



01161

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO.

5

FACULTAD DE INGENIERÍA.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO.

TESIS:

MÉTODOS PARA ZONACIÓN SÍSMICA ÓPTIMA EN VARIAS DIMENSIONES.

PRESENTADA POR:

FRANCISCO CASTELLANOS LEÓN.

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA.

(ESTRUCTURAS).

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JAIME GARCÍA PÉREZ.

294283

CIUDAD UNIVERSITARIA, 2001.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## RESUMEN.

La zonación sísmica óptima es aquella que minimiza el desperdicio ocasionado por zonificar una región mediante la determinación de coeficientes de diseño sísmico y fronteras óptimos, al considerar uno o más tipos de estructura. En este trabajo se presentan dos métodos que minimizan el costo total debido a la zonación de una región con sismicidad conocida, además de su distribución geográfica del número de estructuras por unidad de área. El método de combinaciones realiza una búsqueda exhaustiva y ordenada entre todas las posibles zonaciones de la región en estudio. Este método emplea criterios discriminatorios que descartan zonaciones como candidatas a la óptima con el objetivo de incrementar su eficiencia. El segundo método es el algoritmo genético, el cual mediante un procedimiento análogo al desarrollado en la selección natural de las especies, encuentra la zonación sísmica óptima de una región. Se presenta también el planteamiento que define el costo total, al considerar la incertidumbre en la ley de atenuación utilizada. Se realizan ejemplos numéricos en los cuales se ocupa la expresión del costo total obtenida y que ilustran las características de los dos métodos propuestos.

# MÉTODOS PARA ZONACIÓN SÍSMICA ÓPTIMA EN VARIAS DIMENSIONES.

## ÍNDICE.

<b>1. Introducción y objetivos</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>5</b>
<b>3. Planteamiento para la evaluación del costo total</b>	<b>9</b>
<b>3.1 Planteamiento general</b>	<b>9</b>
<b>3.2 Coeficientes óptimos, una dimensión</b>	<b>9</b>
<b>3.3 Coeficientes óptimos, varias dimensiones</b>	<b>13</b>
<b>4. Métodos para zonación sísmica óptima</b>	<b>15</b>
<b>4.1 Método de combinaciones</b>	<b>15</b>
4.1.1 Información inicial	
4.1.2 Descripción del método	
<b>4.2 Algoritmo genético</b>	<b>19</b>
4.2.1 Algoritmos genéticos y zonación	
4.2.1.1 Evaluación de la adaptación	
4.2.1.2 Selección de las regiones zonificadas mejor adaptadas	
4.2.1.3 Cruza entre las regiones seleccionadas	
4.2.1.4 Mutación	
4.2.2 Variables que controlan el comportamiento del algoritmo genético	
4.2.3 Convergencia y comportamiento del algoritmo	
4.2.4 Eficiencia del algoritmo genético	
4.2.5 Evaluación de la función objetivo	
<b>5. Resultados</b>	<b>33</b>
<b>5.1 Método de combinaciones</b>	<b>33</b>
5.1.1 Zonación en una dimensión	
5.1.2 Zonación en dos dimensiones	
<b>5.2 Algoritmo genético</b>	<b>34</b>
5.2.1 Zonaciones considerando 751 celdas	
5.2.2 Zonaciones considerando 16 entidades	
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>113</b>
<b>7. Agradecimientos</b>	<b>117</b>
<b>8. Referencias</b>	<b>119</b>
<b>Apéndice 1. Definición del algoritmo genético en un programa de computadora</b>	<b>125</b>
<b>"ALGENETIC"</b>	

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

Los reglamentos de diseño sísmico surgen de la necesidad de regular los parámetros que definen el diseño de estructuras por construir en regiones con cierto nivel de riesgo sísmico. La reglamentación ha recurrido, entre otras formas, a la zonación, es decir, a la división de dicha región en zonas dentro de las cuales se definen parámetros de diseño constantes para todos los tipos de estructuras ahí construidos.

La variación de los parámetros de diseño en la región puede representarse también mediante isosistas. El uso de las isosistas, en la forma que se emplean, introducen ambigüedad al utilizarse en mapas, a menos de que se acompañen de reglas de interpolación. Esto puede superarse con la zonación. Cuando las fronteras óptimas coinciden con límites jurisdiccionales nos referiremos a una zonación con restricciones, de otra forma le llamaremos sin restricciones.

Las variaciones bruscas de los parámetros de diseño que se presentan al zonificar una región implican un incremento en el costo debido a la zonación, el cual depende de los criterios utilizados para realizarla.

El criterio más común es el diseñar las estructuras con los parámetros más desfavorables correspondientes a la zona. Este criterio se justifica en zonas de alta sismicidad.

Existe otro criterio que minimiza el costo total de las estructuras, el cual toma en cuenta tanto el costo inicial como el ocasionado por la ocurrencia de temblores. Aquí la minimización tiene por objeto disminuir los costos inicial y el de los daños ocasionados por sismos. Este criterio es más coherente con argumentos ingenieriles que involucran seguridad y economía. Por esta razón, aquí se emplea el criterio que minimiza el costo total.

En este trabajo se presenta un planteamiento mediante el cual se calcula la esperanza del valor presente del costo total, y en el cual se toma en cuenta la incertidumbre en la ley de atenuación. Las propiedades estructurales se consideran deterministas. Dicho planteamiento supone que el costo está definido por el coeficiente de diseño sísmico y la tasa de excedencia de la intensidad del tipo de estructura en estudio. Así la expresión, obtenida a partir del planteamiento anterior, se emplea para calcular el costo total asociado a una zonación sísmica de una región con sismicidad y densidad estructural conocidas, para los diversos tipos de estructuras considerados. La densidad estructural mencionada se refiere al número de estructuras (o algún otro parámetro que estime dicho número, tal como el área de construcción) por unidad de área de superficie presentes en la región en estudio. El cálculo de la zonación sísmica óptima trata de la determinación de los coeficientes de diseño sísmico y las fronteras interzonales óptimas que minimizan el costo producido en la región por zonificar. Para encontrar la zonación óptima se presentan dos métodos: el de combinaciones y el algoritmo genético.

El primer método busca dicha zonación de manera aleatoria y exhaustiva a través de todas las posibles zonaciones resultado de la asignación de las celdas, constituyentes de la región,

a cada una de dichas zonas. Esta búsqueda implica el cálculo del costo para un número considerable de zonaciones, lo que conlleva un consumo de tiempo de cómputo también considerable. Para mejorar la eficiencia del método se emplearon criterios mediante los cuales se reduce el número de zonaciones a calcular. Estos criterios suponen que la zonación sísmica óptima está constituida de zonas que agrupan celdas con intensidades similares. La zonación óptima es aquella cuyo costo es el menor de todas las zonaciones calculadas en el proceso.

El segundo método presentado es el algoritmo genético. Este algoritmo ocupa procesos de optimización análogos a la selección natural que se presenta en la evolución de los seres vivos. El proceso inicia con la creación, determinista o aleatoria, de varias zonaciones de la región en estudio. Estas zonaciones se someten de manera iterativa a procesos tales como: evaluación del costo, selección, cruce y mutación. Al término de la simulación, si el número de iteraciones es suficiente, los costos de las zonaciones procesadas convergen hacia el óptimo, es decir, se obtiene la zonación óptima correspondiente.

En general, las aportaciones más relevantes realizadas en este trabajo es el desarrollo de un planteamiento mediante el cual se estima el costo total tomando en cuenta la incertidumbre en la ley de atenuación. Además se presenta un programa de cómputo (basado en el algoritmo genético) cuya capacidad y eficiencia de procesamiento permite manejar un número elevado de celdas constituyentes de una región y por lo tanto, hace posible la zonación de cualquier ciudad o área de interés.

En el capítulo 2 del presente trabajo se presenta una revisión bibliográfica de las distintas investigaciones realizadas sobre la optimización de la zonación sísmica. La mayoría de las zonaciones propuestas se efectúan mediante el criterio de diseño con los parámetros más desfavorables presentes en la zona y minimizan el costo ocasionado por zonificar sin utilizar un método riguroso para ello, sino que lo realizan de una manera intuitiva al definir zonas dentro de las cuales se presentan intensidades con valores similares. Estas investigaciones tienen por objetivo principal la determinación de las intensidades máximas probables en la región. Estas intensidades pueden ser las obtenidas en terreno firme o bien aquéllas que son modificadas debido a los efectos de sitio presentes en el lugar. Existen pocos autores que hayan investigado métodos que tengan por objetivo optimizar la zonación sísmica. Estas investigaciones, efectuadas para definir criterios y métodos empleados para encontrar la zonación sísmica óptima, sirvieron de punto de partida para la elaboración del presente trabajo.

En el capítulo 3 se muestra el planteamiento a través del cual se determina la esperanza del valor presente del costo total. El costo total de las estructuras toma en cuenta el costo inicial y el de los daños debidos a la ocurrencia de un evento sísmico. Dicho costo se expresa en función del coeficiente de diseño sísmico y de la tasa de excedencia de la intensidad correspondiente. La esperanza del valor presente del costo total es susceptible a modificaciones debidas a la consideración de diversas incertidumbres que están involucradas en el cálculo del costo

mencionado. Estas incertidumbres están relacionadas con las intensidades (incertidumbres en su ocurrencia, en las distancias focales de los sismos, en la ley de atenuación utilizada), o con las estructuras (incertidumbres en sus propiedades, en el costo de las pérdidas en su contenido) o con otros factores que pudieran afectar el cálculo del costo por zonificar. En nuestro caso, la esperanza del valor presente del costo total toma en cuenta la incertidumbre en la ley de atenuación, suponiendo las intensidades representadas mediante una distribución lognormal con mediana igual a la proporcionada por la ley de atenuación y con varianza definida a partir de trabajos anteriores.

En el capítulo 4 se presentan dos métodos para determinar la zonación sísmica óptima: el método de combinaciones y el algoritmo genético. El método de combinaciones calcula el costo total asociado a todas las zonaciones posibles resultado de la asignación de las celdas, que componen a la región a dividir, a cada una de las zonas consideradas, siendo la óptima aquella con el menor costo. Es decir, este método no tiene un algoritmo de búsqueda del óptimo, sino que tan solo realiza una búsqueda ordenada a través de las distintas combinaciones de celdas que conforman posibles zonaciones. Debido a que la zonación óptima se calcula a través de una búsqueda exhaustiva, se requirió definir criterios mediante los cuales se asociaran celdas (que se supone pertenecen a la misma zona), de manera que se redujera el número de combinaciones posibles. Este método se codificó en un paquete de programación que presenta limitaciones en memoria lo que permite el cálculo de zonaciones de regiones con un número pequeño de celdas constituyentes.

Para aplicar este procedimiento en la definición de la zonación óptima de un problema real se requiere un método más rápido, además de un lenguaje de programación más avanzado que permita el uso de una mayor cantidad de memoria, así como también que sea más eficiente en la elaboración de los cálculos. El algoritmo genético y el lenguaje Visual C++ fueron las soluciones de los problemas anteriores. Este método resuelve la zonación óptima de cualquier región de la cual se conozca su sismicidad y su densidad de los tipos de estructura considerados. El algoritmo ocupa criterios análogos a los utilizados por la naturaleza en la selección natural de las especies para determinar la zonación óptima. El inicio del algoritmo consiste en la creación, determinista o aleatoria, de una población compuesta de individuos los cuales representan distintas zonaciones. Las zonaciones se someten iterativamente a 4 procesos principales: evaluación de la adaptación, selección, cruce y mutación. Los costos de las zonaciones tienden a disminuir conforme avanza la evolución de la población debida a los procesos mencionados. La selección, cruce y mutación están compuestos de subprocesos probabilistas con distribución uniforme.

En el capítulo 5 se presentan ejemplos de zonaciones óptimas obtenidas mediante los dos métodos propuestos. Para el método de combinaciones se realizan dos zonaciones: en 1 y 2 dimensiones. El número de dimensiones indica el número de tipos de estructuras considerados en la zonación correspondiente. Para el caso del algoritmo genético, se resuelven zonaciones en 1, 2,

3 y 4 dimensiones. Hay hasta 4 tipos de estructuras considerados en estos ejemplos. Los ejemplos consisten en determinar todas las zonaciones resultado de las posibles combinaciones de considerar los 4 tipos de estructura empleados. Los datos a partir de los cuales se realizan estos ejemplos, tanto el área de construcción de los tipos de estructura considerados como las intensidades utilizadas, se toman de un modelo propuesto por Ordaz y col (1995).

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas del trabajo y se mencionan algunas recomendaciones para futuros estudios en el tema desarrollado que permitan realizar una estimación más cercana a la realidad de los costos de zonaciones, al tomar en cuenta un mayor número de incertidumbres, así como también para calcular dichos costos de manera más eficiente.

## 2. ANTECEDENTES.

La aplicación de los parámetros de diseño sísmico en una región determinada se realiza generalmente a través de su zonación presentada en el reglamento de construcción correspondiente. La mayoría de los reglamentos actuales utilizan criterios de zonación los cuales diseñan las estructuras con los parámetros más desfavorables presentes dentro de la zona correspondiente. El costo utilizado para este tipo de zonación está asociado al costo inicial de las estructuras. Las fronteras de las zonas establecidas en dichos reglamentos son definidas al asociar áreas de terreno cuyos tipos de subsuelo sean similares, y como consecuencia, las zonas estarán constituidas de áreas donde las intensidades producidas por un evento sísmico son semejantes.

Así, la mayoría de las investigaciones relacionadas al tema tienen por objeto inferir la zonación mediante la determinación de las intensidades máximas esperadas en regiones donde generalmente el riesgo sísmico es alto.

Ejemplos de dichas investigaciones realizadas en el país son: Esteva y Trigos (1976), quienes muestran mapas de riesgo sísmico y de regionalización sísmica para la República Mexicana. Esta regionalización se presentó en el manual de diseño sísmico de Comisión Federal de Electricidad (1976) y la cual sigue presente en la última actualización de dicho manual (1993). Marsal y col (1953) realizaron una microzonación del Distrito Federal a través del conocimiento de las condiciones del subsuelo. Los dos trabajos anteriores fueron de las primeras investigaciones realizadas en la materia. En los últimos años, Iglesias (1989) determina la distribución de intensidades a través de los daños sufridos en las estructuras debidos al sismo de septiembre de 1985, y con base en sus resultados propone una nueva zonación sísmica de la Ciudad de México. El reglamento de construcciones del Distrito Federal, junto con sus normas técnicas complementarias, fueron revisadas en 1993, sin embargo no hay diferencias importantes, en lo concerniente al diseño sísmico, entre éstos y los publicados en 1987. Existen otras investigaciones encaminadas a la estimación de las intensidades que se presentan en la Ciudad de México. Estos trabajos han contribuido a la elaboración de modelos que evalúan el riesgo sísmico en la Ciudad mencionada. Entre estos trabajos se encuentran algunos que estiman sus leyes de atenuación asociadas a sismos de subducción en la costa del Pacífico (Chávez y Castro, 1988; Ordaz y Singh, 1992). Otros estiman los efectos de sitio a partir de excitaciones controladas, tales como microsismos (Lermo y col, 1988; Lermo y Chávez-García, 1994), a partir de la propuesta de modelos de propagación de ondas (Sánchez-Sesma y col, 1993; Chávez-García y Bard, 1993a; Chávez-García y Bard, 1993b; Ordaz y Faccioli, 1994; Chávez-García y Bard, 1994; Avilés y Pérez-Rocha, 1998) y a partir del uso de espectros de amplitudes de Fourier y de la teoría de vibraciones aleatorias (Ordaz y col, 1988; Pérez-Rocha y col, 1991; Ordaz y col, 1993; Singh y col, 1996; Reinoso y Ordaz, 1999; Pérez-Rocha y col, 2000). Los estudios anteriores han contribuido a la elaboración de modelos que evalúan el riesgo sísmico en la Ciudad de México mediante la

estimación de intensidades ocasionadas por sismos fuertes y sus correspondientes daños en las estructuras construidas en la Ciudad (Ordaz y col, 1994; Ordaz y col, 1995; Ordaz y col, 2000). El modelo propuesto por Ordaz y col (1994) clasifica las estructuras construidas en la Ciudad de México en 14 tipos y discretiza a la Ciudad en 751 celdas, dentro de las cuáles se consideran constantes parámetros tales como la intensidad (dada por un espectro de aceleraciones), área de construcción de los tipos de estructura, calidad de las construcciones, entre otros. Si estas celdas se consideran como microzonas, se podría definir una microzonación bastante detallada de la Ciudad de México. Como ejemplos de investigaciones realizadas sobre el tema en otras ciudades de la República Mexicana se tienen las siguientes: Chávez y García-Rubio (1995) proponen una zonación de la zona metropolitana de la Ciudad de Guadalajara en base a las características geotectónicas del suelo, además de una estimación de la vulnerabilidad sísmica existente en las construcciones presentes en el área en estudio. Chávez-García y col (1995) muestran un método de microzonación basado en la evaluación y la distribución geográfica de los efectos de sitio. Este método se ilustra en la microzonación propuesta para las ciudades de Oaxaca y Puebla. Algunos investigadores (Noguez y col, 1997; Osorio y col, 1997; Cruz y col, 1997) han sugerido zonaciones sísmicas para varias ciudades de la República Mexicana mediante la determinación de las propiedades del subsuelo correspondiente mediante registros de vibración ambiental. Chávez y Cuenca (1998) proponen mapas de isoperíodo y de máxima amplificación relativa de la Ciudad de Acapulco, Guerrero, a través del empleo de registros sísmicos fuertes y pequeños, así como también de mediciones de microsismos. Estos mapas se sugieren para mejorar la microzonación actual de dicha ciudad. Resultados de dos investigaciones en los efectos de sitio presentes en la Ciudad de Guadalajara (Chávez y Ramírez, 1998; Chávez, 2000) sugieren modificaciones de su zonación actual.

Las investigaciones realizadas en los últimos años a nivel internacional, sobre el tema son: Gaully y col (1995) quienes presentan una nueva microzonación en Perth, Australia. Esta microzonación se realiza a través de cocientes espectrales obtenidos de microsismos. Abdullah y col (1995) realizan una zonación sísmica de las ciudades más importantes en Jordania a través del cálculo de isosistas de aceleraciones máximas esperadas en terreno firme asociadas a varios periodos de retorno. Los efectos locales presentes en las ciudades en estudio se toman en cuenta para realizar la microzonación. Panza y col (1996) han efectuado investigaciones sobre modelos que definan el movimiento del terreno tomando en cuenta la heterogeneidad lateral, las propiedades de la fuente y de la propagación de ondas. A partir de dichos modelos se propone el cálculo de microzonaciones de las regiones en estudio. Cardona y Yamin (1997) evalúan el riesgo sísmico y presentan una microzonación para la Ciudad de Bogotá, Colombia, realizados mediante estudios de laboratorio de dinámica de suelos, análisis de registros sísmicos recientes y mediciones de microsismos.

El criterio de zonación hasta ahora utilizado por los reglamentos (justificado en zonas de alta sismicidad) no toma en cuenta una disminución de los costos ocasionados por la zonación mediante el cálculo de fronteras y coeficientes de diseño óptimos. Algunos investigadores han llevado a cabo trabajos encaminados a establecer los criterios y procedimientos de cálculo para obtener una zonación sísmica óptima.

Los primeros trabajos sobre el tema fueron realizados por Rosenblueth (1977) y Grandori (1977). El tema fue retomado con mayor vigor y menos limitaciones en investigaciones posteriores (García-Pérez, 1994; Rosenblueth y García-Pérez, 1994). En estos trabajos se estudia la zonación sísmica óptima para el caso reducible a una dimensión y cuando el costo de la zonación considera la esperanza del valor presente del costo inicial. En este caso, los parámetros de diseño asignados a una zona son los más desfavorables presentes en ella. Aquí, la optimación consiste en hallar las fronteras interzonales que minimizan el desperdicio producido por la zonación. Se presentan los casos con y sin restricción en el establecimiento de dichas fronteras. Las restricciones mencionadas se refieren a los casos en que las fronteras tienen que coincidir con líneas preestablecidas (generalmente con límites jurisdiccionales) para facilitar su reglamentación. Los métodos propuestos para obtener la zonación óptima son análogos a los empleados en la optimación de catálogos de productos estandarizados. Se demuestra que en caso de fronteras interzonales sin restricciones, las óptimas coinciden con curvas de intensidad constante (García-Pérez y Rosenblueth, 1994a).

Así mismo, se estudia la zonación sísmica óptima cuando se minimiza la esperanza del valor presente del costo total y el problema es tratable en una dimensión. El costo total toma en cuenta el costo inicial y los daños por sismo. Para resolver este caso se extienden los criterios propuestos cuando se considera el costo inicial. La optimación, en este caso, consiste en hallar los coeficientes de diseño y las fronteras interzonales óptimas que minimizan el costo total debido a la zonación. Se tratan los problemas con y sin restricción en la posición de las fronteras. Se demuestra que para el caso del costo total, el criterio de optimación consiste en que sean iguales entre sí los costos totales unitarios de estructuras construidas a ambos lados de una frontera sin restricciones, que dichas fronteras coinciden con curvas de sismicidad constante y que el planteamiento unidimensional puede extenderse al caso en que habrá diversos tipos de estructura siempre que se cumplan con ciertas condiciones entre sus costos unitarios y entre los números de estructuras que se construirán de cada tipo. Para resolver el problema se presenta un método iterativo y uno de perturbaciones (García-Pérez y Rosenblueth, 1994b).

También se estudian los casos en que los problemas no pueden reducirse en una sola dimensión. Se tratan las zonaciones con fronteras que se establecen con o sin restricciones, cuyos costos toman en cuenta el costo inicial o el total. Se consideran los casos en dos dimensiones para los cuales se proponen diferentes métodos de solución obtenidos a partir de aquéllos presentados en el caso de una dimensión (García-Pérez y Rosenblueth, 1995).

Se establece una forma para evaluar la esperanza del valor presente de los costos totales (costos iniciales y de los daños producidos por los sismos) que considera que los sismos son originados por un proceso múltiple de Poisson, sin considerar las incertidumbres en las leyes de atenuación, ni en las propiedades estructurales. Los costos así obtenidos se utilizan para calcular las zonaciones óptimas según los criterios establecidos en trabajos anteriores (García-Pérez, 2000). Análogamente al trabajo anterior en García-Pérez y col (1999) se propone una forma similar que evalúa la esperanza del valor presente de los costos totales (costos iniciales y los daños producidos por los sismos), excepto que aquí se incluye la incertidumbre en la ley de atenuación. En esta última investigación, se realizan ejemplos de zonaciones utilizando dicha forma según los criterios definidos en trabajos anteriores.

