

Agradecimientos

Se reconoce la colaboración de la Lic. Zoila Hernández Estrada en la elaboración del original de este documento; a la Lic. Virginia Tenorio Bellanger se le agradece su participación en la preparación de gráficos; al MSc. Mario Fernández por su fraterna hospitalidad durante la estancia del MSc. Fabio Segura en Costa Rica en el procesamiento de los datos; especial mención merecen los miembros del Departamento de Sismología por su tesonera labor en la captura y procesamiento de los sismos que han hecho posible la constitución de la base de datos instrumentales, que conforman buena parte del Catálogo Sísmico utilizado en este estudio. Se agradece a CEPREDENAC el apoyo económico para soportar esta colaboración horizontal UCR-INETER.

CONTENIDO

Planteamiento del Problema

- 1- Introducción
- 2- Metodología
- 3- Antecedentes
- 4- Recopilación y Análisis de los Datos
- 5- Modelaje de las Fuentes Sísmicas de influencia en Nicaragua
Caso especial Managua
 - 5.1 Características Sismotectónicas de las Fuentes Sísmicas
 - 5.1.1 Zona de subducción de la placa Coco
 - 5.2 Fallamiento cortical
 - 5.2.1 Fallas Regionales
 - 5.2.1:a Zona sísmica del fallamiento Ante-Arco
 - 5.2.1:b Zona sísmica del Arco Volcánico Occidental
 - 5.2.1:c Zona sísmica de Managua
 - 5.2.1:d Zona sísmica del Arco Volcánico del Sureste
 - 5.2.1:e Zona sísmica del Graben de Nicaragua
 - 5.2.1:f Zona sísmica de Nueva Segovia - Guayape
 - 5.2.1:g Zona sísmica Tras-Arco
- 6- Sismicidad Histórica y Reciente
 - 6.1 Sismicidad preinstrumental entre 1500 y 1899
 - 6.2 Sismicidad del período 1900 - 1995
 - 6.2.:2 Sismicidad del período 1975 - 1995
 - 6.3 Períodos de Recurrencia
- 7- Preparación de Datos para el cálculo de la *Amenaza Sísmica*
 - 7.1- Fuentes sísmicas y datos sismológicos previos
 - 7.2- Homogenización de magnitudes
 - 7.3- Análisis de completitud
 - 7.4- Filtrado de réplicas
- 8- Modelo de Sismicidad
 - 8.1- Valores de recurrencia sísmica a y b
 - 8.2- Magnitudes máximas
 - 8.3- Valor N
 - 8.4- Relación de atenuación
- 9- Resultados de la Evaluación de la Amenaza Sísmica en Managua
 - 9.1- Amenaza Sísmica en función de la Aceleración máxima del suelo (PGA)
- 10- Conclusiones y Recomendaciones
- 11- Referencias Bibliográficas

Anexo

Planteamiento del Problema

Nicaragua es un país de alta sismicidad con muestras históricas de daños efectivos sobre la población, la economía y las posibilidades de desarrollo. La causa de la sismicidad es de larga duración, del orden de los millones de años, por lo tanto, es necesario conocer el nivel de severidad de las sacudidas en el territorio producto de los terremotos a fin de hacer una eficaz *PREVENCION Y MITIGACION* de impacto que le imponen las fuentes sísmicas.

1- Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la *Amenaza Sísmica* del área central de Managua, Nicaragua. Este estudio permitirá definir parámetros bases de diseño necesarios para la seguridad de las obras relacionadas con el desarrollo de la Ciudad.

El principal parámetro que será evaluado, es la aceleración máxima (**PGA**) esperada en la zona, considerando temblores originados en diferentes fuentes sísmicas. El cálculo se efectúa para diferentes periodos de retorno, de acuerdo a la vida útil de las obras, para condiciones de sitio en roca y en suelo. Además de evaluarse la *Sismicidad Histórica e Instrumental*, se considera el contexto *Tectónico* del país, lo cual permite, de manera apropiada, estimar la amenaza sísmica que se presenta en cualquier punto de Nicaragua, a fin de mejorar los diseños y mitigar los impactos por sismos violentos en el área.

2- Antecedentes

En áreas sujetas a la influencia sísmica se requiere de una evaluación cuidadosa del grado de impacto por terremotos importantes a fin de modelar adecuadamente las fuerzas a las que estarán expuestas las obras de desarrollo e infraestructura de países como el nuestro para el que es crucial que se aproveche la vida útil de las inversiones económicas.

En esa línea se destacan después del terremoto de Managua de 1972 trabajos de investigación valiosos, cada uno en su época y con el uso de metodologías en boga y base de datos disponibles en su momento. Vale la pena recordar las preguntas que se hizo *Shah y otros (1975)* antes de iniciar su estudio de Riesgo Sísmico para Nicaragua: ¿son adecuados los diseños constructivos existentes?; ¿cómo se traduciría el nivel de Riesgo aceptado en los parámetros de diseño?; ¿sería similar el uso del suelo en el futuro para áreas que sufrieron mayor daño en 1972?.

Estas preguntas aún están vigentes, y sus respuestas van a ir variando en el tiempo de acuerdo a la implementación de nuevas metodologías para analizar la amenaza, al incremento de la base de datos, a las técnicas de tratamiento del dato, a la ocurrencia de eventos extremos y los hallazgos geológicos, geotécnicos y geofísicos. En el estudio de Riesgo de *Shah* se fundamenta el Código de la Construcción que entró en vigencia después del terremoto que destruyó el casco urbano de Managua en Diciembre de 1972 (*Dewey et al., 1973; Ward et al., 1973*).

Una aproximación a la evaluación de la peligrosidad sísmica se realizó como un esfuerzo interinstitucional Cuba - Nicaragua para fundamentar teóricamente el emplazamiento de una central azucarera en Tipitapa (*Rubio et al., 1982*).

Recientemente se hizo una evaluación de la *Amenaza Sísmica* con salida expresada en términos de la Intensidad Máxima Esperada (*Espinoza, 1996*). Se empleó para este trabajo la base de datos sísmicos instrumentales de recolección reciente (*Rojas, 1993*).

