	0.1	0.40	–	2.4
	COLOMBIA-98	0.3	0.52	2.40	2.5
	ECUADOR-2000	0.1	0.50	2.50	2.5
	PERÚ-97	–	0.40	–	2.5
S2	VENEZUELA-98	0.2	0.80	–	2.6
	COLOMBIA-98	0.3	0.62	2.88	2.5
	ECUADOR-2000	0.1	0.52	3.11	3.0
	PERÚ-97	–	0.6	–	2.5
S3	VENEZUELA-98	0.3	1.20	–	2.8
	COLOMBIA-98	0.3	0.78	3.60	2.5
	ECUADOR-2000	0.16	0.82	4.59	2.8
	PERÚ-97	–	0.90	–	2.5
S4	VENEZUELA-98	0.4	1.60	–	3.0
	COLOMBIA-98	0.3	1.04	5.08	2.5
	ECUADOR-2000	0.4	2.00	10.00	2.5
	PERÚ-97	–	–	–	2.5

- Solución
  - Norma COVENIN 1756-98 de Venezuela
- Para suelo S3 se tiene:

$$T_o = 0.30s \quad T^* = 1.2s. \quad \beta = 1.80$$

El período se encuentra entre  $T_o$  y  $T^*$

$$A_d = \alpha \varphi \beta A_o$$

$$A_d = 1.0 \times 1.0 \times 2.8 \times 0.25 g$$

$$A_d = 0.7g$$

- Normativa NSR-98 de Colombia
- Para suelo S3 se tiene  $S = 1.5$  luego

$$T^* = 0.48S = 0.48 \times 1.5 = 0.72$$

$$T^+ = 2.4S = 2.4 \times 1.5 = 3.6$$

El período  $T$  se encuentra entre  $T^*$  y  $T^+$  luego:

$$A_d = \frac{1.2\alpha A_o S}{T} = \frac{1.2 \cdot 1.0 \cdot 0.25g \cdot 1.5}{1.0} = 0.45g$$

- Código CEC-2000 de Ecuador

Para un suelo tipo S3, el valor de  $S = 1.5$ ,  $\beta = 2.8$ ,  $T^* = 0.82s$ ,  $T^+ = 4.59s$ . Luego el período de la estructura se encuentra entre  $T^*$  y  $T^+$

$$A_d = \frac{1.25\alpha A_o S^s}{T}$$

$$A_d = \frac{1.25 \times 1.0 \times 0.25g \times 1.5^{1.5}}{1.0}$$

$$A_d = 0.574g$$

- Norma técnica NTE.030 de Perú

La zonificación sísmica del Perú, no contempla un valor de  $A_o = 0.25g$ . Sin embargo para completar el ejercicio se tiene que  $T^* = 0.9s$  y  $S = 1.4$  para un suelo tipo S3. Luego el período de la estructura se encuentra en la última rama de la norma técnica E.030 del Perú de 1997.

$$A_d = 2.5\alpha A_o S \left( \frac{T^*}{T} \right)^{1.25}$$

$$A_d = 2.5 \times 1.0 \times 0.25g \times 1.4 \times \left( \frac{0.9}{1.0} \right)^{1.25}$$

$$A_d = 0.767g$$

## 2.10 VELOCIDAD DE LA ONDA DE CORTE

La velocidad de la onda corte  $V_s$ , constituye un factor fundamental para definir el perfil de suelo, para ello se necesitan realizar estudios geofísicos los mismos que no están generalizados en los países Bolivarianos. Todavía se realizan estudios puntuales de Mecánica de Suelos, que dan información únicamente en el sitio en que se toman las muestras y hasta una profundidad muy limitada. Lo ideal sería que se realicen los dos tipos de ensayos para que se complementen entre sí.

### 2.10.1 Correlación entre $V_s$ y $N$ del SPT

El Ensayo de Penetración Estándar SPT, es un ensayo muy común, a partir del cual se puede encontrar la velocidad de la onda de corte, utilizando para el efecto alguna relación, de las tantas que existen en la literatura. Una de las más utilizadas es la propuesta por Imai et al<sup>(16)</sup>, que se indica a continuación.

$$V_s = 89.8N^{0.341} \quad (2.36)$$

donde  $N$ , es el número de golpes del ensayo SPT y  $V_s$ , la velocidad de la onda de corte en m/s.

En el ensayo SPT hay una serie factores que afectan a los resultados<sup>(17)</sup>, como por ejemplo, la variación en la altura de la caída del martillo, interferencia en la caída libre del peso, punta deformada de la cuchara de muestreo, etc, etc. Estos y otros factores afectan en la determinación del número  $N$ .