Las investigaciones mencionadas y relacionadas con la determinación de criterios y métodos para el cálculo de la zonación sísmica óptima son tomadas como punto de partida para la realización del presente trabajo.

### 3. PLANTEAMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DEL COSTO TOTAL.

El costo total de una estructura toma en cuenta los costos iniciales, los costos de daños estructurales producidos por sismos y los costos por impacto social, es decir, el costo total comprende todos los daños económicos directos, indirectos y no económicos que los sismos producen en la sociedad. El planteamiento utilizado para obtener una expresión que evalúe la esperanza del valor presente del costo total de las estructuras supone que los sismos son originados por un proceso múltiple de Poisson, y que las intensidades se consideran descritas mediante una distribución lognormal con mediana igual a aquella proporcionada por la ley de atenuación y una desviación estándar obtenida de Ordaz y col (1989); las propiedades estructurales se consideran sin incertidumbre. Este planteamiento complementa con la incertidumbre en la ley de atenuación a aquél desarrollado por García-Pérez (1994).

#### 3.1 PLANTEAMIENTO GENERAL.

Si  $x, y$  representan las coordenadas de un punto en la región que se desea zonificar y denotamos al tipo de estructura como  $i=1, \dots, I$  y a la zona como  $k=1, \dots, K$ . Si además hacemos que  $z=z(x, y)$  represente el valor de la sismicidad, definida por las demandas de coeficiente de corte basal (en este trabajo se consideran las ordenadas del espectro de aceleraciones expresadas en términos de la aceleración de la gravedad) y por sus tasas de excedencia; que  $c$  sea el vector de los coeficientes de diseño adoptados,  $w=w(c, z)$  la esperanza del valor presente del costo total unitario,  $\phi=\phi(x, y)$  la esperanza del valor presente del número de estructuras, y  $W$  la esperanza del valor presente del costo total de todas las estructuras. Entonces  $W_{ik} = \iint_k \phi_i w_i dx dy$ ,

$$W_k = \sum_{i=1}^I W_{ik}, \quad W = \sum_{k=1}^K W_k. \quad \text{El problema consiste en minimizar } W.$$

#### 3.2 COEFICIENTES ÓPTIMOS, UNA DIMENSIÓN.

El costo inicial es el costo ocasionado por construir la estructura en estudio; por lo tanto, se considera como función del coeficiente sísmico  $c$  empleado en el diseño de dicha estructura y se define por:

$$\begin{aligned} u(c) &= [1 + \alpha_2 (c - c_0)^{\alpha_1}] C & \text{si } c \geq c_0 \\ u(c) &= C & \text{si } c < c_0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

donde  $C$  es el costo inicial y  $c_0$  la resistencia lateral para el caso en que la estructura no se diseñara para resistir sismos.  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  son constantes.

La esperanza del valor presente del costo inicial por unidad de área está dado por:

$$\bar{u}(c) = \phi u(c) \quad (3.2)$$

donde  $\phi(x,y)$  es la esperanza del valor presente del número de estructuras por unidad de área que se construirán en la región en estudio y está definida por  $\phi(x,y) = \int_0^{\infty} \psi(x,y,t) e^{-\gamma t} dt$  donde

$\psi(x,y,t)$  es una función que indica la variación de  $\phi$  por unidad de tiempo, y  $\gamma$  es la tasa de descuento, que en el presente trabajo se considera constante.

El costo de los daños ocasionados por los sismos  $L_z$  se puede dividir en dos grupos: el primero ( $L_{z1}$ ) toma en cuenta los daños materiales producidos en la estructura y el segundo ( $L_{z2}$ ) abarca los daños económicos indirectos (daños en elementos no estructurales, contenido de la estructura, impacto en la economía de la región) y los no económicos (impacto social, pérdida de vidas humanas), de manera que  $L_z = L_{z1} + L_{z2}$ . Estos costos se consideran función del coeficiente de diseño sísmico  $c$  empleado y la intensidad solicitada  $z$ .

Si la tasa de ocurrencia de un sismo de intensidad  $z$  está dada por  $\kappa(z) = -d\mu/dz$ , donde  $\mu(z)$  es la tasa de excedencia de  $z$ , y además se supone la restitución de la estructura a su condición original después de cada temblor, así como también que los temblores son originados por un proceso múltiple de Poisson; entonces la esperanza del valor presente de las pérdidas debidas a todos los sismos  $v$  en una estructura en el instante  $t=0$  resultan igual a:

$$v = \frac{1}{\gamma} \int_0^{z_m} L_z \kappa(z) dz \quad (3.3)$$

donde  $z_m$  es la intensidad máxima que puede ocurrir en el sitio en estudio.

Análogamente al costo inicial, la esperanza del valor presente de las pérdidas debidas a un sismo  $\bar{v}$  en todas las estructuras construidas en el área en estudio es igual a:

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v \psi(t) e^{-\gamma t} dt = \frac{\phi}{\gamma} \int_0^{z_m} L_z \kappa(z) dz \quad (3.4)$$

La expresión que define  $L_z$  es resultado de la suma de los daños materiales en la estructura ( $L_{z1}$ ) y los daños económicos indirectos y sociales ( $L_{z2}$ ). La función que define los daños materiales en la estructura se propone de la forma  $L_{z1} = u \xi(c,z)$ , donde  $\xi(c,z)$  debe ser creciente

con  $z$  y decreciente al aumentar  $c$ , de manera que  $\lim_{z \rightarrow 0} \xi = 0$  y  $\lim_{z \rightarrow \infty} \xi = 1$ . Además, se sabe que los daños producidos por sismos de baja intensidad son nulos, por lo que  $\xi$  debe tender rápidamente a cero cuando la intensidad  $z$  tienda a cero. Los costos asociados a  $L_{z2}$  deben ser pequeños cuando  $z$  tiende a cero, ya que no existen daños en el contenido y en elementos no estructurales de los edificios. Sin embargo, cuando  $\xi$  tiende a uno, los valores de  $L_{z2}$  deben ser superiores a los costos  $L_{z1}$  ya que en esta situación se tienen pérdidas de vidas humanas, del contenido de los edificios y caos en la economía de la región. Así, estos costos se definen mediante  $L_{z2} = ub\xi^2(c,z)$ , donde  $b$  es una constante considerablemente mayor que uno. El comportamiento del costo obtenido al sumar ambos términos ( $L_{z1} + L_{z2}$ ) corresponden al anteriormente descrito, es decir, cuando los valores de  $\xi(c,z)$  son pequeños, el valor de  $L_{z2}$  es despreciable ( $\xi^2(c,z) \rightarrow 0$ ). Mientras que para valores de  $\xi(c,z)$  que tiendan a uno el valor del costo total puede llegar a  $L_z = L_{z1} + L_{z2} = (1+b)u$ . Por lo tanto los costos ocasionados por sismos se expresan mediante:

$$L_z = L_{z1} + L_{z2} = u\xi(c,z)[1 + b\xi(c,z)] \quad (3.5)$$

donde la función  $\xi(c,z)$  se toma de García-Pérez (1994) y se define como  $\xi(c,z) = \xi(z/c) = \xi(\zeta)$ :  $\xi(\zeta) = 0.025\zeta^6 - 0.015\zeta^9$  si  $\zeta \leq 1$  y  $\xi(\zeta) = (0.188 + \zeta^{1.8}) / (117.8 + \zeta^{1.8})$  si  $\zeta > 1$ .

Si la tasa de ocurrencia de los sismos con intensidad  $z$  se define por  $\kappa(z) = -d\mu/dz$  donde  $\mu(z)$  es la tasa de excedencia de  $z$  y se calcula mediante:

$$\mu(z) = \int_{M_o}^{M_u} \left( -\frac{d\lambda(M)}{dM} \right) P[Z > z | M, R] dM \quad (3.6)$$

donde  $M_o$  y  $M_u$  son los límites superior e inferior del intervalo de las magnitudes involucradas en el proceso sísmico,  $\lambda(M)$  es la tasa de excedencia de las magnitudes de los temblores considerados,  $P[Z > z | M, R]$  es la probabilidad de ocurrencia de un sismo con intensidad mayor que  $z$ , conocidas la magnitud  $M$  y la distancia  $R$  de la fuente al sitio en estudio.

La tasa de excedencia de las magnitudes de los sismos que se originan en una provincia tectónica se considera igual a (Cornell y Vanmarcke, 1969):

$$\lambda(M) = \alpha_1 (e^{-\beta M} - e^{-\beta M_m}) \quad (3.7)$$

donde  $M$  se refiere a la magnitud que se calcula su tasa de excedencia,  $M_m$  el valor máximo de  $M$  que puede ocurrir en la provincia;  $\alpha_1$  y  $\beta$  son constantes. Por lo tanto el término  $-d\lambda(M)/dM$  requerido en la expresión 3.6 es igual a:

$$-d\lambda(M) / dM = \alpha_1 \beta e^{-\beta M} \quad (3.8)$$

Para definir la distribución condicional de  $z$  dado  $M$  y  $R$ , se supone que está determinada por una lognormal con mediana igual a la ley de atenuación. Esta ley se considera igual a  $z = aR^2 e^{\beta M}$ , donde  $a$  y  $\beta$  son variables que dependen del periodo fundamental de vibración de la estructura  $T$ , y de su posición  $x, y$ . Así se tiene que al relacionar la variable aleatoria  $Z$  con una  $X$  definida por una distribución normal estándar acumulada resulta:

$$P[Z > z | M, R] = \Phi(X) \quad (3.9)$$

donde  $X = (\ln(aR^2) - \ln z + \beta M) / \sigma_{\ln z}$ . La desviación estándar del  $\ln(z)$  se toma de Ordaz y col (1989) y se considera igual a 0.7. Al sustituir las expresiones 3.8 y 3.9 en 3.6, la tasa de excedencia de  $z$  queda definida por:

$$\mu(z) = \int_{M_o}^{M_u} \alpha_1 \beta e^{-\beta M} \Phi(X) dM \quad (3.10)$$

La tasa de ocurrencia de la intensidad  $z$  se obtiene al derivar, según el Teorema de Leibnitz, el negativo de la expresión 3.10, que resulta:

$$\kappa(z) = \int_{M_o}^{M_u} \frac{\alpha_5}{z} \exp[-\beta M - X^2 / 2] dM \quad (3.11)$$

donde  $\alpha_5 = \alpha_4 / (\sqrt{2\pi} \sigma_{\ln z})$ , y  $\alpha_4 = \alpha_1 \beta$ . Sustituyendo las expresiones 3.5 y 3.11 en 3.4 se tiene que la esperanza del valor presente de las pérdidas por sismo en todas las estructuras construidas en el área en cuestión está dada por:

$$\bar{v} = \frac{\phi u \alpha_5}{\gamma} \int_0^{M_u} \int_{M_o}^z \frac{1}{z} \xi(z/c) [1 + b \xi(z/c)] \exp[-\beta M - X^2 / 2] dM dz \quad (3.12)$$

que con el cambio de variable  $\zeta = z/c$  se convierte en:

$$\bar{v} = \frac{\phi u \alpha_5}{\gamma} \int_0^{\zeta_u^{M_u}} \int_{M_o}^{\zeta} \frac{1}{\zeta} \xi(\zeta) [1 + b \xi(\zeta)] \exp[-\beta M - Y^2 / 2] dM d\zeta \quad (3.13)$$

donde  $Y = (\ln(aR^2) - \ln \zeta - \ln c + \beta M) / \sigma_{\ln z}$  y  $\zeta_u = z_u / c$ .

Una vez conocidas las fronteras, el costo total  $W_k$  asociado a una zona  $k$  se define como:

$$W_k = u_k [(F_k - F_{(k-1)}) + (G_k - G_{(k-1)})] \quad (3.14)$$

donde

$$F_k = \iint \phi(x, y) dx dy \quad \text{y} \quad G_k = \iint \frac{\phi \alpha_5}{\gamma} \int_{M_o}^{\zeta_u^{M_u}} \frac{\xi(\zeta)}{\zeta} [1 + b \xi(\zeta)] \exp[-\beta M - Y^2 / 2] dM d\zeta dx dy$$

Los términos  $F_k$  están relacionados al costo inicial de las estructuras, mientras que los  $G_k$  se asocian a los costos indirectos y sociales debidos a la ocurrencia de un sismo. Las sumatorias cubren el área en que  $c \leq c_k$ . El coeficiente óptimo  $c_k$  se calcula numéricamente de tal forma que  $W_k$  sea mínimo. Esta expresión toma en cuenta la incertidumbre en la ley de atenuación para evaluar la esperanza del valor presente de los costos totales de las estructuras dada una intensidad  $z$ , con su tasa de excedencia correspondiente, y un coeficiente de diseño sísmico  $c$ .

Una forma alterna para considerar los efectos de sitio que afectan a las intensidades  $z$  es tomar un punto de referencia con intensidad  $z_0$ , asociado al periodo  $T=0$  (que en adelante se denomina como  $T_0$ ) y coordenadas  $x_0, y_0$ , del cuál se conocen sus coeficientes  $a_0$  y  $\beta'_0$ . Si se suponen constantes y deterministas los factores de amplificación  $H_{0xy}$  y  $H_{Txy}$  que se definen según:

$$H_{0xy} = \frac{z(T_0, x, y)}{z(T_0, x_0, y_0)} = \frac{z_{0xy}}{z_0} \quad H_{Txy} = \frac{z(T, x, y)}{z(T_0, x, y)} = \frac{z}{z_{0xy}} \quad (3.15)$$

donde  $z_{0xy}$  es la aceleración del suelo en el punto  $x, y$ . Entonces se puede demostrar que  $P[Z > z | M, R] = P[Z_0 > z_0 | M, R] = \Phi(X_0)$  (3.16)

donde  $X_0 = [\ln(a_0 R^{-2}) - \ln(z / ((H_{Txy})(H_{0xy}))) + \beta'_0 M] / \sigma_{\ln z_0}$ . Los factores de amplificación  $H_{0xy}$  y  $H_{Txy}$ , así definidos, desprecian efectos no lineales de sitio, así como también su dependencia al origen y mecanismo de la fuente sísmica.

El planteamiento para el cálculo del costo total utilizando esta alternativa se obtiene al desarrollar el procedimiento descrito, pero sustituyendo la expresión 3.9 por la 3.16.

### 3.3 COEFICIENTES ÓPTIMOS, VARIAS DIMENSIONES.

Se supone la división en  $K$  zonas de una región constituidas por  $J$  celdas dentro de las cuales existen  $I$  tipos de estructuras. Si cada celda fuera una zona, el costo inicial de la estructura tipo  $i$  en el punto  $x, y$  dentro de la celda  $j$  sería  $u_i(c_{ij})$ , donde  $c_{ij}$  sería el vector de los parámetros de diseño para el tipo  $i$  en esta celda. La esperanza del valor presente de todas las estructuras tipo  $i$  por unidad de área sería:

$$\bar{u}_i(c_{ij}) = \phi_i(x, y) u_i(c_{ij}) \quad (3.17)$$

donde  $\phi_i(x, y) = \int_0^{\infty} \psi_i(x, y, t) e^{-\gamma t} dt$ , siendo  $\psi_i(x, y, t)$  igual al número esperado de estructuras

tipo  $i$  que se construirán en el punto  $x, y$  por unidad de área y por unidad de tiempo y  $\gamma$  es la tasa de descuento.

Siguiendo un procedimiento análogo al caso en una dimensión, la esperanza del valor presente de las pérdidas ocasionadas por todos los temblores está dado por:

$$\bar{v}_i = \frac{\phi_i u_i(c_{ij}) \alpha_s}{\gamma} \int_0^{\zeta_m} \int_{M_0}^{\zeta_m} \frac{1}{\zeta} \xi(\zeta) [1 + b \xi(\zeta)] \exp[-\beta M - Y^2 / 2] dM d\zeta \quad (3.18)$$

donde las variables anteriores se definieron en el caso de una dimensión. Combinando las ecuaciones 3.17 y 3.18, e integrando encontramos el valor esperado de todos los tipos  $i$  que se construirán en el área correspondiente a la celda  $j$ , si dicha celda fuera una zona:

$$W_j(c_{ij}, z_j) = \iint_j [\bar{u}_i(c_{ij}) + \bar{v}_i(c_{ij}, z_j)] dx dy \quad (3.19)$$

Para el caso de que la celda  $j$  sea asignada a la zona  $k$ , el costo de la celda  $j$  está dado por la expresión 3.19 cuando se sustituye en ella  $c_{ij}$  por el  $c_{ik}$  correspondiente. Así, si la zona  $k$  está constituida por  $N$  de las  $J$  celdas que componen a la región, entonces el costo asociado a dicha zona  $k$  se define como:

$$W_{ik} = u_{ik} [F_{ik} + G_{ik}] \quad (3.20)$$

donde

$$F_{ik} = \iint_N \phi_{in}(x, y) dx dy \quad \text{y} \quad G_{ik} = \iint_N \frac{\phi_{in} \alpha_s}{\gamma} \int_0^{\zeta_m} \int_{M_0}^{\zeta_m} \frac{\xi(\zeta)}{\zeta_{in}} [1 + b \xi(\zeta)] \exp[-\beta M - Y^2 / 2] dM d\zeta dx dy$$

Análogamente al caso de una dimensión, los términos  $F_{ik}$  están relacionados al costo inicial de las estructuras, mientras que los  $G_{ik}$  se asocian a los costos indirectos y sociales debidos a la ocurrencia de un sismo. Las sumatorias cubren el área correspondiente a las  $N$  celdas que constituyen a la zona  $k$ .

La expresión 3.20 es análoga a la expresión 3.14, correspondiente al caso en una dimensión, y ambas son empleadas para evaluar el costo por zonificar en los ejemplos realizados en el presente trabajo.

Para considerar los efectos de sitio mediante factores de amplificación  $H_{0xy}$  y  $H_{Txy}$  en el planteamiento para varias dimensiones, se tienen que realizar las modificaciones pertinentes en el procedimiento anterior, similares al caso en una dimensión, al emplear las expresiones 3.15 y 3.16.

## 4. MÉTODOS PARA ZONACIÓN SÍSMICA ÓPTIMA.

En este capítulo se presentan dos métodos empleados para determinar la zonación óptima de un región con sismicidad y densidad estructural conocidas. El primer método propuesto es el de combinaciones, el cual realiza una búsqueda exhaustiva y ordenada de la zonación óptima entre todas las zonaciones posibles de la región en estudio. El segundo método está basado en el algoritmo genético. Este algoritmo utiliza procesos análogos a los desarrollados por la naturaleza en la selección natural para calcular la zonación óptima.

### 4.1 MÉTODO DE COMBINACIONES.

A continuación se describe el método de combinaciones empleado para encontrar la zonación sísmica óptima de cualquier región con sismicidad conocida. La búsqueda de la óptima se realiza mediante el cálculo de los costos asociados a cada una de las zonaciones posibles en la región, siendo la óptima aquella cuyo costo asociado es el menor de todos los obtenidos. La zonación se representa mediante un vector cuyos elementos definen las celdas constituyentes de la región y, por lo tanto, los valores que pueden tomar dichos elementos son los números de las zonas en que se divide la región. La enumeración de las zonaciones a calcular se realiza de manera análoga a la contabilidad del kilometraje de un vehículo mediante un odómetro, es decir, si se desea zonificar una región compuesta de 4 celdas en tres zonas, la primera zonación a calcular sería {0,0,0,0}. Así, las zonaciones siguientes obtenidas para determinar su costo serían: {0,0,0,1}; {0,0,0,2}; {0,0,1,0}; {0,0,1,1} y así sucesivamente.

Este método efectúa una búsqueda ordenada y exhaustiva de la zonación óptima dentro del dominio correspondiente, por lo que se asegura que la zonación encontrada es la óptima solo cuando se han calculado todas las zonaciones posibles. Esto implica que se deben realizar un gran número (igual al de combinaciones posibles) de evaluaciones del costo en zonaciones, aún cuando la región esté compuesta de una pequeña cantidad de celdas.

Para generalizar el presente método a regiones de tamaño moderado (regiones constituidas hasta por 20 celdas) se definieron dos criterios mediante los cuales se reduce el número de zonaciones posibles de una región dada.

El primer criterio consiste en agrupar celdas con intensidades similares antes de someterlas al método de combinaciones, y se basa en estudios previos (García-Pérez, 1994). En dichos estudios se obtiene que la zonación óptima consiste de zonas que agrupan celdas con intensidades similares, siempre que la expresión que evalúa el costo total de las estructuras sea función continua, creciente con la intensidad y decreciente con los coeficientes de diseño. Las celdas así agrupadas se consideran como una sola al emplear el método de combinaciones, con lo cual se reduce el número de zonaciones posibles. Esta agrupación se efectúa mediante la

construcción de una matriz de similitud en la cual básicamente se calculan las diferencias entre las intensidades que constituyen a la región.

El segundo criterio también se basa en la premisa anterior y genera zonas constituidas por las agrupaciones de celdas que comparten intensidades semejantes, cuyas diferencias no fueron lo suficientemente pequeñas para agruparse entre ellas según el primer criterio. Este segundo criterio utiliza una matriz de combinaciones mediante la cual se indican los grupos de celdas candidatos a formar una zona.

#### 4.1.1 INFORMACIÓN INICIAL.

Para realizar el cálculo de la zonación sísmica óptima de una región es necesario conocer las intensidades y el número de estructuras del tipo en cuestión. Así se requieren dos vectores por cada tipo de estructura considerado en la zonación. En el presente trabajo se identifica a cada uno de los tipos de estructura  $i$  empleados mediante un periodo fundamental característico  $T_i$ . La intensidad utilizada es  $z_{ij}=Sa_{ij}/g$ , donde  $Sa_{ij}$  es la ordenada del espectro de aceleraciones (asociado a un periodo de retomo) ocurrido en la celda  $j$  y correspondiente al periodo fundamental de vibración  $T_i$ ;  $g$  es la aceleración de la gravedad. Ya que el método busca en todas las zonaciones, su eficiencia se incrementa al disminuir el número de zonaciones posible mediante la agrupación de celdas con intensidades similares. Para agrupar dichas celdas se construye una matriz de similitud.

Esta matriz de similitud relaciona su número de columna y fila con el número de celda. Los valores, que constituyen a la matriz, pueden ser cero o uno si la diferencia es mayor o menor, respectivamente, a la tolerancia empleada. La tolerancia se define a partir de la menor diferencia existente entre intensidades, correspondientes a un mismo tipo de estructura, de las celdas a agrupar. En caso de que existan celdas que no resulta evidente a cual grupo asociar, se sugiere dejarlas solas para que el método realice su inclusión en la zona donde genere el menor costo. Por ejemplo, si se tiene un vector de intensidades igual a  $\{0.3, 0.4, 0.8\}$ , la matriz de similitud resultante, para una tolerancia inicial de  $0.4-0.3=0.1$ , se muestra en la tabla 4.1. En este caso es evidente que las celdas con intensidades 0.3 y 0.4 son las que se asocian mediante dicha matriz, y en la cual se identifican mediante el valor 1 en las casillas correspondientes.