3- Metodología

En la ejecución de este estudio se aplican los conceptos más recientes desarrollados para la estimación de la amenaza. Los fundamentos del análisis de la amenaza sísmica se establecieron a finales de la década de los setenta (*Cornell, 1968*). El fundamento teórico considera que el proceso de ocurrencia de sismos es un proceso de Poisson, por lo cual se asume que existe una independencia espacio - temporal entre los temblores analizados y por lo tanto no existe memoria en el sistema con relación a eventos pasados o futuros. La probabilidad que el movimiento del suelo sobrepase un nivel x en un determinado sitio y tiempo es entonces:

$$P(X > x) = 1 - e^{-v(x)} \quad (1)$$

donde : $v(x)$ es el número medio de eventos por unidad de tiempo en los cuales X excede x .



El modelo de recurrencia de temblores se asume que sigue la conocida relación de Gutenberg y Richter:

$$\log N(M) = a - bM \quad (2)$$

donde $N(M)$ es el número acumulativo de eventos por año con magnitud mayor o igual a M . En este estudio se aplica una relación truncada para las magnitudes menores M_{\min} y para las magnitudes máximas M_{\max} . Además, el parámetro de la pendiente es $\beta = b \times \ln(10)$, el cual describe la relación entre los sismos pequeños y los grandes y el parámetro que define la actividad de la fuente es:

$$A = a(M_{\min})$$

Este describe el número de eventos en la fuente con magnitud igual o mayor a M_{\min} .

La definición de la ley de atenuación del movimiento del terreno es crítico en un estudio de *Amenaza Sísmica*. La expresión matemática que se utiliza aquí tiene la forma

$$\log X = c_1 + c_2 M_i + c_3 \ln R_j + c_4 R_j \quad (3)$$

donde M_i es la ocurrencia de un evento i en la fuente a una distancia R_j del sitio de interés. Las constantes c_1 a c_4 se determinan empíricamente; para la región de centroamérica se obtuvo un juego de estas constantes empleando acelerogramas locales (*Climent et al., 1994*).

La *Amenaza Sísmica* se estima en este ejercicio -siguiendo un enfoque combinado determinístico y probabilístico-. Se utiliza un programa originalmente desarrollado por *McGuire* y modificado en el Arreglo Sísmico Noruego (Norwegian Seismic Array, NORSAR). La metodología permite considerar la incertidumbre de los diferentes parámetros involucrados en la cuantificación de la *Amenaza*.

4- Recopilación y Análisis de los Datos

La evaluación de la *Amenaza Sísmica* para Nicaragua requiere revisión y análisis de las zonas sísmicas locales y próximas al territorio nacional y consideración de los principales sistemas de fallamiento mediante interpretaciones tectónicas; así, se caracteriza la sismicidad de Nicaragua y los países vecinos, dando especial énfasis a la región central. Inicialmente se revisaron los trabajos más recientes que existen sobre neotectónica y sismicidad a nivel regional y local, luego se analizaron las diversas fallas geológicas documentadas en esa área del país

La sismicidad ocurrida en tiempos históricos y recientes también se analiza y relaciona con los datos existentes sobre el tectonismo y el fallamiento. Este proceso, junto con la evaluación neotectónica, permite seleccionar las fuentes sísmicas que más contribuyen a la *amenaza sísmica*.

En relación al fallamiento activo se utiliza como base el mapa Estructural de Nicaragua y el Mapa Geológico de la República de Nicaragua (1 : 500 000). Este se complementa con nuevas investigaciones tectónicas y neotectónicas realizadas en el país, que resultan de la reinterpretación de imágenes de sensores remotos y reconocimiento de campo realizados recientemente.

Respecto al análisis de la sismicidad, la fuente de información es un Catálogo de Temblores que incluye.

- a) banco de temblores ocurridos desde el tiempo de la colonia hasta 1993, (*Rojas, 1993*);
- b) base de datos de sismos de las redes sísmicas de Nicaragua de Abril de 1975 a Diciembre de 1985, y de Noviembre de 1992 a Octubre de 1996;
- c) base de datos, parte fronteriza con Nicaragua, de las redes sísmicas de Costa Rica;
- d) banco de datos cetroamericano (CAM).

A partir del año 1970 se considera que la sismicidad es completa arriba de la magnitud M_w 3.0. La distribución de temblores se compara con las fuentes sísmicas recientes. Esto permite seleccionar algunas zonas sísmicas activas y determinar si existen fuentes sísmicas adicionales a las sugeridas con base en los estudios de fallamiento.

5- Modelaje de las Fuentes Sísmicas de influencia en Nicaragua

Caso especial Managua

Los sismos sentidos en el área bajo estudio se originan en diferentes fuentes sísmicas y ambientes neotectónicos que existen en Nicaragua. Las causas de los sismos que pueden provocar los mayores daños en la ciudad de Managua son :

- a) La convergencia de las placas Coco y Caribe que controla la actividad sísmica de nuestro país por estar localizada la zona de colisión próxima a la franja geográfica de mayor densidad poblacional, (Figura 1). La interacción ocurre a partir de la Fosa Mesoamericana, introduciéndose la placa Coco por debajo de nuestro territorio originando los temblores relacionados con la subducción.
- b) La segunda fuente sísmica importante corresponde a temblores superficiales ocurridos dentro de la corteza, al interior de la placa Caribe

5.1- Características Sismotectónicas de las Fuentes Sísmicas

A continuación se mencionan zonas sísmicas con comportamientos característicos que vale la pena definir dado que su influencia puede ser determinante en diferentes puntos del territorio seleccionados como sitios de interés de obras y proyectos.

5.1.1- Zona de Subducción de la Placa Coco

El proceso de penetración de la placa Coco bajo la placa Caribe, a razón aproximada de 5 a 7 cm/año (*Minster and Jordan, 1978*), genera temblores a partir de unos 10 Km de profundidad bajo el piso oceánico frente a la costa del Pacífico de Nicaragua y hasta profundidades máximas del orden de 250 Km bajo la región central del país. Se origina, entonces una zona sísmica continua inclinada hacia el noreste que se denomina zona de Wadati-Benioff. Esta se divide en dos segmentos de acuerdo a sus características geométricas e interrelación con la otra placa. A los sismos que ocurren en estas subzonas se les nombra sismos interplaca y sismos intraplacas.