Cuando se habla de una relación entre  $V_s$  y  $N$ , como la indicada en la ecuación (2.36) se la debe utilizar con el caracter de referencial. En el Ecuador, se han realizado investigaciones tendientes a encontrar un factor de corrección<sup>(18)</sup> a la ecuación propuesta por Imai et al, considerando los equipos locales que difieren de los que se usan en Japón, en lo referente a la energía transmitida al suelo por el impacto del martillo. Del estudio realizado<sup>(18)</sup> se encontró que el factor de corrección es de 0.78. Por lo tanto, la ecuación (2.36) adaptada al Ecuador se convierte en:

$$V_s = 70.04N^{0.341} \quad (2.37)$$

En Venezuela, se ha efectuado algo similar y se ha determinado lo que se denomina  $N1(60)$ , que es el número de golpes del ensayo SPT corregido por confinamiento y eficiencia energética del equipo<sup>(19)</sup>.

### 2.10.2 Profundidad del perfil de suelo

Un aspecto importante es la determinación de la profundidad  $H$ , del perfil de suelo, para la determinación del  $V_s$ . Al respecto, en los comentarios de la Norma COVENIN 1756-98 de Venezuela se indica que *la profundidad  $H$ , es aquella en la cual se consigue que la velocidad de la onda de corte es siempre creciente e igual o mayor a 500 m/s.*

Con respecto al criterio indicado en el párrafo anterior, se tiene dificultad de aplicarlo, en suelos en los cuales velocidades de la onda de corte mayores a 500 m/s se encuentran a una profundidad que está alrededor de los 100 m. Para este tipo de suelos sería *conveniente verificar que en la altura  $H$ , la velocidad de la onda de corte sea siempre creciente y que en una profundidad mayor o igual a  $H/4$  medida por debajo de  $H$ , se mantiene la velocidad de la onda de corte.*

Lo que no se debe aceptar es tener estratos con menor velocidad de la onda de corte en los primeros 30 m del mismo, debido a que estos cambios afectan a la respuesta sísmica del perfil de suelos. En este caso se debe profundizar el sondeo hasta que se cumpla que lo indicado en el último párrafo.

### 2.10.3 Velocidad ponderada de la Onda de Corte

Sea  $V_{sp}$ , la velocidad ponderada de las ondas de corte y  $V_{si}$ , la velocidad de la onda de corte en el estrato de altura  $H_i$ . Sea  $t_i$ , el tiempo de viaje vertical de la onda por el estrato  $i$ , el mismo que se determina con la ecuación (2.38)

$$t_i = \frac{H_i}{V_{si}} \quad (2.38)$$

La sumatoria de  $t_i$  en la profundidad  $H$ , es el tiempo total, el mismo que es igual a la altura total  $H$  dividido para la velocidad ponderada  $V_{sp}$ , de donde:

$$V_{sp} = \frac{H}{\Sigma t_i} = \frac{H}{\Sigma(H_i/V_{si})} \quad (2.39)$$

El código ecuatoriano de la construcción CEC-2000 presenta la ecuación (2.39) de la forma indicada en la ecuación (2.40) y adicionalmente indica ecuaciones similares para determinar  $N$  del perfil de suelo y  $S_u$ , velocidad de la resistencia al corte, no drenada del perfil.

$$V_s = \Sigma(H_i) / \Sigma(H_i/V_{si}) \quad (2.40)$$

$$N = \Sigma(H_i) / \Sigma(H_i/N_i) \quad (2.41)$$

$$S_u = \Sigma(H_i) / \Sigma(H_i/S_{ui}) \quad (2.42)$$

- ♣ El resultado de un estudio de suelos, se indica en la figura 2.12. A partir de los 15.0 m. de profundidad se puede considerar que el suelo tiene características de suelo muy duro. Se desea clasificar el suelo de acuerdo al código ecuatoriano de la construcción CEC-2000.

- Solución

A partir de los datos indicados en la figura 2.12, en la tabla 2.17 se muestran las operaciones que conducen al cálculo de  $V_s$  y  $N$  del perfil de suelo.