En caso de que se considere más de un tipo de estructura en la zonación, la matriz anterior se construye a partir de la comparación de las intensidades de cada uno de los tipos de estructuras en cuestión, es decir, si dos celdas se agrupan significa que los  $I$  pares de intensidades involucrados son similares entre ellos, donde  $I$  es el número de tipos de estructura considerados en la zonación.

Para cada una de las agrupaciones realizadas se determina una intensidad y número de estructuras equivalentes. La intensidad equivalente se define de manera que produzca el mismo

costo que el obtenido al utilizar las celdas agrupadas. El número de estructuras equivalente es igual a la suma de los números asociados a las celdas agrupadas.

Así se obtienen los pares de vectores asociados a la intensidad y al número de estructuras equivalentes utilizados para calcular la zonación sísmica óptima.

#### 4.1.2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO.

El método de combinaciones busca la zonación óptima en todas las zonaciones posibles de la región en estudio, es decir, este método calcula el costo de todas las zonaciones posibles y encuentra a la óptima al identificar aquella con el menor costo de todas ellas. Para hacer más eficiente este método se definen criterios que discriminan zonaciones que no reúnen las características necesarias para ser la zonación óptima.

El programa de aplicación realizado a partir del presente método se codificó en el paquete de programación MATLAB (1993). Este programa requiere como información inicial los pares de vectores que representen la intensidad y el número del tipo de estructura considerado. Estos vectores son resultado de las entidades obtenidas al agrupar celdas con intensidad similar.

Además del criterio de agrupación mencionado, se utiliza otro mediante el cual se reduce el número de zonaciones posibles y así agilizar el cálculo de la zonación óptima. Este criterio aprovecha la similitud existente entre intensidades de tres o más celdas, las cuales no se asociaron porque sus diferencias entre ellas son semejantes y pertenecen a celdas (o agrupaciones de celdas) distintas. Debido a que la zonación óptima debe asociar a dos o más celdas del conjunto de celdas en cuestión, entonces el criterio agrupa en una zona a las combinaciones posibles de considerar dos o más celdas del conjunto mencionado. La identificación de las celdas que constituyen dichos conjuntos se realiza a través de la matriz de combinaciones.

La matriz de combinaciones está formada por  $K-1$  vectores, donde  $K$  es el número de zonas en que se desea dividir la región en estudio. Cada vector está compuesto por  $J$  elementos, los cuales representan las  $J$  celdas que constituyen a la región. Estos elementos pueden tomar los valores uno o cero, los cuales indican si la celda correspondiente es o no considerada para la asociación entre celdas. Por ejemplo, si se tiene una región compuesta de 5 celdas y el vector  $k$  de la matriz de combinaciones resulta igual a  $\{0,1,1,0,1\}$ , implica que la zona  $k$  será resultado de la combinación, al considerar una, dos o tres, de las celdas número 2, 3 y/o 5. Se supone que las diferencias entre las intensidades de estas celdas son menores que las obtenidas entre éstas y las celdas 1 y 4. La última zona se compone de todas las celdas que no hayan sido tomadas en cuenta en las primeras  $K-1$  zonas de la zonación correspondiente. Una celda puede ser considerada candidata para constituir más de una zona, es decir, su valor correspondiente puede

ser uno en más de un vector. Ningún vector puede tener sólo ceros ya que eso implicaría una zona vacía, así como también no pueden existir vectores iguales, ya que las posibles configuraciones corresponderían a una misma zona. La configuración de una zona se refiere a las celdas que la constituyen.

Las zonaciones posibles se obtienen con el siguiente algoritmo:

- a) Se asignan las celdas que constituyen a la zona 1. Las celdas consideradas son aquellas cuyos valores correspondientes en el primer vector de la matriz de combinaciones es uno. Las primeras configuraciones de la zona 1 estarán constituidas de una sola celda; el número de celdas constituyentes se incrementa gradualmente hasta igualar al número de celdas con valor igual a uno en el primer vector.
- b) Una vez definida una configuración en la zona 1, se realiza el mismo procedimiento para la zona 2, descartando las celdas elegidas para la primera. Este procedimiento se repite hasta definir las configuraciones correspondientes a las primeras  $K-1$  zonas. Las celdas no seleccionadas se consideran para formar la última zona, y de esta manera se obtiene la primera zonación.
- c) Para calcular las distintas zonaciones se mantienen constantes las configuraciones de las primeras  $K-2$  zonas, y se calculan todas las configuraciones posibles de la zona  $K-1$ . Las celdas no consideradas en las primeras  $K-1$  zonas, se asignan a la zona restante.
- d) Se realiza nuevamente el inciso c) para todas las configuraciones posibles de la zona  $K-2$ , es decir, se modificará la configuración correspondiente a la zona  $K-2$ , una vez que se hayan realizado todas las configuraciones de la zona  $K-1$  para dicha configuración de la zona  $K-2$ .
- e) Se repite el inciso d) hasta alcanzar las primeras  $K-3$  zonas, es decir, se modificará la configuración de una zona, cuando se hayan generado todas las configuraciones posibles de las zonas posteriores. Este proceso es análogo al de un odómetro de un vehículo, cuando las decenas de los kilómetros medidos no avanza hasta que se haya terminado el ciclo de las unidades, luego las centenas no avanzan hasta que se haya terminado el ciclo de las decenas, y así sucesivamente. Aquí las posiciones de las unidades, decenas, centenas, ....., se toma como las configuraciones de las  $K$  zonas, y el intervalo del 0-9 de cada una de ellas está dado por el número de configuraciones posibles de cada una de las zonas.
- f) Una vez que se realizaron todas las posibles zonaciones en el inciso d) y e), se inicia de nuevo el proceso a)-f), pero ahora empleando una nueva matriz de combinaciones resultado del intercambio de columnas (entre ellas mismas) y de filas (entre ellas) de una manera ordenada, lo cual asegura el cálculo de todas las zonaciones posibles.

El cálculo del costo asociado a cada una de las zonaciones se realiza mediante el procedimiento descrito en la sección "4.2.5 EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO". El diagrama de flujo correspondiente al método de combinaciones se presenta en la fig. 4.1.

## 4.2 ALGORITMO GENÉTICO.

En la búsqueda de métodos de optimación para resolver el problema de la zonación sísmica óptima se encontró el algoritmo genético. Dicho algoritmo es flexible debido a la independencia existente entre el proceso de optimación y la función que se quiere optimar. Lo anterior brinda la libertad de manejar distintas funciones que definan la esperanza del valor presente del costo considerado debido a la zonación. Dichas funciones varían dependiendo de las variables consideradas en el cálculo de los costos (por ejemplo, costos iniciales, de mantenimiento, por impacto social, por el contenido de edificios). Este algoritmo es general ya que optimiza todo tipo de funciones con diferentes niveles de eficiencia (Goldberg, 1989). Hay algunas funciones cuyo comportamiento dificulta encontrar el óptimo de los óptimos (máximo o mínimo, según sea el caso). Entre dichas funciones se encuentran aquellas que presentan discontinuidades y/o varios óptimos locales. Existen métodos de optimación los cuales no pueden calcular el óptimo o se estancan en alguno de los óptimos locales. En cambio, cuando el algoritmo genético encuentra alguno de los comportamientos mencionados disminuye su eficiencia, pero con un mayor número de iteraciones inevitablemente converge hacia el óptimo de los óptimos.

En un trabajo realizado por Montoya-Dulché y Vitiello (1996) se presenta un algoritmo genético. Las diferencias entre dicho algoritmo y el presente son el costo que calculan y la cantidad de celdas que manejan. El algoritmo adaptado en dicho trabajo determina la zonación sísmica óptima de una región constituida por 100 celdas, calculando su costo inicial y considerando un solo tipo de estructura. Mientras que el algoritmo aquí presentado puede calcular la zonación óptima de una región con 751 celdas, mediante la evaluación del costo total considerando hasta 4 tipos de estructuras. No se pueden encontrar otras diferencias ya que en ese trabajo no se menciona mayores detalles sobre el algoritmo empleado.

### 4.2.1 ALGORITMOS GENÉTICOS Y ZONACIÓN.

Los algoritmos genéticos son procesos que para la optimación de un sistema utilizan criterios análogos a los desarrollados en la naturaleza para la selección natural de las especies mejor adaptadas durante su evolución. Así, los principales procesos que constituyen al algoritmo genético son: evaluación de la adaptación, selección, cruce y mutación.

El algoritmo genético inicia con la creación de una población constituida por un conjunto de cromosomas. Los cromosomas son vectores que contienen la información de los parámetros necesarios para la función que se desea optimar (función objetivo). A los elementos que constituyen el vector se les conoce como genes y a los posibles valores que puede adquirir cada

gen se les llama alelos. Dicha creación puede ser aleatoria, determinista o una combinación de ambas.

El problema de zonificar una región de sismicidad conocida se resuelve mediante un algoritmo genético considerando al cromosoma como la región zonificada, la cual está constituida de celdas (que pueden ser delegaciones, o entidades definidas por calles u otros límites jurisdiccionales) representadas por los genes y que se asocian a ellas según su posición en el cromosoma. A dichas celdas se les asigna un número (alelo) que corresponde a la zona a la cual pertenece. Por ejemplo, si se tiene una región constituida por 4 celdas que se quiere dividir en dos zonas, un cromosoma que corresponde a este ejemplo puede ser {1,2,1,2} donde la primera y tercera celda corresponden a la primera zona y las restantes a la segunda. En adelante se hará referencia indistinta a los cromosomas como regiones zonificadas, genes como celdas y alelo como número de zona asignada a la celda. La función objetivo está definida por la función que calcula la esperanza del valor presente del costo ocasionado por zonificar.

#### *4.2.1.1 Evaluación de la adaptación.*

En el caso de la zonación sísmica, la adaptación se define como la esperanza del valor presente del costo (en el presente trabajo se considera el costo total) asociado a una región zonificada (cromosoma). El valor generado por la función objetivo a partir de la región zonificada utilizada es su correspondiente adaptación. La evaluación de la adaptación requiere de la traducción de la región zonificada (cromosoma) para que la función objetivo la pueda interpretar, es decir, el formato de la información de la región zonificada requerida por la función objetivo es diferente del formato en que se guarda la región zonificada y que emplea el algoritmo genético. En nuestro caso la región zonificada (cromosoma) se guarda en sistema binario para mejorar la eficiencia del algoritmo (ver "4.2.4 EFICIENCIA DEL ALGORITMO GENÉTICO"). Debido a esto se requiere traducir dicha región del sistema binario a valores en el sistema decimal que resulta el formato en el cual se maneja la información requerida por la función objetivo.

El algoritmo requiere la evaluación del costo (adaptación) de cada una de las regiones zonificadas que constituyen a la población para definir las probabilidades de supervivencia a la siguiente generación de cada una de las regiones zonificadas que constituyen a la población. Así mismo, el algoritmo requiere que los costos (adaptaciones) sean directamente proporcionales a la probabilidad de supervivencia, por lo que dichos costos tienen que ser primeramente modificados por: tipo de optimación y escalamiento.

#### *Tipo de optimación.*

El tipo de optimación indica si se busca el mínimo o el máximo de la función. El planteamiento aquí utilizado requiere la minimización de una función (aquella que evalúa la esperanza del valor presente del costo total de la región zonificada) para obtener la zonación

sísmica óptima, sin embargo existe la alternativa de encontrar dicha zonación mediante la búsqueda del máximo de una función apropiadamente definida.

En caso de que se maximice la función, las probabilidades de supervivencia son directamente proporcionales a los costos (adaptaciones) calculados, es decir, tiene una mayor probabilidad de supervivencia aquella región zonificada cuyo costo sea el mayor dentro de su población. Por otra parte si lo que se desea es el mínimo de la función, la probabilidad de supervivencia de una región zonificada (cromosoma) será directamente proporcional a la diferencia entre el costo máximo obtenido en la población y el costo correspondiente a la región zonificada en cuestión, y así la región con el menor costo en la población tendrá la mayor probabilidad de supervivencia. El empleo de este criterio genera una región zonificada con un costo modificado igual a cero (aquel correspondiente al máximo); por lo tanto su probabilidad de supervivencia sería cero y se perdería dicho ejemplar en subsecuentes generaciones. Esta pérdida resulta a partir de un criterio trivial e implica que en cada generación exista una región zonificada que se pierde. Para evitar lo anterior en nuestro caso se eligió, en lugar de restar el costo máximo, 1.03 veces dicho costo (adaptación), con lo cual el menor costo modificado resultante es 3% del costo máximo. Con esto se asegura la diversidad y se consigue una probabilidad de supervivencia pequeña (diferente de cero) para la región "inadaptada".

#### *Escalamiento.*

Las modificaciones debidas al escalamiento se refieren a ajustes en los valores de los costos mediante una ley lineal. Estos ajustes tienen por objeto equilibrar las diferencias en los costos obtenidos en una generación. Este equilibrio evita la predominación rápida de una región zonificada bien adaptada en generaciones subsecuentes. Esta predominación sucede generalmente en dos casos:

- a) Al inicio o durante una simulación puede aparecer una región zonificada mejor adaptada que las demás y que predomine en la simulación. Esto produce que la búsqueda del óptimo tienda a instalarse en la parte de la función donde se encuentre la región mejor adaptada, que no necesariamente es la parte en donde se encuentra la óptima general. En este caso el equilibrio de las diferencias significa disminuirlas para evitar la predominación y acelerar la convergencia a la óptima general.
- b) Cuando una población ha sufrido una evolución a través de un número suficiente de generaciones, las regiones zonificadas tienden a tener características semejantes y por lo tanto, también sus costos correspondientes. En este caso el escalamiento modifica los costos de manera que las diferencias entre éstos sean mayores y así se acelere la convergencia de la simulación.

La ley lineal se obtiene de manera que ambos conjuntos de valores, los costos ( $Fa$ ) y sus valores ajustados ( $F'a$ ), cumplan las dos condiciones siguientes:

$$F'a_{med} = Fa_{med} \quad (4.1)$$

$$F'a_{max} = \eta Fa_{max} \quad (4.2)$$

donde:  $F'a = \rho Fa + \omega$  son los valores modificados de los costos (adaptaciones) debido al escalamiento mediante una ley lineal.  $\eta$  es una constante que representa el número esperado de regiones zonificadas (cromosomas) de la mejor adaptada que sobrevivirán para las siguientes etapas.  $\rho$ ,  $\omega$  son constantes definidas de manera que se cumplan las dos condiciones mencionadas. En el presente trabajo se definen como:

$$\rho = (\eta Fa_{max} - Fa_{med}) / (Fa_{max} - Fa_{med}) \quad (4.3)$$

$$\omega = (1 - \eta) Fa_{max} Fa_{med} / (Fa_{max} - Fa_{med}) \quad (4.4)$$

$Fa_{med}$ ,  $F'a_{med}$  son la media de los valores de los costos, sin modificar y modificados respectivamente, correspondientes a la población en estudio.  $Fa_{max}$ ,  $F'a_{max}$  son los valores de los costos máximos, sin modificar y modificados respectivamente, correspondientes a la población en estudio.

Definido así el ajuste se presenta el problema de que algún costo ajustado llegue a tomar un valor menor que cero, lo cual es inadmisibles ya que con estos valores se calculan las probabilidades de supervivencia de la región zonificada. La alternativa elegida para resolver este problema es asignar una probabilidad igual a cero.

#### 4.2.1.2 Selección de las regiones zonificadas mejor adaptadas.

En esta parte se realiza la selección de las regiones zonificadas, las que de aquí en adelante denominaremos sólo regiones, en función de su probabilidad de supervivencia que serán elegidas para su posterior cruce. La probabilidad de supervivencia de cada región es proporcional al valor de su costo modificado.

Una vez modificados los costos por tipo de optimación y escalamiento, las probabilidades de supervivencia se calculan normalizando dichos costos por la suma de los costos correspondientes a todas las regiones que conforman la población. La selección se realiza mediante la generación de números aleatorios en el intervalo [0,1] con distribución uniforme, los cuales definen a la región elegida según la localización de dicho número en un vector que contiene las probabilidades acumuladas de las regiones que componen la población. Por ejemplo, si se tienen tres regiones que componen a la población y sus probabilidades son respectivamente 0.6, 0.3 y 0.1, entonces, el vector de probabilidades acumuladas sería  $\{(1-0.6), (1-0.6-0.3), (1-0.6-0.3-0.1)\} = \{0.4, 0.1, 0.0\}$ . Si el número aleatorio generado es 0.3, entonces la región seleccionada sería la número 2. En la selección es posible que haya regiones que desaparezcan y otras que tengan más de un representante para los pasos siguientes. Así, se sustituyen las regiones no seleccionadas por aquellas que hayan sido elegidas en más de una ocasión.

#### 4.2.1.3 Cruza entre las regiones seleccionadas.

Una vez seleccionadas las regiones, la población resultante se somete al proceso de cruce, que consiste de tres pasos:

- a) Se seleccionan en función de la probabilidad de cruce, previamente definida, parejas de regiones.
- b) Se definen de manera aleatoria con distribución uniforme el número de la primer celda y el número de celdas a partir de la primera que serán intercambiadas entre dichas parejas de regiones. Este último está comprendido entre uno y el número de las celdas que constituyen a la región menos uno.
- c) Se realiza la cruce entre las dos regiones elegidas. Esto implica que ambas regiones intercambiarán la parte de la región definida en el inciso b), por ejemplo, si se tienen dos regiones definidas por 4 celdas y zonificadas en dos zonas: {1,2,1,2} y {2,1,2,1}, y se cruzan entre ellas, siendo la primer celda la número 2 y el número de celdas a intercambiar igual a 3, las regiones "hijas" resultarían: {1,1,2,1} y {2,2,1,2}.

Para que todas las celdas que constituyen a la región tengan la misma probabilidad de ser intercambiadas, se considera que la región zonificada (cromosoma) es circular, es decir, posterior al último elemento se encuentra el primero. Del ejemplo anterior, si la primer celda es la 3 y el número de celdas a intercambiar son 3, entonces considerando a la región zonificada circular se intercambiarán las celdas número 3,4 y 1; así, las regiones "hijas" resultarían: {2,2,2,1} y {1,1,1,2}.

#### 4.2.1.4 Mutación.

La mutación en general consiste en el cambio del valor de un elemento que forma parte de una región zonificada (cromosoma). La elección de la región y de su elemento correspondiente a mutar depende de la probabilidad de mutación, definida al inicio de la simulación y constante durante todo el proceso. Este paso tiene el objetivo de mantener la diversidad en la población, con el fin de buscar en lugares nuevos dentro de la función objetivo (aquella que calcula el costo).

Con la población resultante se evalúan sus costos y se repite el proceso descrito hasta este punto (exceptuando el génesis de la población), tantas veces como número de generaciones se hayan definido. Al final de la simulación se obtiene la zonación óptima, resultado de todas las generaciones realizadas.

#### 4.2.2 VARIABLES QUE CONTROLAN EL COMPORTAMIENTO DEL ALGORITMO GENÉTICO.

Las variables principales, definidas al inicio del algoritmo, que lo controlan son:

- a) El número de regiones que constituyen a la población y el número de generaciones a realizar que generalmente son a elección del usuario, tomando en cuenta que entre mayor sea el número de ambas variables, menor será la incertidumbre del óptimo encontrado de la función

objetivo al finalizar la simulación, pero mayor será el tiempo de cómputo empleado por evolución.

- b) El número de celdas y el número de zonas en las que se divide la región, que dependen de la región en estudio.
- c) La probabilidad de cruce y la probabilidad de mutación definen la probabilidad de que una región zonificada (cromosoma) participe en el proceso llamado cruce y la probabilidad de que una de las celdas de la población se mute (cambie de valor), respectivamente. Estos valores controlan el comportamiento y la rapidez de convergencia del algoritmo y permanecen constantes durante la simulación. Goldberg (1989) recomienda el valor de 0.6 para la probabilidad de cruce, y para la probabilidad de mutación, el inverso del número de celdas que componen a la población, es decir, el inverso del producto del número de regiones que componen la población y el número de celdas que componen a cada región. La probabilidad de mutación así definida implica que por lo menos una región se muta cada generación. El valor de la probabilidad de cruce sólo se justifica mediante la experiencia (Goldberg, 1989) y depende de la función a optimizar. Es por esto que se realizaron calibraciones de ambos valores mediante la realización de ejemplos numéricos relacionados con la zonación sísmica.

Los valores sugeridos por Goldberg (1989) de las probabilidades anteriores fueron estudiados, en nuestro caso, mediante ejemplos numéricos aplicados al problema de zonación, en los cuales se observó el impacto que tenían dichas probabilidades en el comportamiento y la convergencia de la simulación utilizando el presente algoritmo. De dichos ejemplos se nota que el impacto del cambio en el valor de la probabilidad de cruce no ofrece ventajas ya que no se presentan cambios definidos en el comportamiento ni en la convergencia de la simulación. En el presente trabajo dicha probabilidad se consideró igual a 0.6. En cuanto a la probabilidad de mutación se observó que mediante esta variable se puede llegar a tener un mejor control del comportamiento y de la convergencia de la simulación. El valor obtenido para esta probabilidad se discute dentro del apéndice 1, sección "A.7 FUNCIÓN MUTACIÓN".

#### 4.2.3 CONVERGENCIA Y COMPORTAMIENTO DEL ALGORITMO.

La convergencia y comportamiento del algoritmo son descritos principalmente por dos variables: el costo (adaptación) medio y el costo óptimo obtenidos en cada generación. El tipo de convergencia y comportamiento deseados en estas variables dependen de la función objetivo. Para el caso de la zonación se modificó principalmente el valor de la probabilidad de mutación y las variables que controlan el escalamiento de la función, de manera que se obtuviera la convergencia en el costo medio, además de que los costos mínimos obtenidos sobrevivieran una o dos generaciones posteriores a su aparición de manera que el algoritmo buscara puntos alrededor del mínimo encontrado donde la función probablemente proporcionará valores menores a los obtenidos.