Los temblores interplaca ocurren a profundidades entre 15 y 50 Km, dependiendo de la lejanía de la fosa. Se deben al acoplamiento entre las placas Coco y Caribe. Las magnitudes máximas varían en diferentes segmentos del borde del Pacífico de Nicaragua. Los eventos interplaca, que contribuyen a la amenaza sísmica se distribuyen en tres fuentes sísmicas mayores, que se muestran como áreas: 1, 2 y 3 en la Figura 2a y son :

. Zona Sísmica del Golfo de Fonseca

Se extiende desde el extremo de la costa noroccidental del país hasta la costa del Pacífico central de El Salvador; es parte de la subducción somera, (Figura 2a, N° 1) Históricamente el evento máximo reportado de esta zona sísmica es uno ocurrido en 1921 frente al Realejo de Magnitud 7.3, (*Leeds, 1974*).

. Zona Sísmica de Masachapa

Comprende la zona de subducción somera frente a la costa del Pacífico central de Nicaragua; está limitada por las zonas sísmicas de Papagayo y Golfo de Fonseca. Es una fuente sísmica capaz de generar eventos de magnitud del orden de los 7.5 M_w (Magnitud momento). Comprende la zona de subducción somera frente a la costa del Pacífico central de Nicaragua. Está limitada por las zonas del Golfo de Fonseca y Papagayo y es una importante fuente sismogeneradora de Tsunamis, (Figura 2a, N°2). Se caracteriza por períodos de recurrencia del orden de 35 años, según *Rojas (1992)*. El sismo más reciente ocurrido en esta zona fue el de Septiembre de 1992 M_w 7.2 que causó olas de 8 m de altura snm y ocasionó más de 150 muertos (*Byrne y otros, 1993; Ide et al., 1994*).

. Zona Sísmica de Papagayo

Los temblores de esta zona sísmica se localizan bajo el piso oceánico a partir de una profundidad de unos 10 Km, hasta alcanzar profundidades máximas del orden de 50 Km bajo el antearco noroeste de Costa Rica (península de Santa Elena), (Figura 2a, N ° 3). Para esta zona, las magnitudes máximas oscilan entre 7.2 y 7.6. En esta fuente sísmica, los temblores de mayor magnitud ocurridos en el presente siglo, fueron los del 27 de Febrero de 1916 (M_s 7.5), (*Tristán, 1916*) y el del 03 de Marzo de 1990 (M_s 6.5).

En relación a la recurrencia de estos eventos grandes, histórica y recientemente, no se ha observado que los mismos ocurran en ciclos sísmicos bien definidos (Montero, 1986). En relación a la recurrencia de terremotos, se determinó que conjuntamente estas tres zonas sísmicas de la costa del Pacífica de Nicaragua, se caracterizan por la ocurrencia de ciclos sísmicos cada 20 a 40 años.

En este siglo hemos tenido tres (3) ciclos sísmicos, a saber:

- El comprendido entre 1900 y 1921;*
- El ocurrido entre 1939 y 1956;*
- El último que se inició en 1974 y continúa hasta el presente.*

Los temblores intraplaca se originan en el interior de la Placa Coco cuando ésta se sumerge dentro de la región del manto denominada astenósfera; tienen profundidades mayores a 50 km. En relación a las magnitudes máximas observadas en este siglo tenemos que el principal evento que ha ocurrido, fue el de 1885 con magnitud de 7.7, fue localizado bajo el sector Puerto Sandino. En relación con la recurrencia de los temblores mayores, estos no muestran una ciclicidad tan clara como se observa en el caso de los temblores interplaca.

5.2- Fallamiento Cortical

A continuación se revisan las principales fuentes sísmicas que originan temblores con profundidades menores a 20 Km, que podrían contribuir a la amenaza sísmica de la Ciudad Capital.

5.2.1- Fallas Regionales

Los fallamientos regionales activos de carácter cortical, conocidos actualmente, que podrían representar algún grado de amenaza, son los que se localizan dentro de la Placa Caribe, a profundidades menores a 20 Km. De éstos, se han definido siete sistemas mayores, de los cuales tres se ubican a lo largo de la Cadena Volcánica de Nicaragua, identificadas como áreas N° 5, 6 y 7 (Figura 2a), otra extensa zona sísmica regional es la que comprende el Graben de Nicaragua, enumerada como zona 8 (Figura 2a) y otras dos que son: la zona sísmica tras arco (Atlántico de Nicaragua) (área 10) y la zona de fractura de Nueva Segovia-Guayape (área 9); a continuación se describen dichas zonas sísmicas.

5.2.1:a- Zona Sísmica del Fallamiento Ante Arco

Predominan sistemas de falla con rumbo NE-SO y NO-SE (Figura 3), ubicadas a lo largo de la costa del Pacífico. Ejemplo de estas fallas pertenecientes a esta zona es la de Mateare en Managua y Ochomogo en Rivas; la traza de la primera es de rumbo NO-SE y la de la segunda NE-SO.

5.2.1:b- Zona Sísmica del Arco Volcánico de Occidente

Los sistemas de fallas principales tienen rumbo NE-SO y ligeramente NS (Figura 4), transversales al eje de la cadena volcánica; las fallas que más se destacan en esta zona son aquellas sobre las que están emplazados los volcanes de la cadena cuaternaria. El evento máximo conocido en este siglo ocurrió al NE de la ciudad de León con magnitud aproximada de 7.0.

5.2.1:c- Zona Sísmica de Managua

El catálogo sísmico para fuente somera continental en centroamérica cita 51 sismos destructivos. Managua ha sido foco de dos de estos eventos, en este siglo (*White and Harlow, 1993*). Esta sismicidad está asociada al Arco Volcánico cuaternario donde la capital nicaraguense se encuentra localizada

La geología local muestra un patrón complejo, con rasgos estructurales particulares empezando con la discontinuidad de la cadena volcánica y una serie de fallas y sistemas de fallas que enmarcan el área capitalina (Figura 5), las estructuras geológicas más notables son:

- . *la falla de Mateare*, impresionante por su longitud (casi 70 Km) y por su escarpe que en algunos sitios supera los 100 m, localizada al Oeste de Managua; el tipo de fallamiento es normal y el buzamiento es hacia el Este; la tendencia es NO-SE;
- . *el lineamiento Nejapa-Miraflores*, es un rasgo morfológico espectacular, muestra de una actividad volcánica profusa; incluye el volcán Apoyequé y vecinos inmediatos, la laguna cratérica de Asososca, la depresión de Nejapa y el Valle de Ticomo; el rumbo es NS;
- . *el sistema de falla del centro de Managua*, reúne las fallas de Tiscapa, Chico Pelón, los Bancos, y Estadio; se dispone este sistema con orientación ligeramente NE y en él ocurrieron los sismos destructivos de Managua de 1931 y 1972;
- . *la falla Aeropuerto* es importante por su longitud atravesando la parte este de Managua con rumbo NE-SO; en la actualidad ha manifestado actividad sísmica en su parte sur (*Segura, 1993; Segura y otros, 1995*);
- . *el sistema de falla de Cofradía*, en el extremo Este de Managua, tiene tendencia N-S y está constituido por fallamiento escalonado; desde la instalación de la red sísmica local (1975) se ha recolectado sismos de baja magnitud (*Segura, 1984*);

- . **falla las Nubes**, constituye un rasgo dominante de 1000 m de altura, al sur de Managua, con rumbo fuertemente NE-SO; esta estructura geológica enmarca por el sur gran parte del área capitalina.

5.2.1:d- Zona Sísmica Superficial arco volcánico del sureste

Este es un segmento del arco volcánico que comprende la caldera volcánica del Masaya, Laguna cratérica de Apoyo, volcán Mombacho, Isla Zapatera, Isla de Ometepe y Archipiélago de Solentiname, (Figura 2a, N° 7). El sismo más reciente de magnitud moderada sobresaliente ocurrió en 1985 (M_s 5.5) al este de la Isla Zapatera.

5.2.1:e- Zona sísmica del Graben de Nicaragua

Consiste en una prominente depresión estructural (*Rojas, 1993a*), limitada hacia el suroeste por el arco volcánico de Nicaragua y Costa Rica. En las faldas noreste de los volcanes Orosí, Rincón de la Vieja y Miravalles, se presenta la Falla Caño Negro de rumbo NO y que se considera la falla que limita el graben de Nicaragua en su sector suroeste, (Figura 2a). Se considera como una falla normal y esta marcada por un escarpe bastante juvenil, (*Barquero, 1990*), que tiene continuidad por varias decenas de kilómetros. Algunos sismos ocurridos en los últimos quince años han sido asociados a este sistema de fallamiento. Por el N y NE, dicho graben está limitado por un sistema de extensos lineamientos, distribuidos desde la base de la Cordillera Chontaleña en Nicaragua hasta la región de Tortuguero en Costa Rica.

El graben de Nicaragua es una región con bajo grado de sismicidad; el mayor evento localizado instrumentalmente y asociado a uno de los bordes de esta estructura tectónica, ocurrió en el sector de Nicaragua cerca de Ticuantepe, en octubre de 1928, con magnitud 6.5 M_s , provocó fuertes sacudidas, pero sin daños mayores, (*Rojas, 1993*).

5.2.1:f Zona sísmica de Nueva Segovia - Guayape

El sistema de falla de Guayape está situado al Este de Honduras seudo paralelo a la frontera con Nicaragua, es una zona con ancho entre 2 y 20 Km con fallamiento predominante de rumbo lateral, extendiéndose hasta las costas del Caribe (Figura 2a, N° 9). El potencial sísmico, en términos de razón de sismicidad, es bajo, pero según algunos autores este sistema muestra evidencia de desplazamiento reciente (holocénico) cerca de su extremo noreste (*Finch and Ritchie, 1991*).

5.2.1:g Zona sísmica Tras Arco

Esta comprende la mayoría del territorio nacional central y oriental, se extiende desde el borde oriental del Graben de Nicaragua hasta parte de la plataforma continental del Atlántico, (Figura 2a, N° 10). Hasta el momento no hay control de la microsismicidad y solo se registran aquellos sismos que pasan de 3.5 de magnitud

6.- Sismicidad Histórica y Reciente

A continuación se describe la sismicidad ocurrida en Nicaragua entre 1500 y 1996, enfatizando en los eventos de mayor magnitud y destructividad potencial:

6.1- Sismicidad preinstrumental entre 1500 y 1899

a.- Temblor entre 1538 y 1540 *Peraldo y Montero (1994)* reportan con base en una referencia oral del historiador Carlos Meléndez, que en una de las expediciones que se realizaron al Río San Juan (Desaguadero) los españoles reportaron haber sentido un temblor de cierta intensidad. Los indios que acompañaban a los españoles arrojaron sus lanzas al aire en actitud religiosa.

b.- Terremotos de Nicaragua-Región Fronteriza con Costa Rica de 1648, 1651 y 1663: Estos son sismos de gran interés para este estudio porque para los mismos se reportó un incremento de los "raudales" del Río San Juan. Se reporta (*Incer, 1990*) que los terremotos 1648, 1651 y 1663 provo-

caron que se levantaran los raudales del Río San Juan, evitando que embarcaciones de cierto calado pudiesen recorrer ese sector del río. Menciona que incluso un barco que provenia de La Habana y que estaba en Granada debió ser subastado al no poder regresar por el Río San Juan.

Se menciona que el terremoto de 1648 provocó muchos daños en León (*Crawford en Grasses, 1974*), matando bastantes personas y lesionando muchas. Montessus DeBallore (1888) menciona que este terremoto aumentó los raudales del Río San Juan *Leeds (1974)* ubica este temblor en $12^{\circ} 30' N$ y $86^{\circ} 48' W$, profundidad entre 0 y 60 Km y magnitud entre 7,0 y 7,7.

Con respecto al sismo de 1651 se reporta (*Leeds, 1974*) que el mismo afectó el sur de Nicaragua y tuvo epicentro en $11^{\circ} 12' N$ y $85^{\circ} 48' W$, profundidad entre 0 y 60 Km y magnitud entre 7,0 y 7,7. Entre los efectos que provocó estuvo la elevación, nuevamente, del cauce del Río San Juan.

Se refiere que en 1663 (*Crawford en Grases, 1974*), una nueva serie de sismos violentos que destruyeron casas y provocaron muertes en las cercanías del Volcán Momotombo y causó también daños en Granada. Se reporta (*Leeds, 1974*) que el sismo destruyó completamente la nueva Ciudad de León. Considera que el evento tuvo epicentro en $12^{\circ} 25' N$ y $86^{\circ} 33' O$, profundidad entre 0 y 60 Km y magnitud entre 7,0 y 7,7.