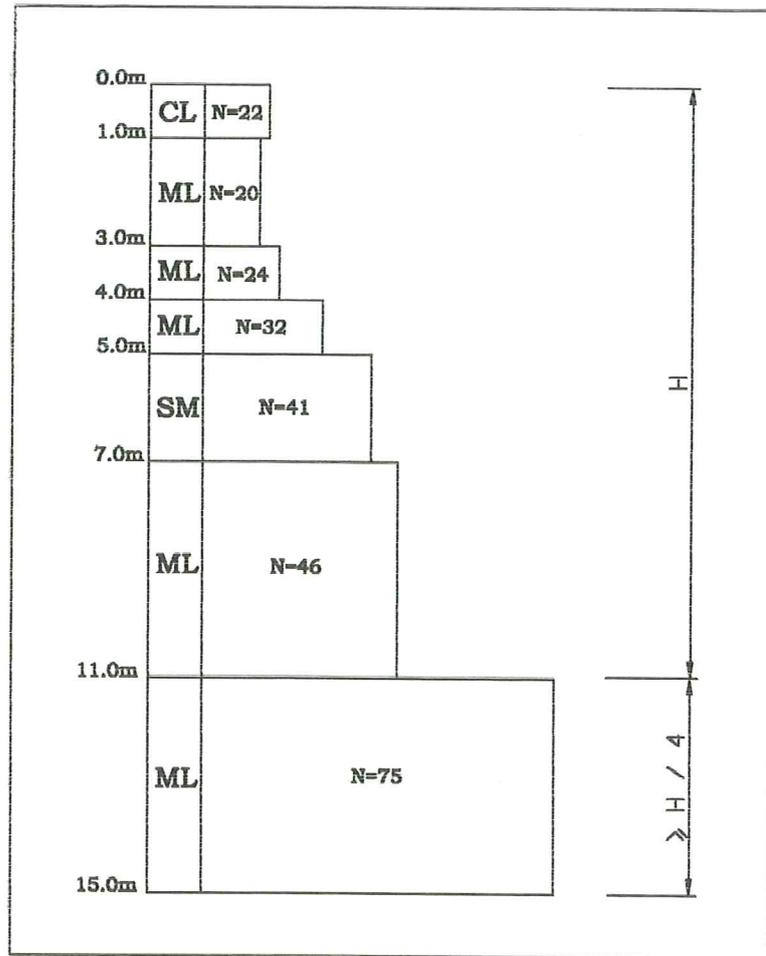
Para encontrar  $V_{si}$  de cada estrato se ha utilizado la ecuación (2.37). Finalmente al emplear las ecuaciones (2.40) y (2.41) teniendo presente que  $\Sigma H_i = 11.0m.$ , se obtiene:

$$V_s = \frac{11.0}{0.047736} = 230.43m/s$$

$$N = \frac{11.0}{0.354107} = 31.06$$

En realidad los decimales, con que se ha obtenido  $V_s$  y  $N$ , no son necesarios toda vez que las ecuaciones de cálculo, son aproximadas.

El estrato de suelo analizado está constituido en su mayor parte por suelo ML que es un Limo inorgánico y arena muy fina. Además tiene un estrato de



**Figura 2.12** Estratigrafía de un suelo ubicado en el Norte de Quito y número de golpes del ensayo SPT.

**Tabla 2.17** Cálculo de  $V_s$  y  $N$ , de un suelo ubicado en el Norte de Quito.

ESTRATO N.-	$N_i$	$H_i$ m	$V_{si}$ m/seg	$t_i$ seg	$H_i/N_i$
1	22	1.0	200.96	0.004976	0.045455
2	20	2.0	199.53	0.010024	0.100000
3	24	1.0	207.01	0.004831	0.041666
4	32	1.0	228.35	0.004379	0.031250
5	41	2.0	248.48	0.008048	0.048780
6	46	4.0	258.43	0.015478	0.086956
SUMATORIA		11.0		0.047736	0.354107

suelo SM que corresponde a una arena limosa. Realmente el suelo en estudio corresponde a lo que en Ecuador se denomina *Cangagua*.

De acuerdo a la clasificación de suelos del CEC-2000, se tiene un perfil de suelo S2. Esta misma clasificación se obtiene en la Norma COVENIN 1756-98 de Venezuela. Para que sea perfil S2, en la norma NRS-98, de Colombia, la velocidad de la onda de corte debe encontrarse entre 270 y 400 m/s, se puede considerar que el suelo analizado tiene un  $V_s$  mayor a 270 m/s, cantidad que se habría obtenido sin tomar en cuenta el factor de corrección.

## 2.11 COMENTARIOS ADICIONALES SOBRE ESPECTROS DE DISEÑO

- Las estructuras se diseñan considerando que van a sufrir daño ante la acción de un terremoto severo. Consecuentemente, se utiliza un espectro de diseño inelástico el mismo que se obtiene a partir del espectro de diseño elástico que se ha estudiado y considerando el comportamiento no lineal de la estructura, temas que son abordados en los siguientes capítulos.
- Los espectros de diseño elástico son condiciones “deformadas” de los espectros de respuesta, por la forma general en que son formulados. Lo mejor sería contar además del espectro de diseño elástico con espectros de respuesta que se esperan en el sitio de interés.
- Es conveniente empezar a contar con espectros de diseño de desplazamientos en lugar de aceleraciones para que el diseño no sea en función de resistencia sino que se lo haga en base a la deformación máxima que se espera en la estructura toda vez que esta variable está relacionada directamente con el daño que se espera en la estructura.
- Con los espectros tradicionales se obtienen las fuerzas estáticas equivalentes en función de la aceleración máxima del suelo pero se ha reconocido que este parámetro es insuficiente para explicar el daño observado en las estructuras<sup>(20)</sup>. Por este motivo se han planteado los espectros de energía<sup>(21,22)</sup>. Tanto este tipo de espectros como los de deriva se encuentran en una fase de investigación y se continúa diseñando las estructuras con los espectros clásicos.