#### 4.2.4 EFICIENCIA DEL ALGORITMO GENÉTICO.

La hipótesis de los bloques constructores ("building block hypothesis") es una de las que mejor explica la eficiencia del algoritmo genético (Goldberg, 1989). Esta hipótesis indica que la eficiencia del algoritmo se basa en la elaboración de patrones de información dentro de la región zonificada (cromosoma), los cuales se van enriqueciendo mediante un gran número de combinaciones realizadas entre ellos durante la simulación y prevalecen los predominantes conforme la simulación converge. Los patrones de información se refieren a conjuntos de  $n$  genes (celdas) definidos dentro de las regiones (cromosomas), cuyas combinaciones resultan en la región con zonación óptima buscada. Entre menos sean las celdas que constituyan un patrón y más próximas se encuentren entre ellas es más probable que sobrevivan a los procesos del algoritmo genético. Conforme la simulación converge, hay ciertos patrones que empiezan a prevalecer en la mayoría de las regiones (cromosomas). Dichos patrones, a su vez, son resultado de la combinación de muchos otros patrones obtenidos en la simulación. Esto significa que la eficacia del algoritmo aumenta cuando el número de alelos (número de zonas en que se divide la región) utiliza un alfabeto con el menor número posible de caracteres. Por lo cual el alfabeto idóneo para el algoritmo es el sistema binario. En el caso de la zonación, lo anterior implica la traducción de las regiones en sistema binario a un sistema decimal para que la función objetivo obtenga el número de zona asignado a cada celda correspondiente.

La eficacia mencionada en el método se observa en su utilización para el cálculo de ejemplos numéricos de zonaciones óptimas bajo criterios sísmicos considerando distintas funciones que evalúan los costos debidos a la zonación considerando distintas características. Por ejemplo, en una región de 16 celdas a dividir en 4 zonas, se tiene un número posible de zonaciones igual a  $4^{16}/4!$ . La convergencia del algoritmo (con población inicial aleatoria) se alcanza para cuando se han realizado aproximadamente  $4^{5.3}$  zonaciones. La relación entre el número de zonaciones calculadas y el número de zonaciones posibles, que en nuestro caso resulta  $(4^{5.3})(4!)/4^{16} = 8.67 \cdot 10^{-6}$ , es un indicador de la eficiencia con que se obtiene el óptimo de los óptimos.

#### 4.2.5 EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO.

Se supone que se tiene una región con sismicidad conocida constituida por  $J$  celdas la cual se desea dividir en  $K$  zonas. En la región se considera la existencia de  $I$  tipos de estructuras, cada uno de ellos caracterizados por su periodo fundamental de vibración  $T_i$ , y cada zona está constituida de  $N_k$  celdas, de manera que  $\sum_{k=1}^K N_k = J$ . La forma de la función que evalúa la esperanza del valor presente de los daños debidos a la zonación por cada estructura es  $w(c,z)$

donde:  $c$  es el coeficiente de diseño sísmico asignado a la estructura.  $z$  es una medida de la intensidad demandada a la estructura, que en el presente trabajo se considera como las ordenadas máximas del espectro de aceleraciones, para un periodo de retomo dado, normalizadas por la aceleración de la gravedad.

Por lo tanto, el costo por zonificar asociado a una zona  $k$  y a un tipo de estructura  $i$  está dado por:

$$W_{ik} = \sum_{j=1}^{N_k} w(c_{ik}, z_{ij}) \phi_j(x, y) \quad (4.5)$$

donde:  $W_{ik}$  es el costo por zonificar asociado a las estructuras del tipo  $i$  que se encuentran en la zona  $k$ ,  $w(c_{ik}, z_{ij})$  es el costo por unidad de área de la estructura por zonificar con un coeficiente  $c_{ik}$  y una demanda de intensidad  $z_{ij}$  asociada al periodo  $T_i$  del tipo de estructura  $i$  que se encuentra en la celda  $j$ .  $\phi_j(x, y)$  es la esperanza del valor presente del número por celda de las estructuras tipo  $i$  que se erigirán en la zona  $k$  y que dependen de las coordenadas geográficas  $x, y$  donde se encuentran dichas estructuras. Estos valores se suponen constantes en la celda  $j$  considerada.

Obtenidos los coeficientes correspondientes a las otras zonas, se calcula el costo de la región por zonificar mediante:

$$W_i = \sum_{k=1}^K W_{ik} \quad (4.6)$$

donde:  $W_i$  es el costo por zonación de la región en estudio considerando el tipo de estructura  $i$ .

En caso de que se consideren varios tipos de estructuras, el costo por zonación estaría dado por:

$$W = \sum_{i=1}^I W_i \quad (4.7)$$

donde:  $W$  es el costo por zonación de la región en estudio considerando  $I$  tipos de estructuras.

Cualquiera que sea el costo considerado ( $W$  o  $W_i$ ), el resultado de las simulaciones deberá ser el costo mínimo producido por zonificar una región de sismicidad conocida en  $K$  zonas considerando  $I$  tipos de estructuras.

El algoritmo genético requiere como información inicial un par de vectores por cada tipo de estructura, uno conteniendo la información sobre el número de estructuras  $\phi_j(x, y)$  y el otro sobre las intensidades  $z_{ij}$  correspondientes al periodo  $T_i$  del tipo de estructura  $i$  y celda  $j$  considerados. De la expresión (4.5) se observa que lo que resta para el cálculo de  $W_{ik}$  es el coeficiente  $c_{ik}$ .

El cálculo del coeficiente de diseño sísmico correspondiente a una zona se realiza de manera que dicho coeficiente resulte el óptimo, es decir, es el coeficiente que causa el costo mínimo debido a la zonación. El valor del coeficiente mencionado es aquel que cumple con la condición:

$$\partial W_{ik} / \partial \hat{\alpha}_{ik} = \partial / \partial \hat{\alpha}_{ik} \left[ \sum_{j=1}^{N_k} w(c_{ik}, z_{ij}) \phi_{ij}(x, y) \right] = 0 \quad (4.8)$$

Es posible la existencia de varias raíces de  $c_{ik}$  que cumplan con la condición anterior, en cuyo caso se seleccionará la raíz que cause el menor costo  $W_{ik}$ . Por la complejidad de las expresiones que definen a  $w(c, z)$ , la solución de la condición anterior se realiza de manera numérica. El procedimiento realizado consiste en el cálculo de la expresión anterior para un vector de valores de coeficientes definidos en un intervalo de valores dentro del cual se considera que se encuentra el coeficiente óptimo de diseño. En dicho vector se localizan los puntos donde se satisface la expresión 4.8 y de ellos se determina el valor del coeficiente óptimo  $c_{ik}$ .

La expresión que define al costo  $w(c_{ik}, z_{ij})$  se obtiene a partir de las expresiones 3.14 y 3.20, según sea el caso de aplicación.

El algoritmo aquí descrito se define en un programa de computadora detallado en el apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla 4.1 Matriz de similitud para un vector de intensidades {0.3, 0.4, 0.8}

Z tipo est 1 (Sa/g)	No entidad	1	2	3
0.3	1	1	1	
0.4	2	1	1	
0.8	3			1
	Tol $Z_1=0.1$			

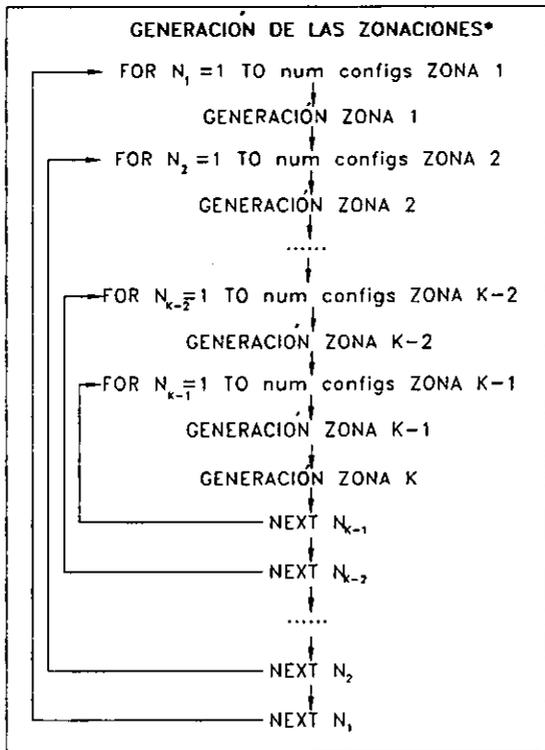
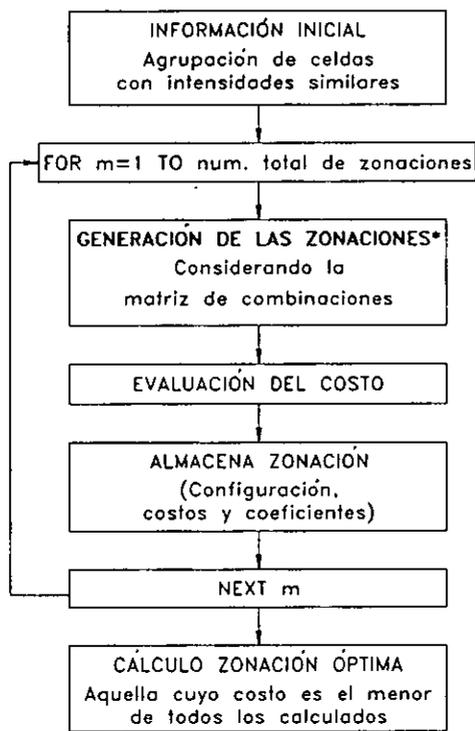


Fig. 4.1 Diagrama de flujo. Método de combinaciones.

## 5. RESULTADOS.

### 5.1 MÉTODO DE COMBINACIONES.

#### 5.1.1 ZONACIÓN EN UNA DIMENSIÓN.

En la figura 5.1 se muestra la región a zonificar de aproximadamente 1600 Km<sup>2</sup>. En dicha figura se observa la variación geográfica del número de estructuras por unidad de área y la intensidad en la región que se desea dividir en tres zonas. No existen restricciones para definir las fronteras de las zonas.

Para definir la información relativa al número de estructuras del tipo considerado, así como la relacionada con su intensidad, se discretiza la región en celdas, según se observa en la figura 5.2, dentro de las cuales se consideran constantes las dos características mencionadas. Los datos resultantes de dicha discretización se muestran en la tabla 5.1. Al asociar las celdas que presentan la misma intensidad, los datos se pueden resumir en 9 elementos (tabla 5.2), a partir de los cuales se calcula la zonación sísmica óptima.

Las intensidades utilizadas se consideran las ordenadas del espectro de aceleraciones (correspondientes a un periodo de retomo y normalizadas por la aceleración de la gravedad) asociadas al periodo fundamental de vibración del tipo de estructura en cuestión.

La esperanza del valor presente del costo total por zonificar se calcula mediante las expresiones 4.5 - 4.7. Los valores, empleados en todos los ejemplos del presente capítulo, de las variables relacionadas con la función que calcula la esperanza del valor presente de los costos totales debidos a la zonación se muestran en la tabla 5.3. El comportamiento de la esperanza del valor presente del costo total unitario  $w(c,z)$ , obtenido a partir de las expresiones 3.14 y 3.20, para distintos valores de  $c$  y  $z$  se observa en la figura 5.3. En esta figura se tiene que  $w(c,z)$  es monótonamente creciente cuando aumentan los valores de la intensidad  $z$  y decreciente conforme aumentan los valores de los coeficientes  $c$  entre 0.05 y 0.17, intervalo que comprende a los valores de los coeficientes óptimos de diseño asociados a las zonaciones óptimas de los ejemplos realizados. Este comportamiento implica que la zonación óptima está constituida de zonas que agrupan celdas con intensidades similares.

La zonación óptima resultante al aplicar el método de combinaciones, con el algoritmo detallado en la sección 4.1.2 y mostrado en la figura 4.1, se presenta en la figura 5.4 y en la tabla 5.4.

#### 5.1.2 ZONACIÓN EN DOS DIMENSIONES.

En la figura 5.5 se muestra una región de área aproximada de 1040 Km<sup>2</sup>. En ella se observa la distribución geográfica de la sismicidad ( $z_1$  y  $z_2$ ) y el número de estructuras por unidad

de área de los dos tipos considerados (para este ejemplo,  $\phi_1 = \phi_2$ ), así como también la división política de la misma (16 entidades).

Análogamente al caso en una dimensión, la región se discretiza en celdas dentro de las cuales la intensidad y el número de los dos tipos de estructura empleados se consideran constantes, como se muestra en las figuras 5.6. La información obtenida a partir de la discretización se presenta en la tabla 5.5.

La región se divide en tres zonas cuyas fronteras deben coincidir con las líneas que definen la división política. Por lo anterior se calcula una intensidad y un número de estructuras equivalentes que sean constantes dentro de cada entidad política. La intensidad equivalente se determina de tal manera que produzca el mismo costo que aquél obtenido al utilizar todas las celdas que componen a la entidad política en cuestión. El número de estructuras por unidad de área equivalente es la suma de dicho número asociado a todas las celdas que se encuentran dentro de dicha entidad. Los valores así calculados para todas las entidades se muestran en la tabla 5.6. El número de estructuras se considera igual para los dos tipos estructurales en estudio.

Al igual que en el caso de una dimensión, las intensidades se refieren a las ordenadas del espectro de aceleraciones, normalizadas por la gravedad, correspondientes a un periodo de retorno y la esperanza del valor presente del costo total por zonificar se define mediante las expresiones 4.5 - 4.7.

Antes de aplicar los datos al método de combinaciones, se asocian las entidades cuyas intensidades equivalentes son similares. Para realizar dicha asociación, se construye su matriz de similitud (Tabla 5.7) en donde se comparan las intensidades y se asocian aquellas entidades que presenten diferencias dentro de la tolerancia. Esta tolerancia se define inicialmente al encontrar la menor diferencia en las intensidades de la región en estudio, y luego se incrementa gradualmente de manera que entidades no agrupadas puedan relacionarse con aquellas con intensidad similar. Habrá algunas entidades que no resulte evidente su agrupación con el resto de ellas, en cuyo caso se sugiere dejar dicha entidad sin agrupar. En la tabla 5.8 se muestran las agrupaciones de entidades resultantes. Las entidades asociadas se considera que pertenecen a la misma zona en los procesos subsecuentes.

Con los datos anteriores se aplica el método de combinaciones, siguiendo el algoritmo detallado en la sección 4.1.2 y representado en la figura 4.1. La zonación sísmica óptima calculada se presenta en la figura 5.7 y en la tabla 5.9.

## 5.2 ALGORITMO GENÉTICO.

La figura 5.8 muestra una región de aproximadamente 1040 Km<sup>2</sup>. En dicha figura se observan los tipos de suelos presentes en la región, su división política y la localización de las 751 celdas consideradas en el estudio. Las estructuras, construidas dentro de dichas celdas, se agrupan en cuatro tipos caracterizados por su periodo fundamental de vibración (Tabla 5.10). Los

datos de áreas de construcción e intensidad, y características de los cuatro tipos estructurales, correspondientes a la región en estudio se obtienen de Ordaz y col (1994). Estos datos se encuentran discretizados en 751 celdas, cuya distribución se observa en la figura 5.8.

Para las zonaciones calculadas mediante el algoritmo genético, la densidad estructural en la región en estudio se estima mediante el área construida de cada uno de los  $I$  tipos de estructura considerados. Esto implica que para evaluar la esperanza del valor presente del costo inicial  $\bar{u}$  en la expresión 3.2 se define  $\phi$  como la esperanza del valor presente del área construida por unidad de superficie y el costo inicial  $u(c)$  se calcula mediante la ecuación 3.1, al sustituir  $C$  por  $C_A$ , donde  $C_A$  es el costo inicial por unidad de área construida del tipo de estructura en cuestión. La esperanza del valor presente del costo total, en el caso de una dimensión, se determina mediante la ecuación 3.14, al tomar en cuenta las modificaciones anteriores. Para la evaluación del costo total en el caso de varias dimensiones, modificaciones análogas a las anteriores se realizan en las expresiones 3.17 y 3.20. La variación de las áreas de construcción y de las intensidades en la región para cada tipo de estructura se muestra en las figuras 5.9 - 5.16.

Los tipos de estructura considerados no se encuentran presentes en las 751 celdas en que se discretizó la región en estudio. Para buscar la zonación óptima de una manera más eficiente, se descartaron aquellas celdas en las cuales el área de construcción correspondiente es nula. El número de celdas empleado para cada una de las zonaciones realizadas se encuentra en la tabla 5.11.

La esperanza del valor presente del costo total por zonificar se define mediante las expresiones 4.5 - 4.7.

Es necesario mencionar que con fines ilustrativos y por limitaciones de información para la solución de los ejemplos propuestos mediante el algoritmo genético, los costos se calcularon a partir de intensidades que corresponden a ordenadas del espectro de aceleraciones obtenidas al considerar un escenario sísmico en el modelo propuesto por Ordaz y col (1995). Según el planteamiento para evaluar el costo total, mencionado en el capítulo 3, estos costos deben ser resultado de tomar en cuenta todos los sismos que ocurran a partir del tiempo en que las estructuras se construyan en la región en estudio. El escenario propuesto es un sismo procedente de Guerrero con  $M_s=8.2$  y  $R=280$  Km, considerado como característico de la región. Si se supone que la mayor contribución a los daños es ocasionado por sismos de características similares al propuesto, entonces se concluye que los costos obtenidos en los ejemplos resueltos son aproximaciones aceptables a los que se obtendrían si se tomaran en cuenta todos los sismos. En la solución de problemas reales, las tasas de excedencia de las intensidades deben de considerar la suma de las contribuciones a dichas intensidades ocasionadas por la actividad de todas las fuentes que afectan el peligro sísmico de la región en estudio. Por otro lado, en los ejemplos resueltos se ocupó un par de valores de los parámetros  $\alpha_0$  y  $\beta_0'$ , asociados a la ley de atenuación

empleada  $z = aR^2 e^{\beta M}$ , siendo que existen un conjunto de valores de dichos parámetros,  $\alpha = \alpha(T_i, x_j, y_j)$  y  $\beta = \beta(T_i, x_j, y_j)$ , para cada una de las 751 celdas y por tipo de estructura  $i$ , caracterizado por su período de vibración  $T_i$ ;  $x_j, y_j$  son las coordenadas geográficas de la celda  $j$ . Esto se realizó debido a la falta de información necesaria para la estimación de estos parámetros. Sin embargo, el procedimiento empleado toma en cuenta los efectos de sitio si se consideran factores de amplificación  $H_{a,xy}$  y  $H_{T,xy}$  (expresión 3.15), como se describió en el capítulo 3. En los ejemplos resueltos dichos factores de amplificación se consideran unitarios.

Las intensidades utilizadas se definen como  $z_{ij} = S_{a,ij}/g$ , donde  $S_{a,ij}$  es la ordenada del espectro de aceleraciones asociada al período fundamental de vibración  $T_i$  (influenciado por el tipo de terreno donde se desplanta) del tipo de estructura  $i$  ocurrida en la celda  $j$ , y  $g$  es la aceleración de la gravedad. Se consideró como terreno firme el tipo I, y como blando los tipos II y III (Ver figura 5.8).

La zonación se efectúa considerando dos casos: en el primero se toma en cuenta las 751 celdas para realizar la zonación y en el segundo sólo las 16 entidades políticas que componen a la región en estudio (ver figura 5.8). Se calculan ambos casos para observar sus discrepancias, las cuales se supone que en el primero (751 celdas, zonación sin restricción en las fronteras) produzcan un menor costo, pero más ambigüedad en su aplicación que en el segundo (16 entidades, zonación con restricción en las fronteras). La intensidad utilizada en el segundo caso es aquella que produce el mismo costo óptimo que el obtenido al considerar todas las celdas que se encuentran dentro de la entidad considerada, además que la suma de las áreas de construcción de estas celdas es el valor del área de construcción asociada a cada entidad.

La región en estudio se divide en cuatro zonas y se presentan los casos en 1, 2, 3 y 4 dimensiones utilizando los cuatro tipos de estructura considerados.

### 5.2.1 ZONACIONES CONSIDERANDO 751 CELDAS.

Los valores de las variables, asociadas al comportamiento del algoritmo genético y empleados en estos ejemplos, se muestran en las tablas 5.12 y 5.13.

En la figura 5.17 se observa la zonación óptima resultante en una dimensión para el tipo de estructura 1. La convergencia de los costos óptimos y medios de la población en la simulación asociados a dicha zonación se presenta en la figura 5.18. Sus costos y coeficientes óptimos obtenidos se presentan en la tabla 5.14. La información correspondiente a las zonaciones óptimas realizadas en 1, 2, 3 y 4 dimensiones, resultado de las combinaciones posible entre los cuatro tipos de estructuras considerados, se presenta en las figuras 5.19 - 5.32.

Las zonaciones resultantes en una dimensión muestran una tendencia de agrupación de celdas con intensidades similares y cuyas distribuciones tienden a seguir las isosistas de dichas

intensidades (figuras 5.13 - 5.16). Dicha tendencia resulta más evidente entre más grande es la relación entre el número de zonaciones realizadas en la simulación y el número de zonaciones posibles en la región en estudio. Esto se observa en la zonación realizada considerando el tipo de estructura 7, una dimensión (figuras 5.16 y 5.21), en la cual la correspondencia entre las isosistas y la zonación es mayor que en la zonación obtenida considerando el tipo 1, una dimensión, (figuras 5.13 y 5.17) debido a que la relación entre las zonaciones realizadas y posibles es mayor en el primer caso que en el segundo  $((80)(500)/4^{80}=4^{-72}>(100)(270)/4^{679}=4^{-671}$ , respectivamente).

Las zonaciones en más de una dimensión son resultado de la combinación de las zonaciones obtenidas en una dimensión de los tipos de estructura empleados, predominando aquellas que aporten más al costo total de los tipos considerados. Dado el gran número de celdas utilizadas es difícil distinguir el comportamiento anterior. En todas las zonaciones presentadas se observa una agrupación de celdas que conforman una zona en el lado este (terreno firme) de la región en estudio.

En la figura 5.33 se grafica el valor medio de los coeficientes con respecto al número de dimensiones para cada uno de los tipos estructurales considerados. Para el caso de una dimensión, este valor medio se obtiene al pesar los coeficientes, asociados a cada una de las zonas, con sus correspondientes costos. Para el caso de más de una dimensión, se obtiene el valor medio mediante un procedimiento similar que toma en cuenta todas las zonaciones en que participa el tipo de estructura en estudio. En dicha figura se muestra que la variación de los coeficientes asociados al mismo tipo de estructura al realizar la zonación en una o varias dimensiones es de milésimas, ésto debido a que las diferencias existentes entre las configuraciones de las zonaciones correspondientes no afectan de manera significativa el valor óptimo de dichos coeficientes. La configuración de una zona se refiere a las celdas (o entidades) que la constituyen.

Se tiene que los costos óptimos asociados a un tipo de estructura será menor en el caso de una dimensión y aumentará conforme se incremente el número de dimensiones de la zonación, siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- a) La función que calcula la esperanza del valor presente del costo total es continua y monótonamente creciente con la intensidad, así como monótonamente decreciente con los coeficientes de diseño óptimos. Esto se cumple para el intervalo de valores de las intensidades empleadas y de los coeficientes de diseño óptimos obtenidos en las zonaciones óptimas calculadas (Ver figura 5.3).
- b) Los costos totales de los tipos de estructura involucrados en la zonación son semejantes, además que la distribución geográfica de sus densidades estructurales son diferentes. Esto implica que las fronteras óptimas de la zonación en más de una dimensión no coinciden con las obtenidas en las zonaciones en una dimensión de alguno de los tipos de estructura

considerados ya que dichas fronteras resultan ser una combinación de las obtenidas en una dimensión.