Se interpretan estos eventos como relacionados con la interacción de las placas Coco-Caribe (*Peraldo y Montero, 1994*). Estos autores consideran que el aumento en los raudales del Río San Juan podría haber sido provocado por deslizamientos hacia el cauce del río, subsidencia y movimiento de la zona ribereña del río y consideran menos probable un levantamiento tectónico. Se puede agregar que esta última posibilidad solo podría existir si alguno de los anteriores eventos hubiese ocurrido en una falla que cortara transversalmente el cauce del Río San Juan. Esta última posibilidad aunque no la descartamos parece poco probable considerando la baja sismicidad de esta zona.

6.2- Sismicidad del período 1900 - 1995

- Como se verá más adelante, con respecto a la sismicidad instrumental registrada durante el período 1900 - 1975, esta es la más confiable en su localización especialmente la ocurrida después de 1964. A continuación se describen los principales eventos ocurridos dentro de la zona de interés

6.2:2- Sísmicidad del período 1975 - 1995

Se analizó la sísmicidad ocurrida por separado, dedicando esta sección a la que sucedió en el período 1975 - 1995 dado que es la mejor localizada y se utilizaron estaciones nicaragüenses y datos del catálogo sísmico de Costa Rica, en la ubicación de estos eventos.

6.3- Períodos de recurrencia

Con respecto a los temblores superficiales con magnitudes M_s superiores a 5.0, que están dentro de las tres zonas sísmicas de la faja volcánica, los datos históricos y recientes muestran que estos eventos presentan recurrencias de 18 ± 4 años y tienden a ser contemporáneos con los temblores mayores interplaca del pacífico central del país, que ocurren cada 20 - 40 años.

En los últimos 100 años han ocurrido en esas tres zonas sísmicas de fallamiento cortical, cuatro secuencias sísmicas, a saber:

1931, 1955, 1972 y 1985.

Con respecto a los temblores fuertes asociados al Graben de Nicaragua, estos no muestran patrones cíclicos definidos, sin embargo, dado que es una gran estructura reciente (Cuaternaria), con grandes fallas y alineamientos en los bordes, en el presente trabajo se modela utilizando además del dato sísmico, las estimaciones determinísticas, para cuantificar el efecto de la amenaza de dicha fuente, de la manera más representativa posible.

7- Preparación de los Datos para el Cálculo de la Amenaza Sísmica

La estimación inicial de la *amenaza sísmica* sigue un enfoque determinístico, en el que se consideran las fuentes sísmicas más importantes que pueden afectar el centro de Managua. Para esto se consideran las características sismológicas y tectónicas de las zonas que han sido descritas previamente. Esto permite estimar la magnitud máxima esperada que puede generar cada fuente sismogénica seleccionada, a partir de la longitud de ruptura, del área de ruptura, de la sísmicidad histórica - reciente y criterio geofísico.

7.1- Fuentes sísmicas y datos sísmológicos previos

Se considera que las fuentes sísmicas (Figura 2 : a, b y c) que pueden afectar el área capitalina son: temblores interplaca, intraplaca y los de fallamiento superficial

Se estima que el temblor interplaca máximo probable sería de magnitud 7.5 M_w , sin embargo tendría su hipocentro a no menos de 100 km de la ciudad, disminuyendo el riesgo sísmico de la obras por un evento de subducción. Lo anterior con base en conocimientos geológicos, aspectos sismotectónicos de la sismicidad de este siglo.

Respecto a los sismos intraplaca se esperaría un temblor de magnitud (M_w) 7.5 entre 30 - 110 km de profundidad, otro de 7.0 ubicado entre los 110 km y 220 km. Las zonas sísmicas corticales someras que presentan *amenaza sísmica* para Managua, son las siete anteriormente descritas y para las cuales se ha escogido un sismo máximo probable considerando criterios tanto probabilísticos como conceptuales (determinísticos), (Tabla 1).

7.2- Homogenización de magnitudes

En general, los catálogos sísmicos contienen diversos tipos de magnitud, a menudo con muchas estimaciones para el mismo evento; las agencias sísmológicas, usualmente estiman diferentes magnitudes con distintos criterios (M_L , M_b , M_s , etc)

Para resolver este problema se han obtenido diferentes relaciones entre M_L , M_b , M_s y M_w para América Central (Rojas, 1993; Rojas y otros, 1993). Un problema básico con las escalas de magnitud es, que por diferentes razones, cuando ocurren temblores con magnitud alta la escala se satura (se subvalora la magnitud). En ese aspecto la fórmula en función de M_s es mejor que la que es función de M_L y que la que es función de M_b , pero también M_s empieza a saturarse alrededor de 6.5; por tanto lo conveniente es emplear una escala que relacione linealmente la energía para todos los intervalos de magnitud.

Actualmente sólo hay un tipo de magnitud que no se satura a ningún valor, esta es la magnitud momento sísmico (M_w) que fue originalmente definida por *Hanks y Kanamori (1979)*:

$$M_w = 2/3 \log (M_0) - 10.7 \quad (4)$$

donde M_0 es el momento sísmico en dinas-cm.

En el presente estudio, se convirtieron a M_w todas las magnitudes, de todos los sismos, de acuerdo con el siguiente procedimiento

- M_w se derivó de M_0 para todos los casos posibles.
- Cuando M_0 no estuvo disponible, M_w se obtuvo directamente de M_s .
- Cuando M_s no estuvo disponible, la M_w se calculó indirectamente de M_b o M_L en ese orden de prioridad, de acuerdo a las relaciones de conversión prefijadas (*Rojas, 1993*).

7.3- Análisis de completitud

Cuando se usa un catálogo sísmico para la estimación probabilística de futuros movimientos fuertes, es particularmente importante el análisis de completitud, porque si se emplea un conjunto de datos incompletos puede afectar significativamente los resultados de la estimación final de la *amenaza sísmica*.

Hay disponibles diversos métodos para determinar la completitud, pero muchos de ellos son puramente estadísticos, con base en supuestos que no siempre están acordes con el comportamiento natural de la sismicidad. Para este estudio se considera completa una muestra, cuando la distribución de las distintas clases de magnitud de los temblores es homogénea a partir de un año determinado.