## REFERENCIAS

1. A. Barbat y J. Canet, “Estructuras sometidas a acciones sísmicas. Cálculo por ordenador”, *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería*, Segunda Edición, Barcelona, 1994.
2. N. M. Newmark, “A method of computation for structural dynamics”, *Transactions, ASCE*, **127**, 1406-1435, 1962.
3. N. Newmark y W. J. Hall, “Seismic design criteria for nuclear reactor facilities”, *4th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago de Chile, 1969.
4. H. B. Seed, C. Ugas, J. Lysmer, “Site-dependent spectra for earthquake-resistant design”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **66** (1), 221-244, 1976.

5. C. Ugas, "Espectros para diseño antisísmico en función de las condiciones locales del suelo", *Boletín IMME, Instituto de Materiales y Modelos Estructurales*, 48, Caracas, 1974.
6. Norma venezolana, "Edificaciones Antisísmicas", *Fundación Venezolana de Ingeniería Sísmica, FUNVISIS*, Caracas, 1982.
7. J. Grases, O. López y J. Hernández, "Edificaciones Sismorresistentes: Manual de aplicación de las normas", *Fondo Editorial del Colegio de Ingenieros de Venezuela*, Segunda Edición, 269 pp, Caracas, 1987.
8. NORMA COVENIN 1756-98, "Edificaciones Sismorresistentes", *Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, FUNVISIS*, 194 pp, Caracas, Venezuela, 1998.
9. J. Grases, "Diseño Sismorresistente. Especificaciones y Criterios empleados en Venezuela con fines de Ingeniería", *Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Vol XXIII Tema VI*, 662pp, Edit. Binev. Caracas, Venezuela, 1997.
10. NSR-98, "Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente", *Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica*, Tomo 1, 1998.
11. Código Ecuatoriano de la Construcción CEC-2000, "Capítulo 1: Peligro sísmico, espectros de diseño y requisitos de cálculo para diseño sismo resistente", *XIII Jornadas Nacionales de Estructuras. Pontificia Universidad Católica del Ecuador*, Quito, 2000.
12. M. A. Biot, "Analytical and experimental methods in engineering seismology", *Trans. American Society Civil Engineering*, 108, 365-408, 1943.
13. Norma Técnica de Edificación E.030, "Diseño Sismorresistente", *Reglamento Nacional de Construcciones*, Perú, 1997.
14. ICBO, "UBC- Uniform Building Code 1997 Edition", *International Conference of Building Officials, ICBO*, 3 Vol, Whittier, CA, USA, 1997.
15. J. Argudo, "Incorporación de los efectos de sitio en la Norma de Diseño Sísmico Ecuatoriana", *XIII Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural. Pontificia Universidad Católica del Ecuador*, 277- 295, Quito, 2000.
16. T. Imai, H. Fumoto y K. Yokota, "The relation of mechanical properties of soils to P and S wave velocities in Japan". *Proceedings of the Fourth Japan Earthquake Engineering Symposium*, Tokyo, Japan, 1975
17. V. Gallardo, "Cálculo del período de vibración y microzonificación sísmica para los suelos del norte de Quito", *Tesis de Grado. Escuela Politécnica del Ejército*, Quito, Ecuador, 1989.
18. E. Lecaro, F. León y C. Moyano, "Zonificación de los suelos de Quito y correlación de Ensayos de Penetración Standar con parámetros dinámicos", *Tesis de Grado. Escuela Politécnica Nacional*, Quito, Ecuador, 1987.
19. J. Alviar, J. Panela y H. Echezuría, "Desarrollo de un sistema de medición para evaluar la eficiencia energética en campo del SPT", *Memorias del IX Seminario de Geotecnia*, 1-28, Caracas, Venezuela, 1986.
20. E. García y R. Riddell, "Espectro de energía disipada por histeresis en sistemas inelásticos sometidos a terremotos", *Departamento de Ingeniería Estructural, Universidad Católica de Chile, DIE N. 95-3*, Chile, 1995.

21. J. Hurtado, "El espectro de energía inducida y los efectos de duración de los sismos", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **1** (1), 17-38, ESPE, 1996.
22. P. Fajfar y Gašperšič, "The N2 Method for the seismic damage analysis of RC buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25** (1), 31-46, 1996.