Si los costos óptimos resultantes obedecen el comportamiento anterior se supone que las zonaciones realizadas presentan un mismo nivel de optimación. Dicho comportamiento se obtiene en todos los casos (ver figura 5.34) con excepción del correspondiente al tipo de estructura 1, donde se observa un decremento del valor de los coeficientes conforme se incrementa el número de dimensiones (figura 5.33a). Este comportamiento anómalo se obtiene también en sus costos correspondientes (figura 5.34a). La causa de ambas disminuciones es por un número insuficiente de iteraciones realizadas, lo cual motivó un bajo nivel de optimación para el caso del tipo de estructura 1. Esto se comprueba en la figura 5.34a), en donde se tiene que los costos obtenidos en zonaciones con restricciones en la frontera (16 entidades) es menor que los correspondientes a aquéllas sin restricciones en la frontera (751 celdas), lo cual implica un bajo nivel de optimación en las zonaciones considerando 751 celdas.

Se considera que aún cuando se hubiera obtenido la zonación óptima de las óptimas de los tipos de estructura en estudio, su aplicación sería difícil, ya que no coincide con límites jurisdiccionales que permitan su fácil reglamentación. Por lo tanto, como un segundo caso se considera la zonación de tan sólo 16 entidades que representan las divisiones políticas de la región en estudio.

### **5.2.2 ZONACIONES CONSIDERANDO 16 ENTIDADES.**

Los valores de las variables, asociadas al comportamiento del algoritmo genético y empleadas en estas zonaciones, se muestran en las tablas 5.12 y 5.15.

Las intensidades utilizadas en estos ejemplos y asociadas a cada una de las entidades se definen a partir de las intensidades correspondientes a las celdas que se encuentran dentro de dichas entidades. Estas intensidades equivalentes son aquellas que producen el mismo costo óptimo que el obtenido al tomar en cuenta todas las celdas que están dentro de la entidad en cuestión; así mismo, la suma de las áreas de construcción de estas celdas es el valor del área de construcción equivalente asociada a cada entidad. La tabla 5.16 muestra los valores equivalentes de las áreas de construcción y de las intensidades determinadas para las 16 entidades. En dicha tabla se observa que hay tipos de estructura que no están presentes en todas las entidades (por ejemplo, tabla 5.16b, tipo de estructura 2, entidad 16)

En las figuras 5.35 y 5.36 se presentan la zonación y la convergencia de los costos, respectivamente, para el caso en una dimensión, tipo de estructura 1. En la tabla 5.17 se observan los costos y coeficientes óptimos obtenidos para este ejemplo. Las características del resto de las zonaciones óptimas realizadas en 1, 2, 3 y 4 dimensiones, al emplear los cuatro tipos estructurales considerados, se muestran en las figuras 5.37 - 5.50. Existen zonaciones en las cuales no hay

presencia de algunos tipos de estructura en ciertas zonas (por ejemplo, figura 5.41, zonación en 2D, zona 2, tipo de estructura 4).

Las zonaciones calculadas en una dimensión son coherentes con el comportamiento descrito en la sección 5.2.1, es decir, si se ordenan de forma ascendente (o descendente) las intensidades de la tabla 5.16 entonces la zonación óptima en una dimensión estará constituida por zonas formadas de bloques de elementos (celdas) contiguos en dicho vector. En este caso, la optimización consiste en encontrar las fronteras óptimas que definan las zonas en el vector mencionado. La zonación en una dimensión así definida coincide con las obtenidas en los cuatro tipos de estructura considerados.

Las zonaciones realizadas en más de una dimensión son congruentes con lo mencionado en la sección 5.2.1 (combinaciones de las zonaciones óptimas en una dimensión de los tipos de estructura considerados). En ciertas zonaciones, algunos tipos de estructura llegan a predominar a tal grado que las zonaciones resultan ser iguales a sus correspondientes en una dimensión. Por ejemplo, en el caso de dos dimensiones considerando los tipos de estructura 4 y 7 (figura 5.45), es igual a la calculada en una dimensión correspondiente al tipo 4 (figura 5.38); en tres dimensiones, tipos 1, 2 y 7 (figura 5.47), resulta ser igual a la zonación en una dimensión del tipo 1 (figura 5.35); o en el caso de tres dimensiones, tomando en cuenta los tipos 1, 4 y 7 (figura 5.48), resulta la misma zonación a la obtenida en dos dimensiones de los tipos 1 y 4 (figura 5.41). En todos estos casos, la mayor parte del costo por zonificar es aportado por los tipos de estructura cuya zonación predomina.

Los valores de los coeficientes óptimos asociados a un tipo de estructura se mantienen prácticamente constantes a través de las zonaciones realizadas considerando una o varias dimensiones (Ver figura 5.33), ésto debido a que las diferencias existentes entre las configuraciones que se presentan en las zonaciones no afectan de manera importante el valor óptimo de dichos coeficientes.

Los valores de los costos óptimos, de cada tipo de estructura, determinados al zonificar se incrementan conforme se aumenta el número de dimensiones considerado (ver figura 5.34), lo cual indica un mismo nivel de optimización en todas las zonaciones. Este nivel es alcanzado debido a que la zonación considera un número pequeño de entidades (16), a diferencia del menor nivel obtenido en los ejemplos realizados de la sección 5.2.1 (zonaciones considerando 751 celdas).

Tabla 5.1 Intensidades y números de estructuras obtenidos al discretizar la figura 5.1. Método de combinaciones, una dimensión.

No. celda	Z tipo est 1 (Salg)	Área (Km <sup>2</sup> )	# ests / Km <sup>2</sup>	# ests
A01	0.09	10.281	500	5140.4
A02	0.09	0.807	700	564.9
A11	0.11	47.574	500	23786.8
A12	0.11	28.748	700	20123.3
A13	0.11	23.522	900	21170.2
A14	0.11	9.819	1100	10800.7
A15	0.11	5.118	1200	6141.4
A16	0.11	7.769	1300	10099.3
A17	0.11	19.434	1500	29150.4
A18	0.11	12.113	1700	20592.3
A19	0.11	10.302	1900	19573.6
SP221	0.13	23.284	700	16299.0
SP222	0.13	11.310	900	10179.1
SP223	0.13	8.015	1100	8816.7
SP224	0.13	4.166	1200	4999.1
SP225	0.13	4.641	1300	6033.3
SP226	0.13	6.273	1500	9409.8
SP227	0.13	6.248	1700	10621.4
SP228	0.13	10.259	1900	19492.7
A21	0.13	1.520	500	760.2
A22	0.13	48.220	700	33753.7
A23	0.13	34.433	900	30989.3
A24	0.13	20.492	1100	22541.0
A25	0.13	8.719	1200	10463.3
A26	0.13	11.132	1300	14471.1
A27	0.13	16.385	1500	24577.1
A28	0.13	28.034	1700	47657.8
A29	0.13	6.044	1900	11483.0
A31	0.15	10.166	700	7116.5
A32	0.15	80.145	900	72130.8
A33	0.15	40.811	1100	44891.6
A34	0.15	28.980	1200	34776.0
A35	0.15	31.225	1300	40592.9
A36	0.15	41.867	1500	62800.1
A37	0.15	2.572	1700	4372.2
A51	0.17	17.419	900	15676.7
A52	0.17	59.075	1100	64982.3
A53	0.17	91.060	1100	100166.4
A54	0.17	28.571	1100	31428.1
A55	0.17	11.034	1300	14343.8
SP61	0.19	26.676	1100	29343.2
SP62	0.19	9.557	1100	10513.1
SP63	0.19	76.196	1100	83815.6

No. celda	Z tipo est 1 (Salg)	Área (Km <sup>2</sup> )	# ests / Km <sup>2</sup>	# ests
SP64	0.19	0.406	1300	527.2
A61	0.19	10.807	1100	11887.9
A62	0.19	12.582	1100	13839.7
A63	0.19	39.560	1100	43516.2
A64	0.19	29.067	1300	37787.2
A65	0.19	0.739	900	665.2
A71	0.21	0.037	1100	40.8
A72	0.21	12.722	1100	13994.0
A73	0.21	16.254	1100	17879.2
A74	0.21	25.723	1300	33440.4
A75	0.21	12.015	1300	15619.2
A76	0.21	10.478	1100	11525.5
A77	0.21	3.612	900	3250.4
A81	0.21	2.398	1100	2637.6
A82	0.21	36.496	1100	40145.2
A83	0.21	15.610	1300	20292.9
A84	0.21	26.785	1300	34819.9
A85	0.21	15.154	1500	22731.5
A86	0.21	9.108	1500	13662.0
A87	0.21	10.348	1300	13452.5
A88	0.21	14.633	1100	16095.9
A89	0.21	15.717	900	14145.2
A91	0.23	20.340	1050	21356.7
A92	0.23	12.474	900	11226.2
A93	0.23	50.190	1300	65247.4
A94	0.23	36.264	1300	47143.3
A95	0.23	14.245	1500	21366.8
A96	0.23	9.341	1500	14011.8
A97	0.23	21.240	1100	23363.7
A98	0.23	28.872	900	25984.7
A99	0.23	5.991	700	4193.8
A101	0.25	2.295	700	1606.5
A102	0.25	17.028	900	15324.8
A103	0.25	49.639	1100	54603.2
A104	0.25	23.229	1300	30197.2
A105	0.25	6.812	900	6130.5
A106	0.25	1.792	700	1254.2
Sumas totales		1600.012		1791606.0

Tabla 5.2 Resumen de la información mostrada en la tabla 5.1, utilizada para encontrar la zonación óptima en una dimensión mediante el método de combinaciones.

No. celda	Z tipo est 1 (Sa/g)	Área (Km <sup>2</sup> )	# ests / Km <sup>2</sup>	# ests
1	0.09	11.088	514.557	5705.25
2	0.11	164.397	981.998	161437.84
3	0.13	249.175	1133.934	282547.51
4	0.15	235.766	1131.121	266679.97
5	0.17	207.159	1093.836	226597.37
6	0.19	205.590	1127.952	231895.26
7	0.21	227.088	1205.401	273732.05
8	0.23	198.956	1175.608	233894.25
9	0.25	100.794	1082.570	109116.47
Sumas totales		1600.0117		1791605.975

Tabla 5.3 Valor de las variables utilizadas en las expresiones 3.14 y 3.18 que calcula la esperanza del valor presente de los costos totales

Variable	Descripción	Valor
$\alpha_1$	Constante	20 000
$\alpha_2$	Constante	0.5
$\alpha_3$	Constante	1.3
$b$	Factor considerablemente mayor que uno	12
$\beta$	Constante	2.2
$\sigma_{\ln z}$	Desviación estándar de $\ln(z)$	0.7
$\beta'$	Constante	1.64
$c_o$	Resistencia lateral de la estructura si no se diseñara para resistir sismo	0.05
$\gamma$	Tasa de descuento	0.05
$R$	Distancia epicentral (Km.)	280
$a$	Constante ley de atenuación	1.0
$M_o$	Límite inferior del intervalo de magnitudes involucradas en el proceso sísmico	4.5
$M_u$	Límite superior del intervalo de magnitudes involucradas en el proceso sísmico	8.2

Tabla 5.4 Coeficientes y costos óptimos. Zonación 1D mediante el método de combinaciones.

No. Zona	$C_{1k}$	$W_{1k}/C$
1	0.0733	455 139
2	0.0865	501 928
3	0.1016	868 048
	$W_{TOTAL} =$	1 825 115

Tabla 5.5 Intensidades y números de estructuras obtenidos al discretizar la figura 5.5. Método de combinaciones, dos dimensiones.

No. celda	Z tipo est 1 (Sa/g)	Z tipo est 2 (Sa/g)	Área (Km <sup>2</sup> )	# est / Km <sup>2</sup> (Tipo 1 y 2)	Num ests (Tipo 1 y 2)	Σ área por celda (Km <sup>2</sup> )	Σ ests por celda
<b>ENTIDAD 1</b>							
a11	0.11	0.16	16.3656	1450	23730.12		
a12	0.11	0.16	0.8173	1450	1185.09		
a13	0.11	0.14	0.0277	1450	40.17		
a14	0.11	0.14	9.4459	1450	13696.56		
a15	0.11	0.12	0.1920	1450	278.40		
a21	0.09	0.16	8.0240	1450	11634.80		
a22	0.09	0.14	14.4181	1450	20906.25		
a23	0.09	0.14	8.2676	1450	11988.02		
a24	0.09	0.12	2.5141	1450	3645.45		
a25	0.09	0.12	0.1087	1750	190.23		
b25	0.09	0.14	2.9610	1550	4589.55	63.1420	91884.61
<b>ENTIDAD 2</b>							
b21	0.09	0.16	7.6072	1400	10650.08		
b23	0.09	0.16	4.8016	1450	6962.32		
b24	0.09	0.14	5.3732	1450	7791.14		
b26	0.09	0.14	2.1224	1550	3289.72		
a32	0.07	0.16	0.4152	1400	581.28		
a33	0.07	0.16	0.0004	1450	0.58		
a34	0.07	0.14	0.3085	1400	431.90		
a35	0.07	0.14	1.1661	1450	1690.85	21.7946	31397.87
<b>ENTIDAD 3</b>							
b22	0.09	0.16	0.0872	1400	122.08		
a31	0.07	0.16	4.2373	1400	5932.22		
a36	0.07	0.14	9.3431	1575	14715.38		
b31	0.07	0.14	15.5336	1400	21747.04		
a41	0.05	0.14	4.0402	1400	5656.28	33.2414	48173.00
<b>ENTIDAD 4</b>							
c21	0.09	0.14	0.5176	1450	750.52		
c22	0.09	0.14	4.1875	1550	6490.63		
c23	0.09	0.14	6.4916	1450	9412.82		
c25	0.09	0.12	0.9374	1700	1593.58		
a37	0.07	0.14	11.7805	1575	18554.29		
a38	0.07	0.14	0.6818	1550	1056.79		
a39	0.07	0.12	2.4497	1700	4164.49		
a310	0.07	0.12	1.4004	2250	3150.90		
b36	0.07	0.14	1.0702	2250	2407.95	29.5167	47581.96
<b>ENTIDAD 5</b>							
b27	0.09	0.14	0.3553	1700	604.01		
c24	0.09	0.14	3.8519	1450	5585.26		
c26	0.09	0.12	7.2947	1650	12036.26		
c27	0.09	0.12	11.0278	1450	15990.31		
c28	0.09	0.12	2.7960	1750	4893.00		
a311	0.07	0.12	0.3270	1700	555.90	25.6527	39664.73
<b>ENTIDAD 6</b>							

No. celda	Z tipo est 1 (Salg)	Z tipo est 2 (Salg)	Área (Km <sup>2</sup> )	# est / Km <sup>2</sup> (Tipo 1 y 2)	Num ests (Tipo 1 y 2)	Σ área por celda (Km <sup>2</sup> )	Σ ests por celda
a42	0.05	0.14	0.9873	1400	1382.22		
a426	0.05	0.16	2.5317	1450	3670.97		
a427	0.05	0.14	3.7356	1450	5416.62		
b41	0.05	0.14	13.3353	1450	19336.19		
a51	0.03	0.16	2.6448	1450	3834.96		
a52	0.03	0.14	24.2676	1450	35188.02		
a53	0.03	0.14	2.5769	1500	3865.35		
a61	0.01	0.14	7.8274	1450	11349.73	57.9066	84044.05
<b>ENTIDAD 7</b>							
b32	0.07	0.14	0.7761	1400	1086.54		
b33	0.07	0.14	1.6353	1700	2780.01		
a43	0.05	0.14	11.2187	1400	15706.18		
a44	0.05	0.14	1.1756	1700	1998.52		
a46	0.05	0.12	2.6804	1700	4556.68		
a47	0.05	0.12	0.0333	2250	74.93		
a429	0.05	0.14	0.2242	1450	325.09		
a433	0.05	0.12	0.3477	1450	504.17		
b42	0.05	0.14	9.0645	1450	13143.53		
b43	0.05	0.12	0.1660	1450	240.70		
b44	0.05	0.12	11.3995	1400	15959.30		
a54	0.03	0.14	1.3869	1450	2011.01		
a55	0.03	0.14	7.6202	1500	11430.30		
a56	0.03	0.14	4.0870	1750	7152.25		
a62	0.01	0.14	1.2871	1450	1866.30		
a63	0.01	0.14	0.0536	1500	80.40	53.1561	78915.89
<b>ENTIDAD 8</b>							
a329	0.07	0.12	3.0578	2750	8408.95		
b34	0.07	0.14	2.4889	1700	4231.13		
b35	0.07	0.12	0.8154	1700	1386.18		
b37	0.07	0.14	1.4415	2250	3243.38		
c31*	0.07	0.12	13.4654	2250	30297.15		
a45	0.05	0.12	0.9844	1700	1673.48	22.2534	49240.27
<b>ENTIDAD 9</b>							
a26	0.09	0.12	0.9912	1700	1685.04		
a27	0.09	0.12	3.3837	1450	4906.37		
a28	0.09	0.12	5.4038	1750	9456.65		
a29	0.09	0.12	0.0071	2250	15.98		
b210	0.09	0.10	0.4583	1750	802.03		
b211	0.09	0.10	0.1903	2250	428.18		
a312	0.07	0.12	4.6933	1700	7978.61		
a313	0.07	0.12	2.7809	2250	6257.03		
a314	0.07	0.12	0.5490	1450	796.05	18.4576	32325.92
<b>ENTIDAD 10</b>							
a428	0.05	0.14	1.6473	1450	2388.59		
a430	0.05	0.14	0.6061	1750	1060.68		
a431	0.05	0.12	2.7267	1450	3953.72		
a432	0.05	0.12	0.2749	1750	481.08		
b45	0.05	0.12	1.7686	1400	2476.04		

No. celda	Z tipo est 1 (Sa/g)	Z tipo est 2 (Sa/g)	Área (Km <sup>2</sup> )	# est / Km <sup>2</sup> (Tipo 1 y 2)	Num ests (Tipo 1 y 2)	Σ área por celda (Km <sup>2</sup> )	Σ ests por celda
a57	0.03	0.14	2.0372	1750	3565.10		
a58	0.03	0.14	2.7271	1600	4363.36		
a59	0.03	0.12	7.5249	1750	13168.58		
a510	0.03	0.12	3.0262	2250	6808.95		
a511	0.03	0.12	7.0705	1600	11312.80		
a512	0.03	0.12	4.1060	1750	7185.50		
a513	0.03	0.12	0.0414	1850	76.59		
a64	0.01	0.12	0.3975	1450	576.38		
a65	0.01	0.12	7.5014	1600	12002.24		
a66	0.01	0.12	3.4830	1750	6095.25		
a67	0.01	0.12	0.0159	1850	29.42		
b61	0.01	0.14	0.9248	1600	1479.68		
b62	0.01	0.14	0.7677	1450	1113.17	46.6472	78137.09
<b>ENTIDAD 11</b>							
b38	0.07	0.12	4.2038	1700	7146.46		
b39	0.07	0.12	0.3424	1400	479.36		
b310	0.07	0.10	0.2995	1700	509.15		
b311	0.07	0.10	5.7846	1400	8098.44		
c33	0.07	0.12	2.6567	2250	5977.58		
a48	0.05	0.12	0.1691	2250	380.48		
a49	0.05	0.12	5.1483	1700	8752.11		
a410	0.05	0.10	0.1226	1700	208.42		
a411	0.05	0.10	6.1397	1400	8595.58		
b46	0.05	0.12	10.3419	1400	14478.66	35.2086	54626.23
<b>ENTIDAD 12</b>							
a210	0.09	0.10	1.6203	1750	2835.53		
a211	0.09	0.10	3.8997	2250	8774.33		
a212	0.09	0.10	6.3695	1750	11146.63		
a213	0.09	0.10	8.9911	1450	13037.10		
a214	0.09	0.10	0.1617	1450	234.47		
b28	0.09	0.12	0.4666	1450	676.57		
b29	0.09	0.12	0.5206	1750	911.05		
b212	0.09	0.08	2.9129	1450	4223.71		
b213	0.09	0.08	0.6259	1450	907.56		
a315	0.07	0.12	3.2763	1700	5569.71		
a316	0.07	0.12	4.3531	1450	6312.00		
a317	0.07	0.12	0.0705	1750	123.38		
a318	0.07	0.10	7.6765	1750	13433.88		
a319	0.07	0.10	0.2237	2250	503.33		
a320	0.07	0.10	22.7700	1450	33016.50		
c32	0.07	0.12	2.3022	2250	5179.95		
c37	0.07	0.10	3.4645	1450	5023.53		
c38	0.07	0.08	0.2915	1450	422.68	69.9966	112331.85
<b>ENTIDAD 13</b>							
a412	0.05	0.10	3.3604	1400	4704.56		
a434	0.05	0.12	9.0106	1450	13065.37		
a435	0.05	0.12	0.1030	1750	180.25		
b47	0.05	0.12	0.9977	1400	1396.78		