De acuerdo al catálogo empleado (*Rojas, 1993; Rojas y otros 1993*) y recientemente actualizado al año 1995 (*INETER 1992 - 1995*), se ha demostrado que es completo de acuerdo a cierto grado de magnitud, para los siguientes períodos.

- A partir de 1910 para sismos $M_w \geq 6.0$
- A partir de 1963 para sismos $M_w \geq 4.0$
- A partir de 1970 para sismos $M_w \geq 3.0$
- A partir de 1984 para sismos $M_w \geq 2.5$

En este trabajo se le dió mayor énfasis al estudio de la sismicidad en base al período 1970 - 1995, se hace notar que el **valor b** muestra gran similitud al considerar muestras de sismicidad que cubren diversos periodos de tiempo, siempre y cuando cumplan con el criterio de completitud de las magnitudes (*Rojas y otros, 1993*).

Se utilizó la sismicidad histórica y reciente para la estimación de las magnitudes máximas empleadas en los archivos de entrada, que son usados en el cálculo de la amenaza.

7.4 Filtrado de réplicas

El catálogo de temblores (*Rojas, 1993*), incluye soluciones hipocentrales procedentes de muchas agencias que reportan los datos sobre el mismo evento. En el presente estudio se seleccionan y organizan los diferentes reportes, de acuerdo a prioridades por agencia, con un intervalo de espacio y tiempo previamente definido.

Prof. Zona	No.	Valor a	Valor b	N(4.3)	M _w máx	Prof. (Km)	Zona Sísm.
0 - 30	1	6.06±0.24	1.23±0.05	5.9020	7.5	20	G. Fonseca
0 - 30	2	5.41±0.08	1.06±0.02	7.1121	7.5	15	Masachapa
0 - 30	3	5.52±0.11	1.07±0.02	8.2985	7.5	20	Papagayo
0 - 30	4	3.83±0.09	0.85±0.02	1.4962	6.3	15	Ante-Arco
0 - 30	5	4.75±0.14	1.27±0.04	0.1945	6.0	10	A. V. Nor-Occidental
0 - 30	6	1.80	0.62	0.1361	6.2	4	Managua
0 - 30	7	2.62±0.17	0.79±0.04	0.1671	6.2	10	A. V Sur-Or
0 - 30	8	3.27±0.12	0.78±0.02	0.8241	6.0	10	Grabén
0 - 30	9	3.42±0.16	0.88±0.04	0.4325	7.0	15	N Seg. Guay.
0 - 30	10	3.07±0.09	0.79±0.02	0.4710	6.5	15	Tras-Arco
30 - 110	11	5.98±0.12	1.12±0.02	8.7096*	7.0	50	Subd.Frontal
30 - 110	12	5.59±0.16	0.97±0.03	16.7880*	7.5	50	Central-Nic
110 - 220	13	4.72±0.17	0.94±0.03	3.0903*	7.0	150	Subd.-Prof.

Tabla 1 : Parámetros de las Fuentes Sísmicas

En la Tabla 1, las columnas muestran el Número de Zona Sísmica, los valores a y b son los índices de sismicidad de cada fuente sísmica, N es el Número anual de temblores de magnitud mínima ($M_w = 4.4$), M_w máxima es el valor medio probable de máxima magnitud que podría generar la fuente sísmica, $Prof.$ es la profundidad promedio de la fuente sísmica usada en el análisis de la amenaza. Todos los valores son datos promedio.

El método implementado en el programa NPRISK*, (Dahle, 1994), define la ocurrencia del movimiento del terreno a un nivel específico y en un sitio particular y requiere que la ocurrencia de los eventos sea un proceso tipo Poisson, siguiendo mutua independencia en espacio y tiempo. Por lo tanto, se debe procurar en la medida de lo posible, que las réplicas y premonitores sean removidos del banco de datos.

En la eliminación de las réplicas durante el proceso del análisis de la *amenaza sísmica*, se usó la metodología desarrollada por Lindholm, en NORSAR, Noruega y explicada por Laporte et al (1994). La misma consiste en un filtro en espacio tiempo, definido por una curva hiperbólica.

8- Modelo de Sismicidad

El modelo de fuentes sísmicas se combinó con información geológica y geotectónica; se subdividió la región de interés y sus alrededores, en áreas que contienen los principales sistemas de fallamientos superficiales; con esto se considera su aporte al cómputo de la *amenaza sísmica* para el área de la capital. Con respecto a la sismicidad de la zona de subducción de la placa Coco se definieron tres intervalos de profundidad, (Figura 6) :

- . Subducción superficial, temblores con profundidades focales hasta los 29 km;*
- . Fuente sísmica con profundidad entre 30 a 110 km;*
- . Fuente sísmica con profundidad entre 111 a 220 km*

Las fuentes sísmicas con profundidades mayores a los 220 km, fueron ignoradas en este estudio, debido a que representan una amenaza insignificante para el sitio de estudio. La figura 6 muestra un perfil de los diferentes intervalos de la actividad sísmica en profundidad, con los parámetros de sismicidad para cada una de ellas

Las Figuras 7, 8 y 9 ilustran la sismicidad considerada para cada una de las fuentes sísmicas previamente descritas.

8.1- Valores de recurrencia sísmica a y b

La ecuación fundamental que relaciona el número de temblores (de un determinado valor de magnitud) para un determinado período de tiempo, es la relación (2) propuesta por Gutenberg y Richter donde los valores a y b se calculan por regresión lineal. Se calcularon los valores a y b (Tabl 1) para las diferentes fuentes sísmicas. Las Figuras de la 9 a la 14, muestran los gráficos de *frecuencia - magnitud* para dichas fuentes sísmicas.

8.2- Magnitudes Máximas

La determinación de la máxima magnitud para cada una de las fuentes sísmicas, no es fácil de estimar. La ciclicidad de los terremotos a menudo es muy complicada y no se comporta como una simple distribución de tipo *Poisson*; se estimaron Magnitudes máximas para las fuentes sísmicas en base a:

- . *Estimaciones probabilísticas, derivadas directamente del catálogo sísmico (considerando tanto la sismicidad histórica como la instrumental);*
- . *Consideraciones determinísticas basadas en los conocimientos geológicos de la región, la tectónica y neotectónica local y, dimensión del fallamiento entre otros.*

Con estas consideraciones, fue posible seleccionar valores de magnitudes máximas (M_w) entre 6.0 a 7.7, para las diferentes zonas que se utilizaron en el presente cálculo de amenaza (Tabla 1).

8.3- Valor N

En la relación de recurrencia en la ecuación (2), aparece el valor N , que significa el número de eventos de magnitud igual o mayor que M . El valor N lo obtenemos despejando de la ecuación (2), una vez obtenidos a y b , para una magnitud mínima de M_w 4.3. Se ha considerado determinísticamente ese valor, como el mínimo valor de magnitud, que podría aportar la menor contribución a la *amenaza sísmica* del sitio.

El cómputo de la *amenaza sísmica* se efectuó en base a un formalismo del tipo **árbol de la lógica**. El método se estableció recientemente por NORSAR y explicado en *Dahle (1994)*, donde todos los parámetros se expresan con dos valores extremos y un valor central, con un peso de probabilidad asignado a cada uno de ellos. Los valores extremos de b se consideraron sumando y restando 0.10 al valor central, con pesos que generalmente son de 20%, 60% y 20%; los valores extremos para N , se obtienen dividiendo y multiplicando el valor central por 2, con pesos de 0.2, 0.6 y 0.2. A la magnitud máxima se le asigna una incertidumbre inferior de 0.3 y una incertidumbre superior de 0.2, con pesos de 20%, 60% y 20%. A la profundidad se le ha asignado pesos probabilísticos generales de 0.25, 0.5 y 0.25, donde los valores extremos se usan al considerar los bordes superior e inferior de la zona sísmica.

8.4- Relación de Atenuación

Para efectos de la determinación de la aceleración máxima del terreno (**PGA**), se empleó la relación desarrollada recientemente por *Climent y otros (1994)*, para la región de Centroamérica. En este momento es la relación más apropiada para nuestro país, en vista de que se basa directamente en los propios registros acelerográficos de la región y ha sido probada con algunos estudios sobre este mismo tema (*Camacho et al 1994; Laporte et al., 1994; Rojas y Montero, 1994; Rojas y Fernández, 1996*).

Para un sitio con condición en roca, la relación es la siguiente:

$$\log \text{PGA} = -1.687 + 0.553 M_w - 0.537 \ln R - 0.00302 R \quad (5)$$

Para un sitio con condición normal de suelo, la relación es la siguiente:

$$\log \text{PGA} = -1.408 + 0.553 M_w - 0.537 \ln R - 0.00302 R \quad (6)$$

donde **PGA** es dado en cm/seg^2

9- Resultado de la Evaluación de la Amenaza para Managua

La estimación de la *amenaza sísmica* para el sitio de estudio, se realizó basándose en la zonificación de fuentes sísmicas que se muestra en Figura 2 y fueron descritas en las secciones anteriores; se aplicó la ley de atenuación descrita previamente.

9.1- Amenaza Sísmica en base a la Aceleración Máxima del suelo (PGA)

El cómputo de la *amenaza sísmica* para el área de la ciudad de Managua, se efectuó en términos de la aceleración máxima del suelo (**PGA**), a través del programa **NPRISK** (previamente mencionado) en sistema UNIX. En Anexo se presenta resumen de los archivos de salida de dicho cómputo, considerado como un sitio puntual el centro de la Ciudad Capital, en las coordenadas 12.140° y 86.251° .

Se presentan además gráficos de las curvas (Figuras 12 y 13) que permiten obtener el valor esperado para que la aceleración pico **PGA** sea excedida según diferentes periodos de retorno (50, 100 ó 500 años, por ejemplo), para el sitio. En la Tabla 2 se muestran los valores **PGA** para diferentes periodos de retorno aplicando las relaciones de atenuación de *Climent y otros (1994)*.

Tabla 2

Período de Retorno (años)	Aceleración/Roca Climent y otros, (1994)	Aceleración/SUELO Climent y otros, (1994)
50	1.86 m/s ²	2.46 m/s ²
100	2.24m/s ²	2.95 m/s ²
500	3.36m/s ²	4.45 m/s ²

Resultados de amenaza sísmica para roca y suelo de la ciudad de Managua

Tabla 3

T (años)	PGA (Shah et al, 1975)	PGA (Johanssen, 1988)	PGA (Rojas et al, 1994)	PGA (Este estudio)
50	0.25g		0.18g	0.25g
100	0.25g		0.22g	0.39g
500	0.35g	0.26g	0.34g	0.45g

Comparación de este resultado con los de otros autores.

10- Conclusiones y Recomendaciones

1.- De acuerdo al modelo sismotectónico propuesto y considerando la relación de atenuación propia de nuestra región, se obtuvo un valor de aceleración máxima en el área, para condiciones normales de suelo, en un período de retorno de 100 años, de 2.95 m/s^2 , lo que representa un valor que se considera como moderado, (0.3g). Pero debe considerarse que Managua se ubica en condición de suelo blando y este valor podría incrementarse por el efecto local de suelo.

2.- Se recomienda que al efectuar obras de infraestructura en el área, tales como: diseño de tuberías, construcción de tanques o depósitos de combustibles, estabilizar taludes, edificios públicos u otros, sean considerados valores de diseño que sean incluso superiores a los valores obtenidos de PGA a fin de mitigar el grado de amenaza de las fuentes sísmicas y el efecto local del suelo.

3.- Diferentes investigaciones neotectónicas revelan que algunos de los sistemas de falla presentes en la zona, manifiestan actividad en épocas geológicas recientes (Cuaternario), como los sistemas de fallas del centro de Managua, Cofradía y falla Aeropuerto. Por lo que debe efectuarse un diseño adecuado de las obras; porque además de considerarse el parámetro de diseño (PGA) es necesario mitigar el riesgo de ruptura o fuertes vibraciones que pueden producir la presencia de fallamiento activo a muy corta distancia y dentro de la misma Ciudad.