No. celda	Z tipo est 1 (Salg)	Z tipo est 2 (Salg)	Área (Km <sup>2</sup> )	# est / Km <sup>2</sup> (Tipo 1 y 2)	Num ests (Tipo 1 y 2)	Σ área por celda (Km <sup>2</sup> )	Σ ests por celda
b48	0.05	0.10	8.4466	1450	12247.57		
b49	0.05	0.10	7.4127	1750	12972.23		
b410	0.05	0.10	3.9826	2250	8960.85		
a514	0.03	0.10	4.6364	1750	8113.70		
a515	0.03	0.10	26.7781	1575	42175.51		
a516	0.03	0.10	11.5078	1750	20138.65		
a517	0.03	0.10	1.1879	1850	2197.62		
b51	0.03	0.12	0.8354	1450	1211.33		
b52	0.03	0.12	10.1982	1750	17846.85		
b53	0.03	0.12	3.7104	2250	8348.40		
b54	0.03	0.12	5.2686	1600	8429.76		
b55	0.03	0.12	2.2628	1750	3959.90		
b56	0.03	0.12	1.7743	1850	3282.46		
b57	0.03	0.12	0.0371	1750	64.93		
b59	0.03	0.08	11.2311	1580	17745.14		
b511	0.03	0.08	8.1716	1450	11848.82		
a68	0.01	0.10	0.7531	1750	1317.93		
a69	0.01	0.10	16.2678	1600	26028.48		
a610	0.01	0.10	24.0541	1450	34878.45		
a611	0.01	0.10	7.3378	1350	9906.03		
a612	0.01	0.08	0.0281	1600	44.96		
a613	0.01	0.08	9.4370	1450	13683.65		
a615	0.01	0.08	18.8390	1350	25432.65		
a617	0.01	0.06	0.6325	1350	853.88		
b63	0.01	0.12	0.5879	1850	1087.62		
b64	0.01	0.12	1.9482	1750	3409.35		
b65	0.01	0.12	12.6725	1600	20276.00		
b66	0.01	0.12	6.1929	1450	8979.71	219.6642	344789.34
<b>ENTIDAD 14</b>							
a322	0.07	0.08	3.0558	1450	4430.91		
a324	0.07	0.08	13.2744	1450	19247.88		
b312	0.07	0.10	1.1692	1400	1636.88		
b313	0.07	0.10	2.6306	1450	3814.37		
b314	0.07	0.06	1.8169	1450	2634.51		
a413	0.05	0.10	0.0227	1400	31.78		
a414	0.05	0.10	9.1948	1450	13332.46		
a415	0.05	0.10	6.0095	1750	10516.63		
a416	0.05	0.10	0.2516	2250	566.10		
a417	0.05	0.08	13.5546	1500	20331.90		
a418	0.05	0.08	26.4842	1450	38402.09		
a420	0.05	0.06	0.2740	1450	397.30		
b411	0.05	0.10	0.9315	1500	1397.25		
a518	0.03	0.10	1.9430	1500	2914.50		
b58	0.03	0.08	3.9676	1500	5951.40		
b510	0.03	0.08	6.3941	1450	9271.45	90.9745	134877.40
<b>ENTIDAD 15</b>							
a215	0.09	0.08	12.8271	1450	18599.30		
a216	0.09	0.08	1.6486	1450	2390.47		
b214	0.09	0.08	0.3425	1450	496.63		

No. celda	Z tipo est 1 (Sa/g)	Z tipo est 2 (Sa/g)	Área (Km <sup>2</sup> )	# est / Km <sup>2</sup> (Tipo 1 y 2)	Num ests (Tipo 1 y 2)	Σ área por celda (Km <sup>2</sup> )	Σ ests por celda
a321	0.07	0.08	18.0031	1450	26104.50		
a323	0.07	0.08	10.5579	1450	15308.96		
a325	0.07	0.06	9.6806	1350	13068.81		
b316	0.07	0.06	7.0283	1450	10191.04		
c34	0.07	0.10	0.7300	1450	1058.50		
c35	0.07	0.08	0.6794	1450	985.13		
c36	0.07	0.10	1.4252	1450	2066.54	62.9227	90269.86
<b>ENTIDAD 16</b>							
a326	0.07	0.06	16.2612	1350	21952.62		
a327	0.07	0.06	1.7713	1250	2214.13		
a328	0.07	0.04	10.6388	1250	13298.50		
b315	0.07	0.06	0.3057	1450	443.27		
a419	0.05	0.08	5.9588	1450	8640.26		
a421	0.05	0.06	12.6353	1450	18321.19		
a422	0.05	0.06	33.6842	1350	45473.67		
a423	0.05	0.06	0.2900	1250	362.50		
a424	0.05	0.04	6.2151	1350	8390.39		
a425	0.05	0.04	29.2388	1250	36548.50		
a519	0.03	0.08	14.6707	1450	21272.52		
a520	0.03	0.08	2.6462	1350	3572.37		
a521	0.03	0.06	5.6275	1450	8159.88		
a522	0.03	0.06	36.3972	1350	49136.22		
a523	0.03	0.06	1.8816	1250	2352.00		
a524	0.03	0.04	1.4934	1350	2016.09		
a525	0.03	0.04	7.7541	1250	9692.63		
a614	0.01	0.08	0.0613	1450	88.89		
a616	0.01	0.08	2.6881	1350	3628.94		
a618	0.01	0.06	1.4931	1350	2015.69	191.7124	257580.21
<b>Sumas totales</b>			<b>1042.2473</b>		<b>1575840.25</b>	<b>1042.2473</b>	<b>1575840.25</b>

Tabla 5.6a. Intensidades y número de estructuras equivalentes para las 16 entidades consideradas, zonación óptima en 2 dimensiones mediante el método de combinaciones. Tipo de estructura 1.

No. entidad	No. de celdas	No. de estructuras	$Z_{eq}$ ( <i>Salg</i> )	W/C	$(W-W_{Z_{eq}})/C$
1	11	91884.6	0.0982	93079.8	-0.30
2	8	31397.9	0.0883	31759.7	0.21
3	5	48173.0	0.0684	48558.2	-0.38
4	9	47582.0	0.0779	48045.6	-0.07
5	6	39664.7	0.0898	40130.5	-0.42
6	8	84044.1	0.0405	84272.4	-0.51
7	16	78915.9	0.0481	79243.5	0.65
8	6	49240.3	0.0695	49644.7	0.18
9	9	32325.9	0.0809	32658.2	0.12
10	18	78137.1	0.0341	78263.0	0.59
11	10	54626.2	0.0600	54976.4	-0.38
12	18	112331.8	0.0778	113425.0	0.61
13	32	344789.3	0.0343	345355.0	1.16
14	16	134877.4	0.0550	135614.0	0.30
15	10	90269.9	0.0749	91101.3	0.59
16	20	257580.2	0.0498	258733.0	1.67

Tabla 5.6b. Intensidades y número de estructuras equivalentes para las 16 entidades consideradas, zonación óptima en 2 dimensiones mediante el método de combinaciones. Tipo de estructura 2.

No. entidad	No. de celdas	No. de estructuras	$Z_{eq}$ ( <i>Salg</i> )	W/C	$(W-W_{Z_{eq}})/C$
1	11	91884.6	0.1469	93595.6	-0.24
2	8	31397.9	0.1515	31996.1	-0.14
3	5	48173.0	0.1425	49049.4	-0.23
4	9	47582.0	0.1361	48417.5	0.21
5	6	39664.7	0.1230	40305.3	0.10
6	8	84044.1	0.1417	85567.2	0.34
7	16	78915.9	0.1344	80287.9	0.37
8	6	49240.3	0.1229	50035.0	0.21
9	9	32325.9	0.1192	32833.8	0.00
10	18	78137.1	0.1235	79402.9	-0.30
11	10	54626.2	0.1134	55446.6	0.02
12	18	112331.8	0.1021	113855.0	0.77
13	32	344789.3	0.1008	349400.0	-1.63
14	16	134877.4	0.0845	136347.0	0.08
15	10	90269.9	0.0763	91124.0	0.37
16	20	257580.2	0.0601	259236.0	-2.08

Tabla 5.7. Matriz de similitud para una tolerancia de intensidades igual a 0.019. Método de combinaciones, zonación en 2 dimensiones.

Z tipo est 1 (Sa/g)	Z tipo est 2 (Sa/g)	No entidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
0.0982	0.1469	1	1	1															
0.0883	0.1515	2	1	1	1	1													
0.0684	0.1425	3		1	1	1				1									
0.0779	0.1361	4		1	1	1	1			1	1								
0.0898	0.1230	5				1	1				1								
0.0405	0.1417	6						1	1			1							
0.0481	0.1344	7						1	1			1							
0.0695	0.1229	8			1	1				1	1		1						
0.0809	0.1192	9				1	1			1	1			1					
0.0341	0.1235	10						1	1			1							
0.0600	0.1134	11								1			1	1					
0.0778	0.1021	12									1		1	1					
0.0343	0.1008	13													1				
0.0550	0.0845	14															1		
0.0749	0.0763	15																1	
0.0498	0.0601	16																	1
	Tol Z <sub>1</sub> =	0.019																	
	Tol Z <sub>2</sub> =	0.019																	

Tabla 5.8 Agrupaciones de entidades con intensidades similares.

No. agrupación	No. entidades agrupadas
1	1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 11, 12
2	6, 7, 10
3	13
4	14
5	15
6	16

Tabla 5.9 Coeficientes y costos óptimos. Zonación en 2D mediante el método de combinaciones.

No. Zona	$C_{1k}$	$W_{1k}/C$	$C_{2k}$	$W_{2k}/C$
1	0.0817	603 465	0.0923	606 773
2	0.0570	587 228	0.0920	594 698
3	0.0670	394 357	0.0764	395 684
<b><math>W_{TOTAL} =</math></b>				<b>3 182 205</b>

Tabla 5.10 Períodos característicos de los 4 tipos de estructura considerados (Ordaz y col, 1994).

Tipo de estructura	Terreno firme			Terreno blando		
	$T_1$	$T_M$	$T_2$	$T_1$	$T_M$	$T_2$
1	0.05	0.10	0.20	0.20	0.30	0.50
2	0.15	0.20	0.30	0.30	0.40	0.60
4	0.60	1.00	1.40	0.90	1.50	2.20
7	0.40	0.70	0.90	0.60	1.00	1.40

\*  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_M$  son los períodos característicos en segundos, para cada clase estructural y tipo de suelo. En el presente trabajo se consideró el periodo del tipo estructural definido por el valor de  $T_M$ .

Tabla 5.11 Número de celdas con área de construcción no nula de los tipos de estructura considerados en las zonaciones correspondientes.

No dimensiones	1	1	1	1	2	2	2	2
Tipos de est	1	2	4	7	1,2	1,4	1,7	2,4
Numero de celdas	681	439	276	82	689	693	685	483
No dimensiones	2	2	3	3	3	3	4	
Tipos de est	2,7	4,7	1,2,4	1,2,7	1,4,7	2,4,7	1,2,4,7	
Numero de celdas	460	295	696	693	695	488	698	

Tabla 5.12 Valores de las variables que controlan el comportamiento del algoritmo genético.

Variable	Descripción	Valor
ngenes	Número celdas a zonificar	Según región
ncromo	Número individuos población	Según ngenes
nmjadaptado	Controla la esperanza del número de individuos del mejor adaptado que sobreviva en una generación	2
n generaciones	Número de generaciones en la simulación	Definido según convergencia
probcrusa	Probabilidad de crusa	0.6
probrnuta	Probabilidad de mutación	Según ngenes
laiealo	Longitud del alelo	2
cup	Constante	1.0
nimpresionfob	Variable que controla el número de generaciones entre las cuales se imprime la información de la zonación óptima de la simulación	10
nzonas	Número de zonas a zonificar la región	4
ndim	Número de dimensiones consideradas	Según el ejemplo a realizar
fobmax	Variable que controla si se maximiza o se minimiza la función objetivo	0 (minimiza)
zo, zu y numzmsi	Variables que definen los límites inferior y superior, así como el número de elementos que componen el vector Z utilizado en la interpolación	Según el ejemplo a realizar
cko, cku y numck	Variables que definen los límites inferior y superior, así como el número de elementos que componen el vector c utilizado en la interpolación	Según el ejemplo a realizar

Tabla 5.13 Variables utilizadas por el algoritmo genético en la determinación de la zonación sísmica óptima, considerando 751 celdas.

No dim	1	1	1	1	2	2	2	2
Tipos de est	1	2	4	7	1,2	1,4	1,7	2,4
ngenes	681	439	276	82	689	693	685	483
ncromo	100	150	100	80	75	75	75	75
ngeneraciones	275	497	630	501	403	653	265	412
probmuta	0.0012	0.0018	0.0029	0.0098	0.0012	0.0012	0.0012	0.0017
zo	0.0210	0.0310	0.0338	0.0610	0.0214	0.0214	0.0215	0.0311
zu	0.2460	0.3403	0.9934	0.6210	0.3407	0.9931	0.6206	0.9931
numzmsi	4501	6187	18819	11201	6387	19435	11983	19241
cko	0.0100	0.0100	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475
cku	0.8000	0.8000	0.6000	0.8000	0.3000	0.3000	0.6000	0.3000
numck	317	317	222	302	102	102	222	102
No dim	2	2	3	3	3	3	4	
Tipos de est	2,7	4,7	1,2,4	1,2,7	1,4,7	2,4,7	1,2,4,7	
ngenes	460	295	696	693	695	488	698	
ncromo	75	75	75	75	75	75	75	
ngeneraciones	468	301	490	502	501	411	518	
probmuta	0.0018	0.0027	0.0012	0.0012	0.0012	0.0017	0.0012	
zo	0.0257	0.0339	0.0214	0.0214	0.0214	0.0311	0.0214	
zu	0.6207	0.9931	0.9931	0.6207	0.9931	0.9931	0.9931	
numzmsi	11901	19185	19435	11987	19435	19241	19435	
cko	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	
cku	0.6000	0.3000	0.4500	0.4500	0.3000	0.3000	0.3000	
numck	222	102	162	162	102	102	102	

Tabla 5.14 Coeficientes y costos óptimos. Zonación 1D, Tipo de estructura 1, considerando 751 celdas.

No. Zona	$C_{1k}$	$W_{1k}/C_A$
1	0.0879	79 227 900
2	0.0802	67 791 300
3	0.0613	78 004 700
4	0.0876	83 807 800
	$W_{TOTAL} =$	<b>308 831 700</b>

Tabla 5.15 Variables utilizadas por el algoritmo genético en la determinación de la zonación sísmica óptima, considerando 16 celdas.

No dim	1	1	1	1	2	2	2	2
Tipos de est	1	2	4	7	1,2	1,4	1,7	2,4
ngenes	16	15	13	11	16	16	16	15
ncromo	60	60	60	60	60	60	60	60
ngeneraciones	301	301	301	301	301	301	301	301
probmuta	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126
zo	0.0349	0.0349	0.0349	0.0349	0.0349	0.0349	0.0349	0.0349
zu	0.1406	0.1406	0.4116	0.4116	0.4116	0.4116	0.4116	0.4116
numzmsi	2115	2115	7535	7535	7535	7535	7535	7535
cko	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475
cku	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
numck	182	182	182	182	182	182	182	182
No dim	2	2	3	3	3	3	4	
Tipos de est	2,7	4,7	1,2,4	1,2,7	1,4,7	2,4,7	1,2,4,7	
ngenes	15	13	16	16	16	15	16	
ncromo	60	60	60	60	60	60	60	
ngeneraciones	301	301	301	301	301	301	301	
probmuta	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	
zo	0.0349	0.0349	0.0349	0.0349	0.0349	0.0349	0.0349	
zu	0.4116	0.4116	0.4116	0.4116	0.4116	0.4116	0.4116	
numzmsi	7535	7535	7535	7535	7535	7535	7535	
cko	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	0.0475	
cku	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	
numck	182	182	182	182	182	182	182	

Tabla 5.16a Áreas de construcción e intensidades equivalentes considerando 16 entidades. Tipo de estructura 1.

No. entidad	No. de celdas	Área const (Km <sup>2</sup> )	Z <sub>eq</sub>	W/C <sub>A</sub>	(W-W <sub>Z<sub>eq</sub></sub> )/C <sub>A</sub>
1	102	44.743	0.0962	45 313 000	176.0
2	27	16.383	0.0727	16 527 600	14.0
3	32	13.381	0.0495	13 439 900	-118.0
4	51	10.687	0.1132	10 847 500	58.0
5	33	16.196	0.1091	16 430 700	-53.0
6	5	2.290	0.0353	2 294 840	0.0
7	52	20.968	0.0483	21 055 100	170.0
8	40	17.030	0.1003	17 257 400	26.0
9	29	13.237	0.1057	13 423 200	82.0
10	23	12.985	0.0356	13 008 300	89.0
11	60	24.339	0.0955	24 646 400	76.0
12	79	34.074	0.1025	34 538 400	16.0
13	98	43.952	0.0526	44 171 100	244.0
14	79	22.610	0.1175	22 960 900	70.0
15	37	12.207	0.0963	12 362 500	-67.0
16	4	0.503	0.1194	511 875	1.2

Tabla 5.16b Áreas de construcción e intensidades equivalentes considerando 16 entidades. Tipo de estructura 2.

No. entidad	No. de celdas	Área const (Km <sup>2</sup> )	Z <sub>eq</sub>	W/C <sub>A</sub>	(W-W <sub>Z<sub>eq</sub></sub> )/C <sub>A</sub>
1	102	6.879	0.1078	6 977 500	14.0
2	27	10.934	0.0741	11 033 200	-93.0
3	32	11.318	0.0578	11 385 600	-52.0
4	51	13.831	0.1403	14 080 600	-17.0
5	33	4.147	0.1366	4 220 590	4.5
6	5	1.106	0.0411	1 109 590	-0.1
7	52	6.918	0.0688	6 973 890	8.0
8	40	17.600	0.103	17 841 400	14.0
9	29	2.710	0.1232	2 754 660	8.8
10	23	1.218	0.0411	1 221 950	-0.3
11	60	9.543	0.1027	6 973 670	-54.0
12	79	5.222	0.1262	5 308 380	22.5
13	98	5.962	0.0684	6 010 200	-31.5
14	79	2.424	0.1368	2 467 460	8.8
15	37	390	0.0862	394 791	1.2
16	4	0.000			

Tabla 5.16c Áreas de construcción e intensidades equivalentes considerando 16 entidades.Tipo de estructura 4.

No. entidad	No. de celdas	Área const (Km <sup>2</sup> )	Z <sub>eq</sub>	W/C <sub>A</sub>	(W-W <sub>Zeq</sub> )/C <sub>A</sub>
1	102	2.992	0.2497	3 071 350	4.3
2	27	0.941	0.1352	957 826	-3.3
3	32	8.142	0.1052	8 256 070	23.5
4	51	11.211	0.2877	11 532 100	14.0
5	33	0.810	0.2353	831 168	-0.7
6	5	0.000			
7	52	1.215	0.0861	1 229 330	2.0
8	40	5.752	0.1718	5 872 660	-18.5
9	29	0.594	0.2542	610 266	0.4
10	23	0.000			
11	60	5.873	0.2476	6 027 900	-5.0
12	79	1.560	0.2195	1 598 910	-3.4
13	98	6.758	0.1632	6 893 920	3.0
14	79	3.844	0.4064	3 976 920	-8.3
15	37	0.762	0.1005	772 725	-3.2
16	4	0.000			

Tabla 5.16d Áreas de construcción e intensidades equivalentes considerando 16 entidades.Tipo de estructura 7.

No. entidad	No. de celdas	Área const (Km <sup>2</sup> )	Z <sub>eq</sub>	W/C <sub>A</sub>	(W-W <sub>Zeq</sub> )/C <sub>A</sub>
1	102	0.200	0.4113	207 089	0.3
2	27	0.000			
3	32	0.040	0.1814	41 838	0.1
4	51	1.995	0.2406	2 047 200	-5.1
5	33	0.000			
6	5	0.000			
7	52	0.162	0.0932	164 719	-0.4
8	40	0.188	0.1969	192 793	-0.2
9	29	0.226	0.1476	231 192	0.0
10	23	0.000			
11	60	0.512	0.2201	525 462	-1.1
12	79	0.460	0.1628	469 362	-0.8
13	98	1.743	0.2206	1 786 610	4.0
14	79	6.652	0.3319	6 857 870	-16.5
15	37	0.192	0.2013	196 486	-0.5
16	4	0.000			

Tabla 5.17 Coeficientes y costos óptimos. Zonación 1D, Tipo de estructura 1, considerando 16 entidades.

No. Zona	$C_{1k}$	$W_{1k}/C_A$
1	0.0507	15 279 800
2	0.0646	78 635 100
3	0.0792	16 525 800
4	0.0891	198 282 000
	<b><math>W_{TOTAL} =</math></b>	<b>308 722 700</b>

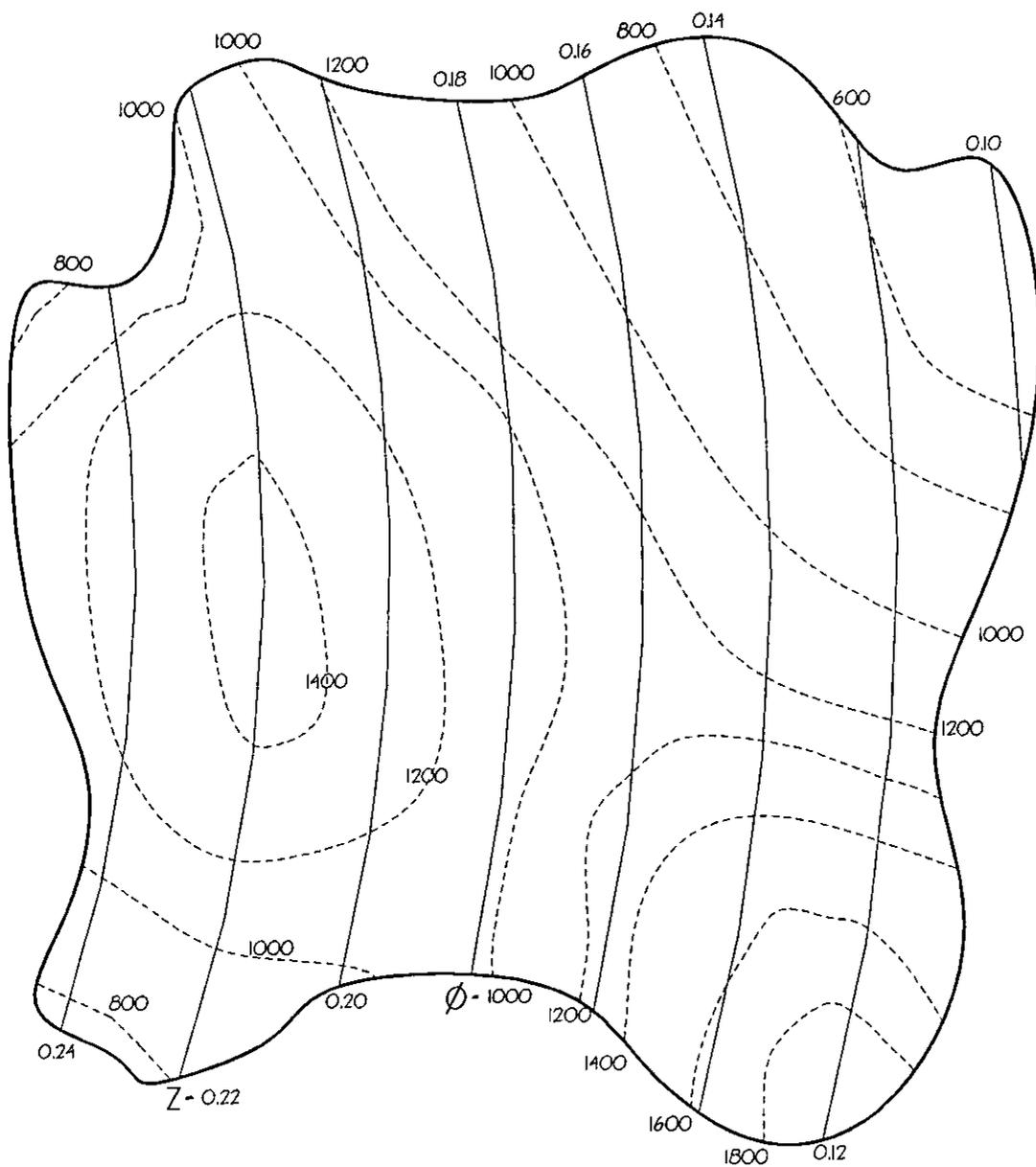


Fig. 5.1 Isosistas del número de estructuras por unidad de área ( $\text{Km}^{-2}$ ) y de aceleración espectral máxima ( $\text{Sa/g}$ ).