11- Rererencias Bibliográficas

- . *Barquero, R., (1990)*. Sísmicidad y tectónica de la región Noroeste de Costa Rica, con énfasis en la zona del proyecto geotérmico Miravalles. Tesis Lic., Escuela Centroamericana de Geología, Univ. de Costa Rica, 117.
- . *Byrne, D. E., E. Suárez, J. Domínguez, M. A. Torres and F. Segura, (1993)*. The Nicaragua Earthquake Sequence : Source Parameters and Aftershocks Study. Res, Let., 64, 3pp.
- . *Camacho, E. Lindholm, C., Bungum, H. and Dahle, A., (1994)*. Seismic Hazard for Panamá. NORSAR, Report N° 2-17.
- . *Climent, A., W. Taylor, M. Ciudad Real, W. Strauch, M. Villagran, A. Dahle and H. Bungum (1994)*. Spectral strong motion attenuation in Central América. Technical Report, N° 2-17, 46pp.
- . *Cornell, C., (1968)* Engineering Seismic Risk Analysis.- Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1583 - 1606.
- . *Dahle, A. (1994)*. NPRISK User's Guide.
- . *Dewey, J. W., S. T. Algermissen, C. Langer, W. Dillinger, and M. Hopper, (1973)*. The Managua earthquake of 23 December 1972 : location, focal mechanism, aftershocks, and relationship to recent seismicity of Nicaragua. Earthquake Engineering Research Institute, Conference Proceedings, V-I.
- . *Espinosa, S. (1996)*. Probabilistic Macroseismic Hazard Assessment for Nicaragua (Preliminary Results). Natural Hazards, 13, 179 - 202.
- . *Grases (1974)*.
- . *Finch, R. C., and Ritchie, (1991)*. The Guayape fault system, Honduras, Central America, J. Of South Am. Earth. Scien., 4, 43 - 60.

-
- . *Gutenberg, B. and C.F. Richter., (1954)*. Seismicity of the Earth and associated Phenomena. Princeton, N.J., University Press, 1954, 310 pp.
- . *Hans, T. y Kanamori, H., (1979)* A moment magnitude scale. J. Geophys. Res., 84, 2348 - 2350.
- . *Ide, S., H. Imamura, Y. Yoshida and K. Abe, (1994)*. Mechanism of the Nicaraguan tsunami earthquake of September TSUNAMI 94', Japan., 637.
- . *Incer, (1990)*.
- . *Laporte, M., Lindholm, C., Bungum, H. and Dahle, A., (1994)*. Seismic Hazard for Costa Rica Technical Report No 2-14. NORSAR, Norway.
- . *Leeds, D.J., (1974)* Catalog of Nicaraguan Earthquakes. Bull. Seis. Soc. Am., 64, 1135 - 1158.
- . *Minster, J. B. and T.H. Jordan. (1978)* Present-day plate motions. J. G. Res., 83, 5331 - 52554.
- . *Montero, W., (1986)*. El terremoto de San Estanislao del 7 de mayo de 1822. Un gran temblor de subducción del sur de Costa Rica?. Cienc. Tec., Vo l. 10 (2), 11 - 20, San José, Costa Rica.
- . *(1986)*, Períodos de recurrencia y tipos de secuencias sísmicas de los temblores interplaca e intraplaca en la región de Costa Rica, Rev. Geol. Amer. Centr., 5, 35 - 72.
- . _____ *(1989)*. Sísmicidad histórica de Costa Rica 1638-1910, Geofis. Inter., 28, 531 - 559.
- . *Montessus de Ballore, F., (1888)*. Tremblements de terre et eruption volcaniques en Centre Amerique depuis la conquete espagnole jusqu'a nos jours. Soc. des Sci. Nat. de Saone et Loire, Dijon, France, 293.
- . *Peraldo, G. y Montero, W. (1994)*. Temblores del período colonial de Costa Rica. Edit. Tecnológica de Costa Rica, Cartago, 162

-
- . *Richter, C., (1958)*. Elementary Seismology.- W. H. Freeman and Company, San Francisco, Estados Unidos, 768.
- . *Rojas, W., Bungum, H., y Lindholm, C., (1993)*. Historical and recent earthquakes in Central America, Rev. Geol Am Centr. 16: 5 - 22, 1993.
- . *Rojas, W., (1993)*. Catálogo de sismicidad histórica y reciente en América Central. Desarrollo y Análisis Tesis de Licenciatura en Geología, Universidad de Costa Rica, 91 p.
- . *Rojas, W., Cowan, H., Lindholm, C., Dahle, A y Bungum, H., (1993)*. Regional Seismic Zonation for Central America. A Preliminary Model.- Technical Report, NORSAR, Norway.
- . *Rojas, W. y Montero, W., (1994)*. Sub-estudio de la vulnerabilidad sísmica de la conducción Embalse El Llano a Tres Ríos, provincia de Cartago, Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geol., UCR
- . *Rojas, W. y Fernández, M., (1996)*. Estudio de amenaza sísmica para el proyecto de oro Bellavista, Miramar. Informe para el estudio de Impacto ambiental, para la Secretaría Ambiental de Costa Rica. SETENA 31 p.
- . *Rubio, M., T. Chuy, L. Alvarez, J.A. Zapata, M. Serrano, J. Valdés, J.F. Albear, Campbel, F. Segura, O. Olivares, R. Zapata, M. Arellano, y S. Quintana. (1982)*. Estimación de la peligrosidad y microzonificación sísmica del área de ubicación del central azucarero Tipitapa-Malacatoya. Informe Interno, INETER.
- . *Segura, F. (1982)*. Interpretación Sismotectónica de la Región de Cofradía y Apoyo, Nicaragua Tesis de Maestría, UNAM, México.
- . _____ (1993). Implicaciones tectónicas de la actividad sísmica de Ticuantepe en 1984, Nic. Informe Interno, INETER.

- . *Segura, F., Z. Hernández, V. Tenorio, W. Strauch, A. Morales, M. Bodán, C. Urbina y A. Acosta. (1995).* Sismo sentido del 95/02/08, Ticuantepe, Nic. Informe Interno, INETER.
- . *Shah, H., Ch. P. Mortgat, A. Kiremidjian, and T.C. Zsutty. (1975).* A study of seismic risk for Nicaragua. The John A. Blume Earthquake Engineering Center. Stanford University.
- . *Tristan, J.F., (1916).* The Costa Rica earthquake of February 27, 1916, Bull. Seism. Soc. Am. V.6, pp. 232-235.
- . *White, R., and D. H. Harlow. (1993).* Destructive upper crustal earthquake of Central America since 1900. Bull. Seis. Soc. Am., 83, 1115 -1142