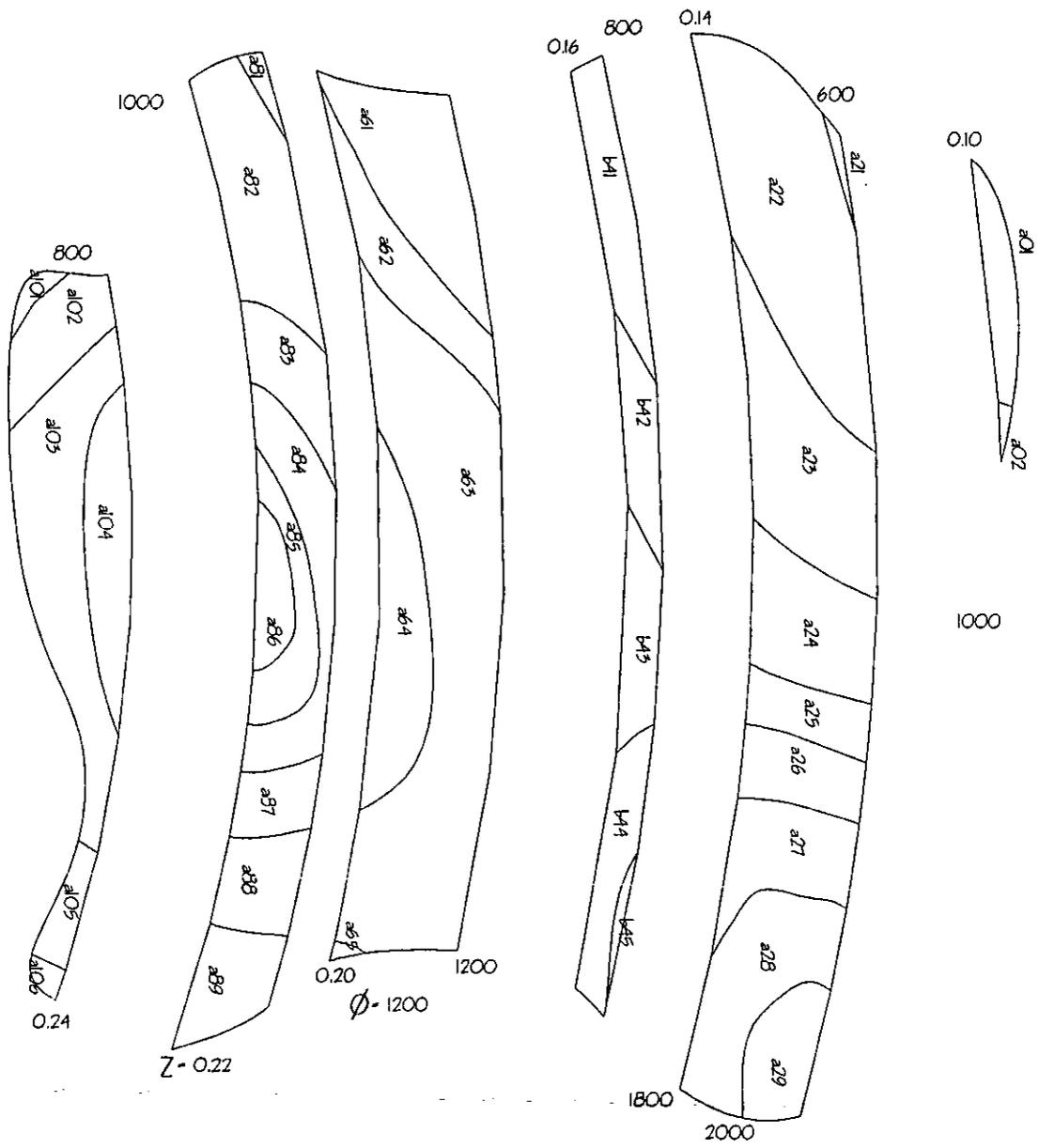


Fig 5.2a Discretización de la región en celdas.

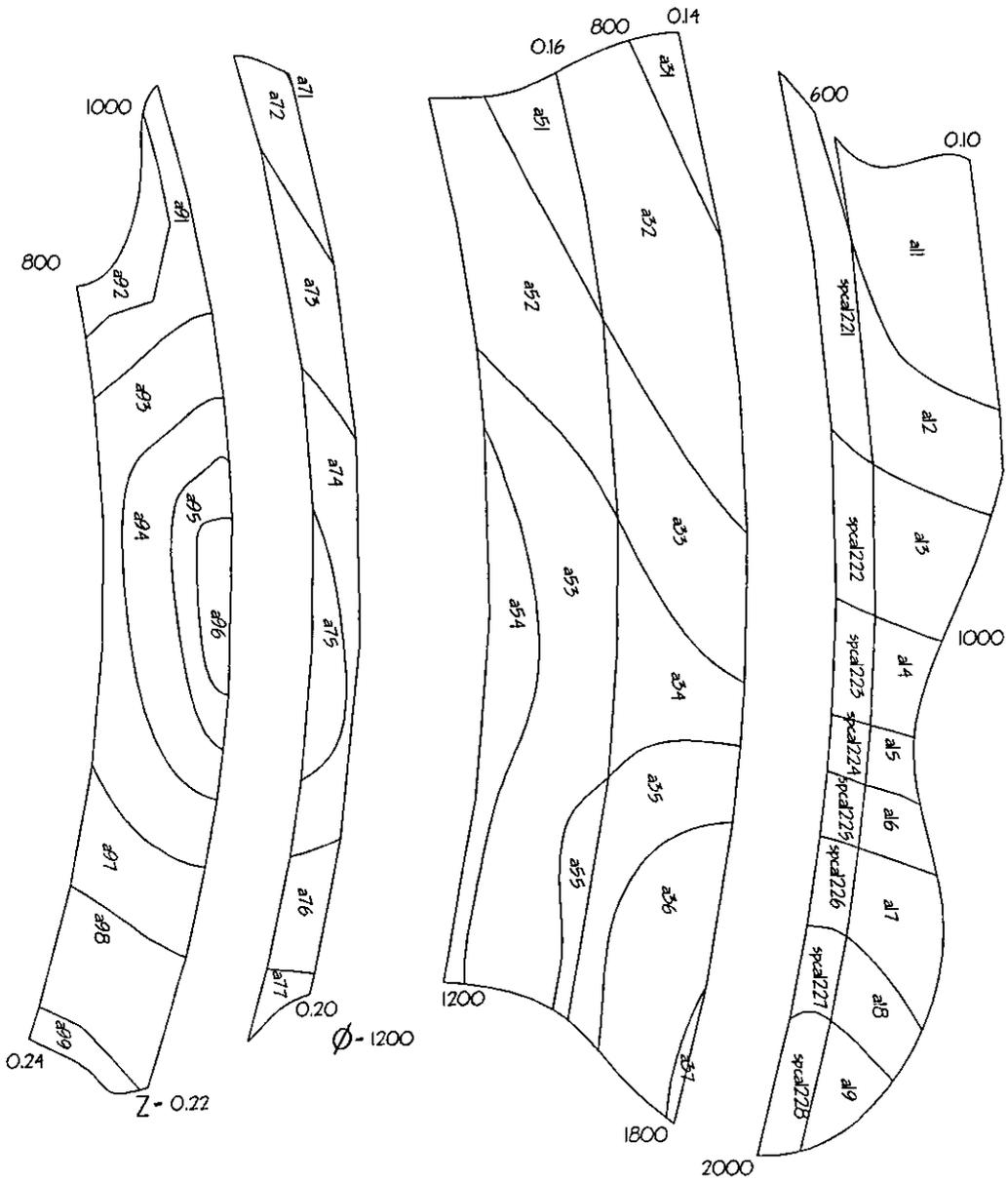


Fig 5.2b Discretización de la región en celdas.

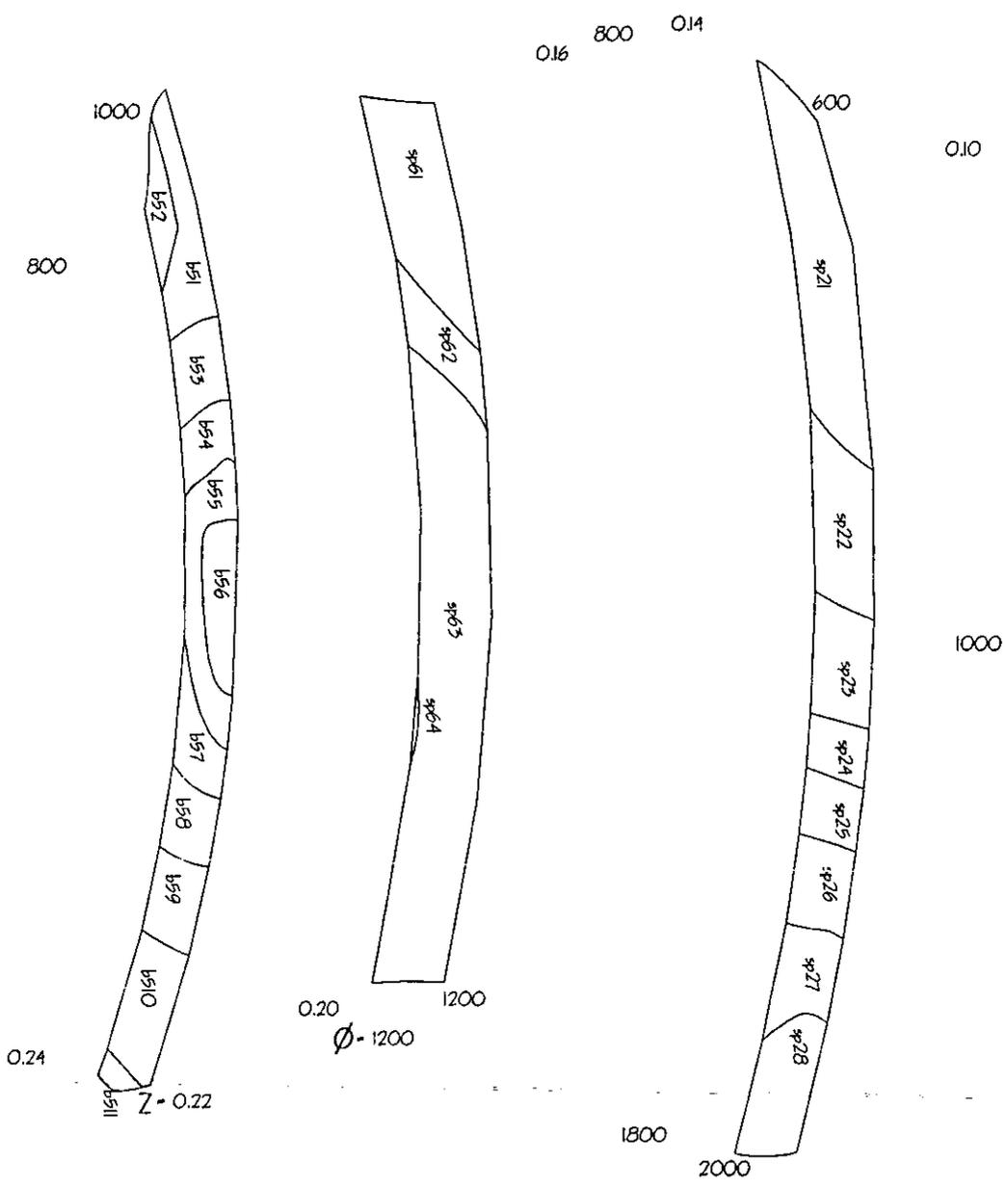


Fig 5.2c Discretización de la región en celdas.

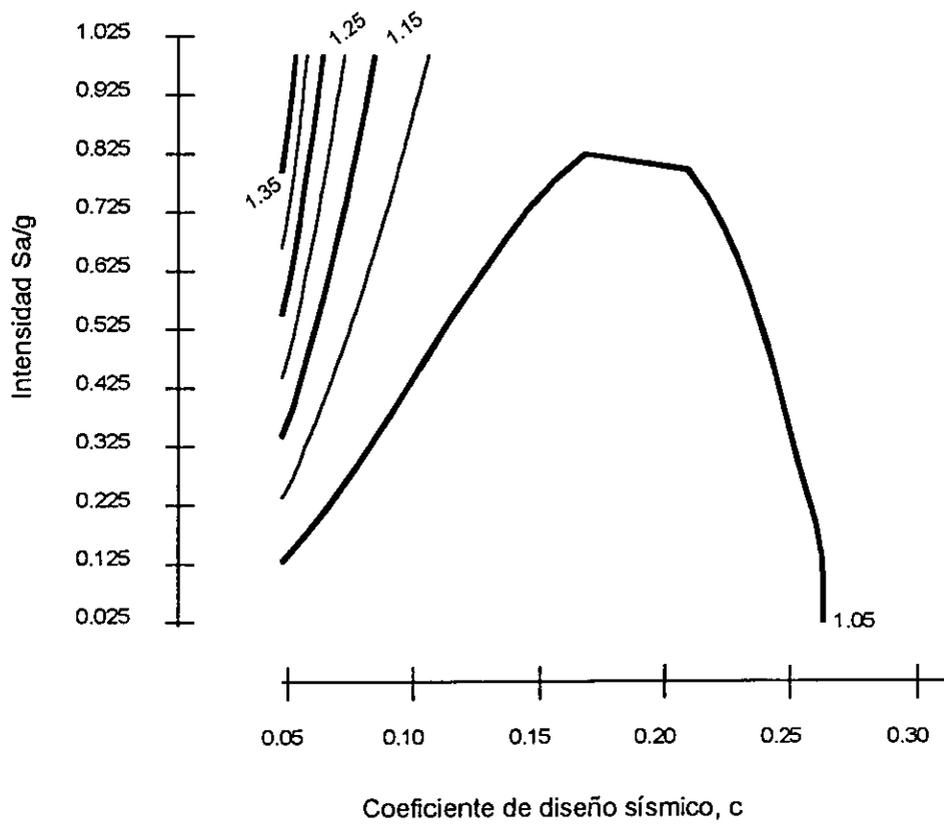


Fig. 5.3 Valores de la función  $w/C_A$  para distintos valores de intensidades y coeficientes de diseño sísmico. (curvas @ 0.05).

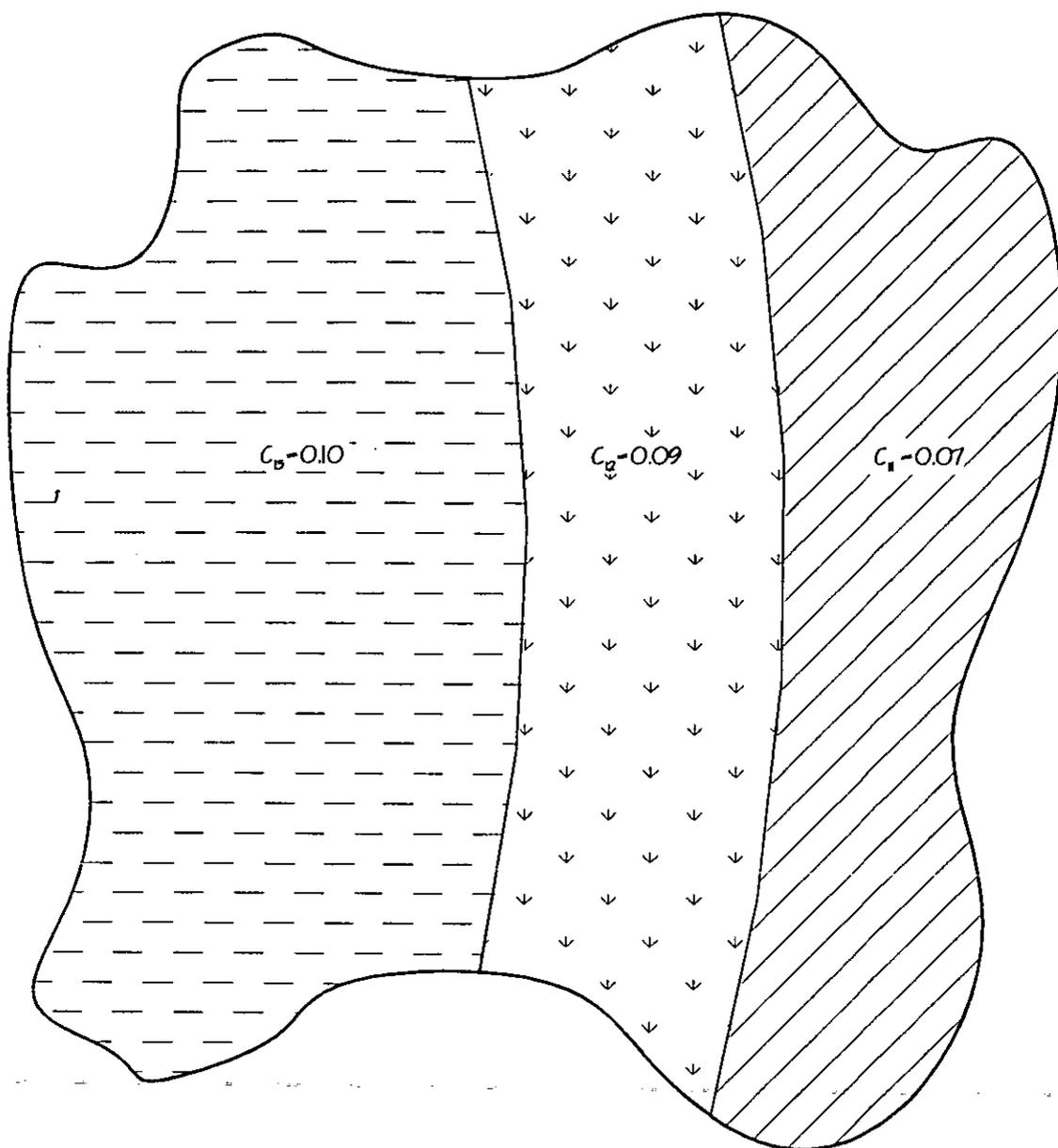


Fig. 5.4 Zonación 1D mediante el método de combinaciones.

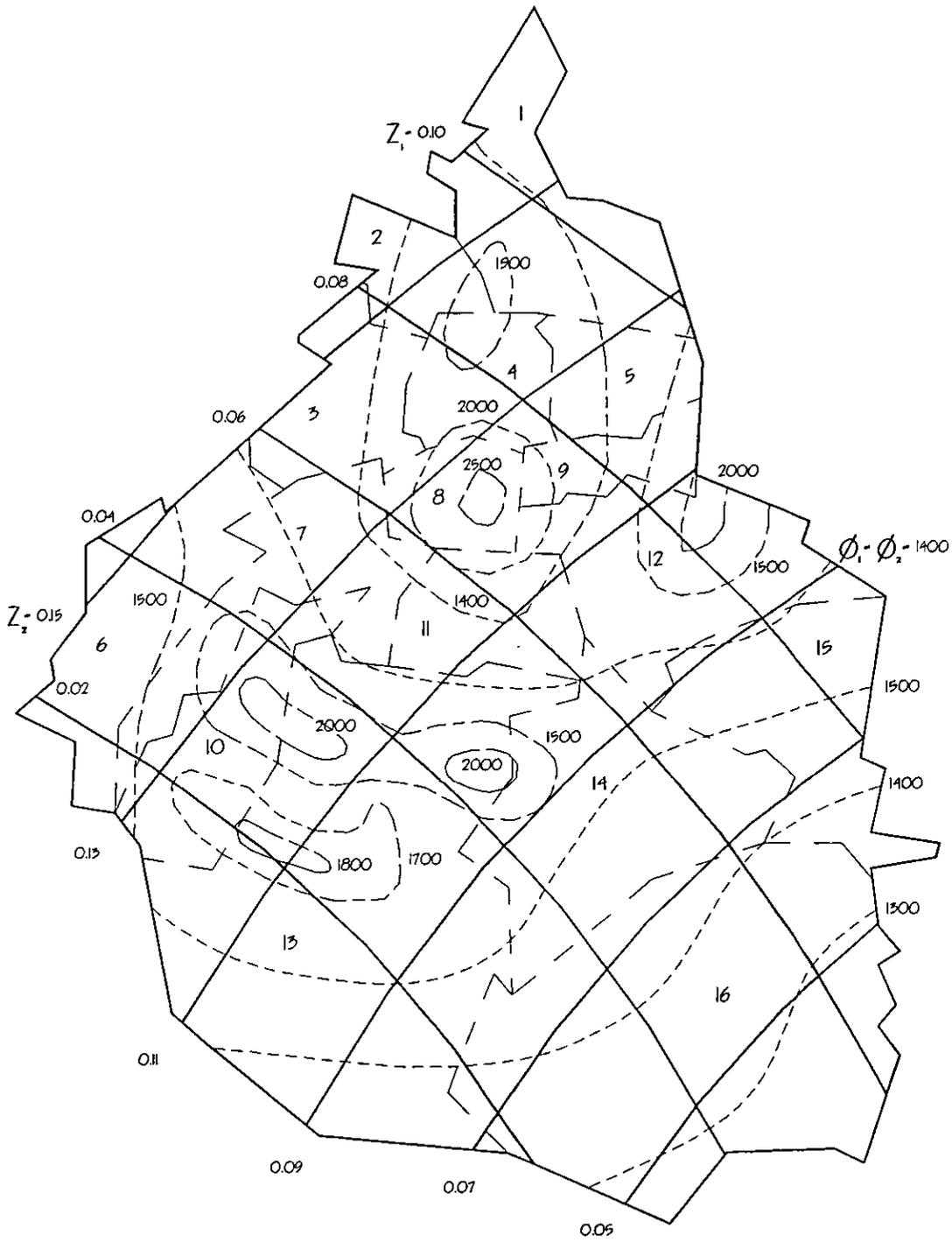


Fig. 5.5 División política, sismicidad ( $Sa/g$ ) y número de estructuras por unidad de área ( $Km^2$ ).

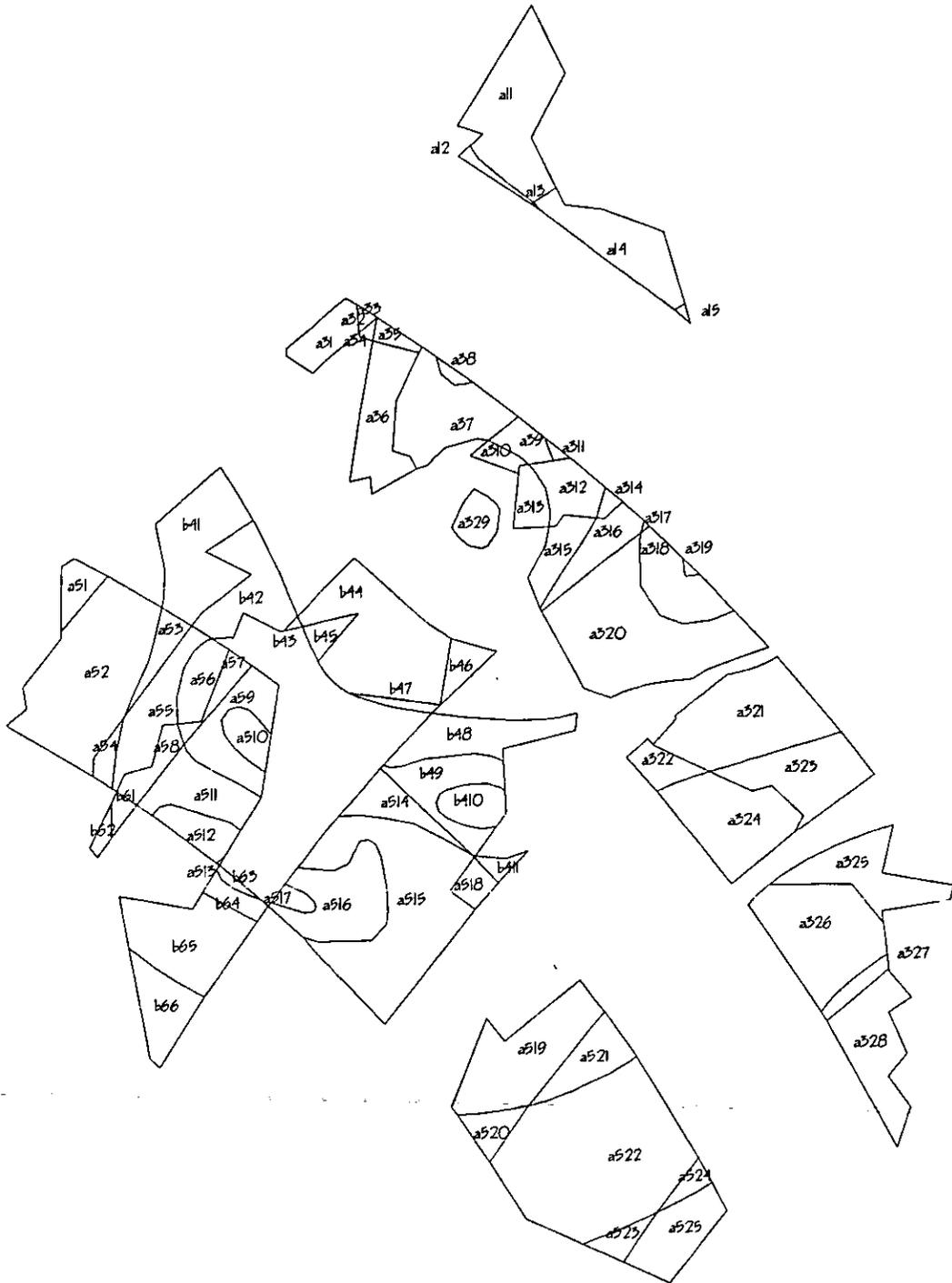


Fig 5.6a Discretización de la región en celdas, caso 2D.



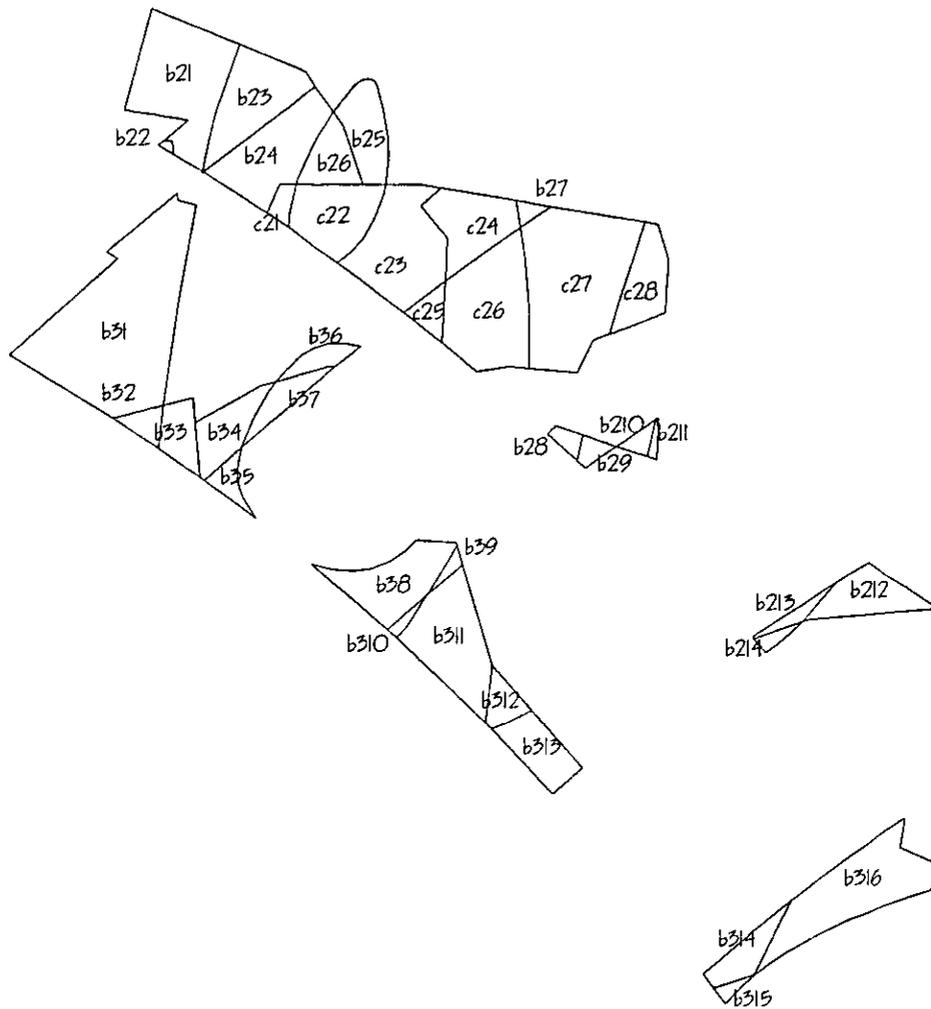


Fig 5.6c Discretización de la región en celdas, caso 2D.

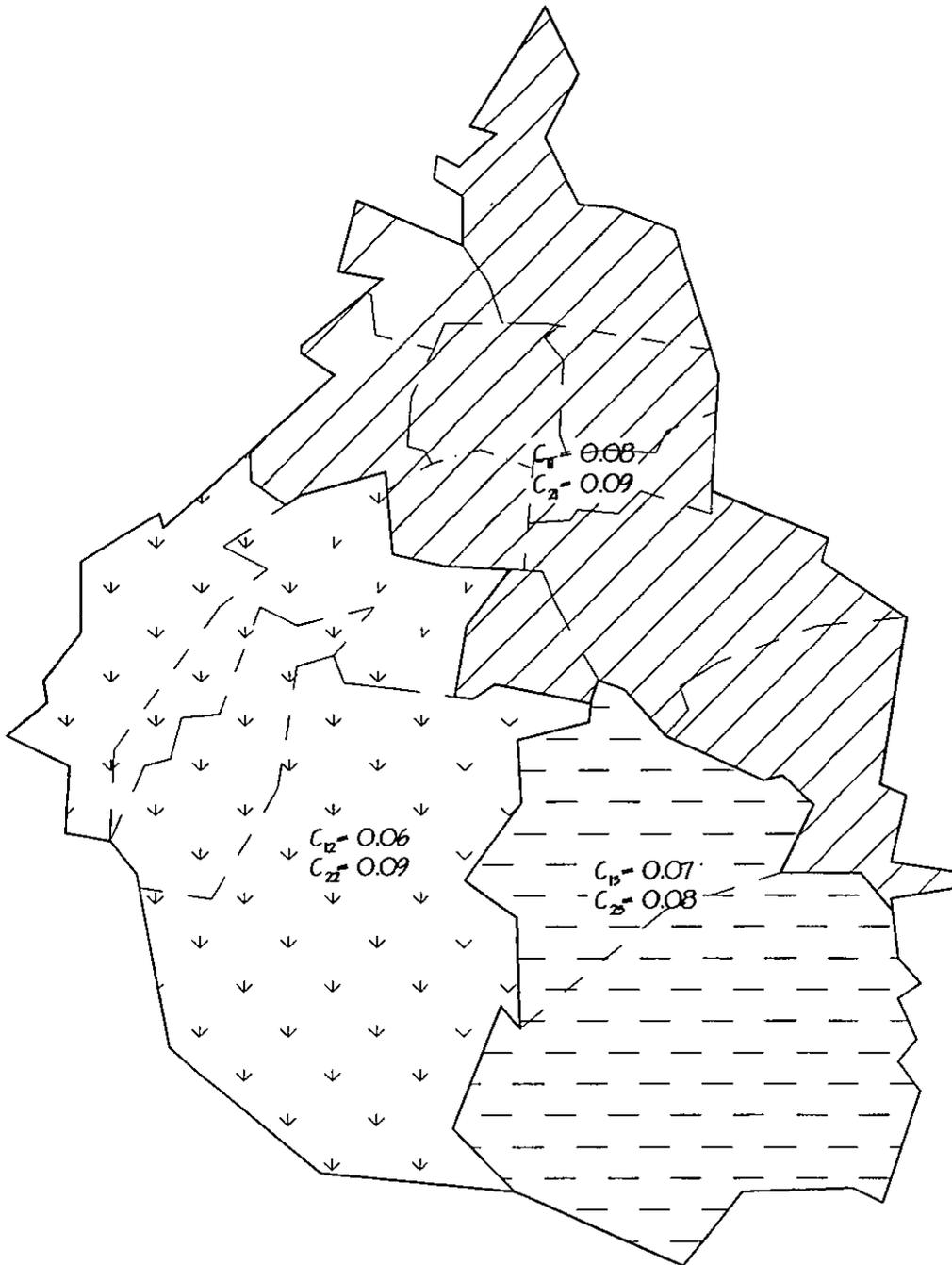


Fig. 5.7 Zonación en 2D mediante el método de combinaciones.

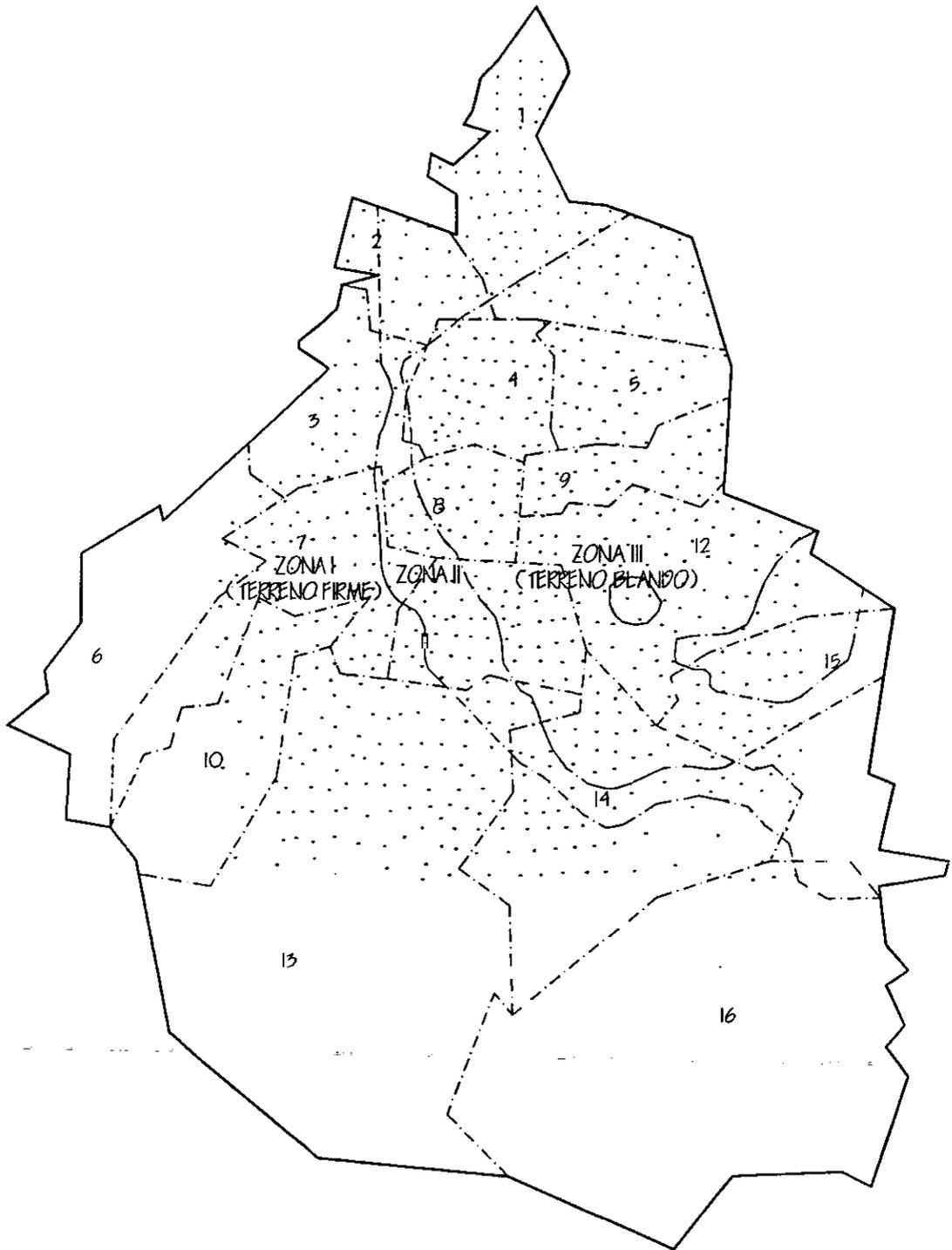


Fig. 5.8 Límites jurisdiccionales y localización de las 751 celdas en que se discretiza la región en estudio.



Fig 5.9 Isosistas de áreas de construcción ( $\times 10^{-2}$  Km<sup>2</sup>). Tipo de estructura 1 (curvas @ 0.35 Km<sup>2</sup>).

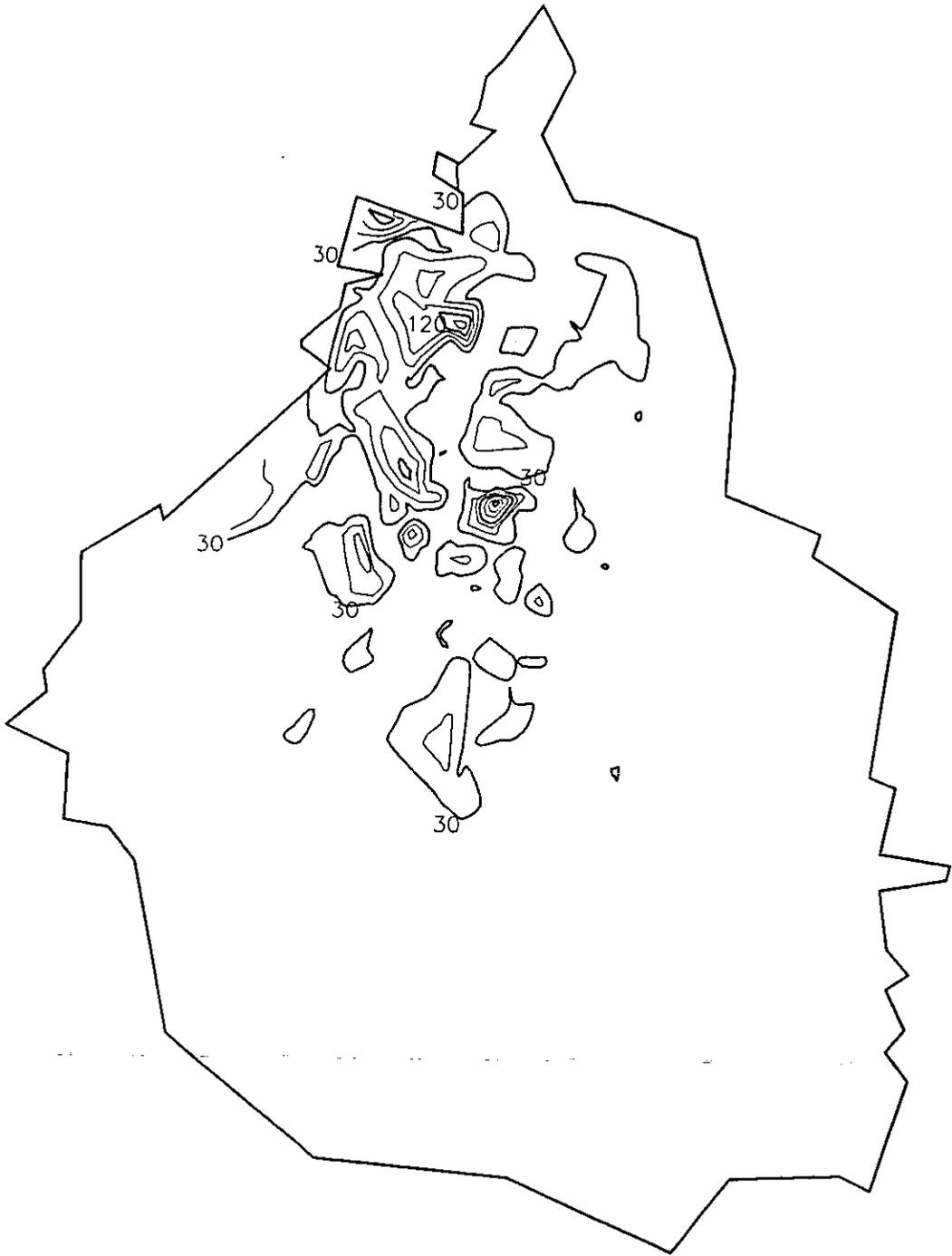


Fig 5.10 Isosistas de áreas de construcción ( $\times 10^2 \text{ Km}^2$ ). Tipo de estructura 2 (curvas @  $0.30 \text{ Km}^2$ ).



Fig 5.11 Isosistas de áreas de construcción ( $\times 10^2 \text{ Km}^2$ ). Tipo de estructura 4 (curvas @  $0.20 \text{ Km}^2$ ).

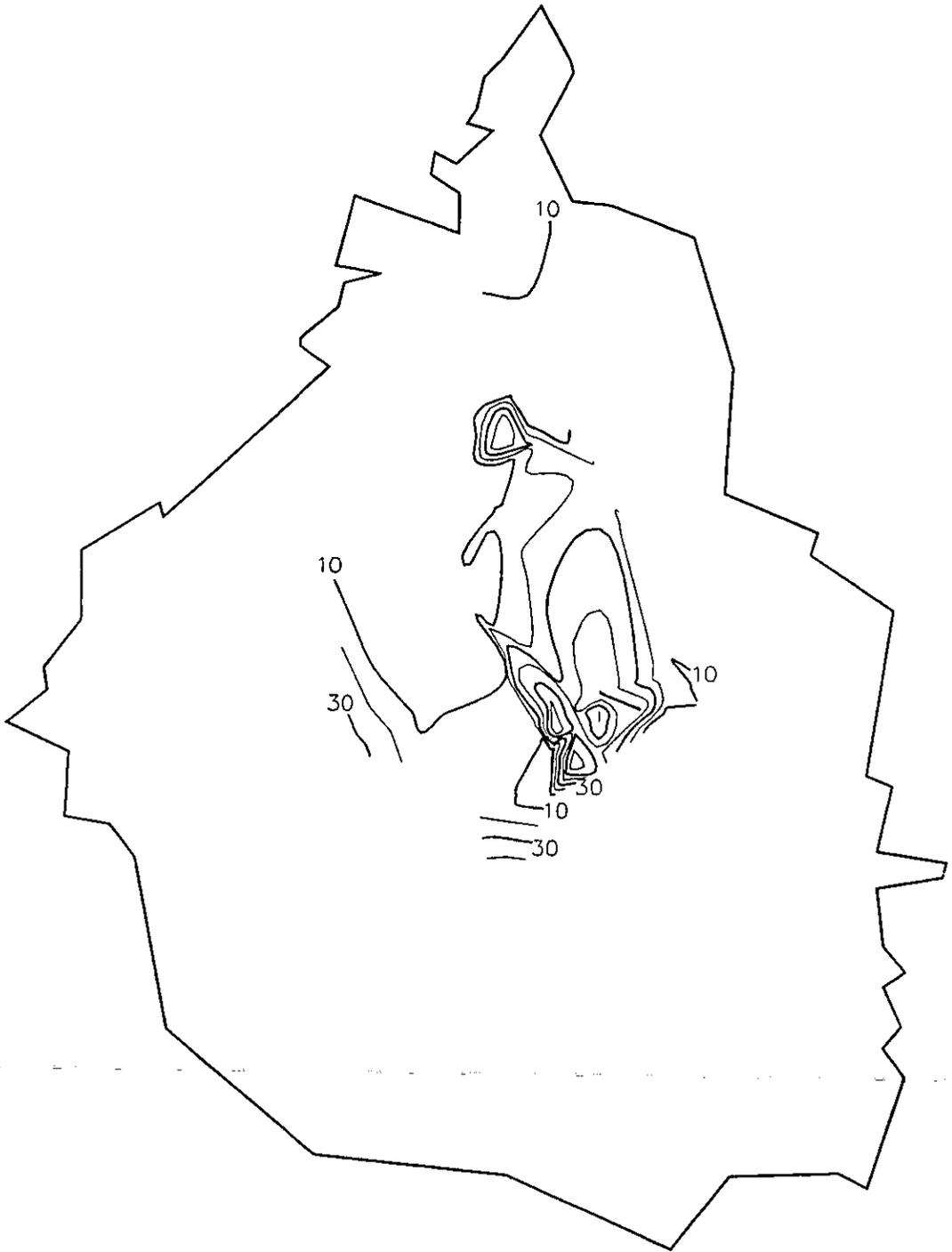


Fig 5.12 Isosistas de áreas de construcción ( $\times 10^{-2}$  Km<sup>2</sup>). Tipo de estructura 7 (curvas @ 0.10 Km<sup>2</sup>).

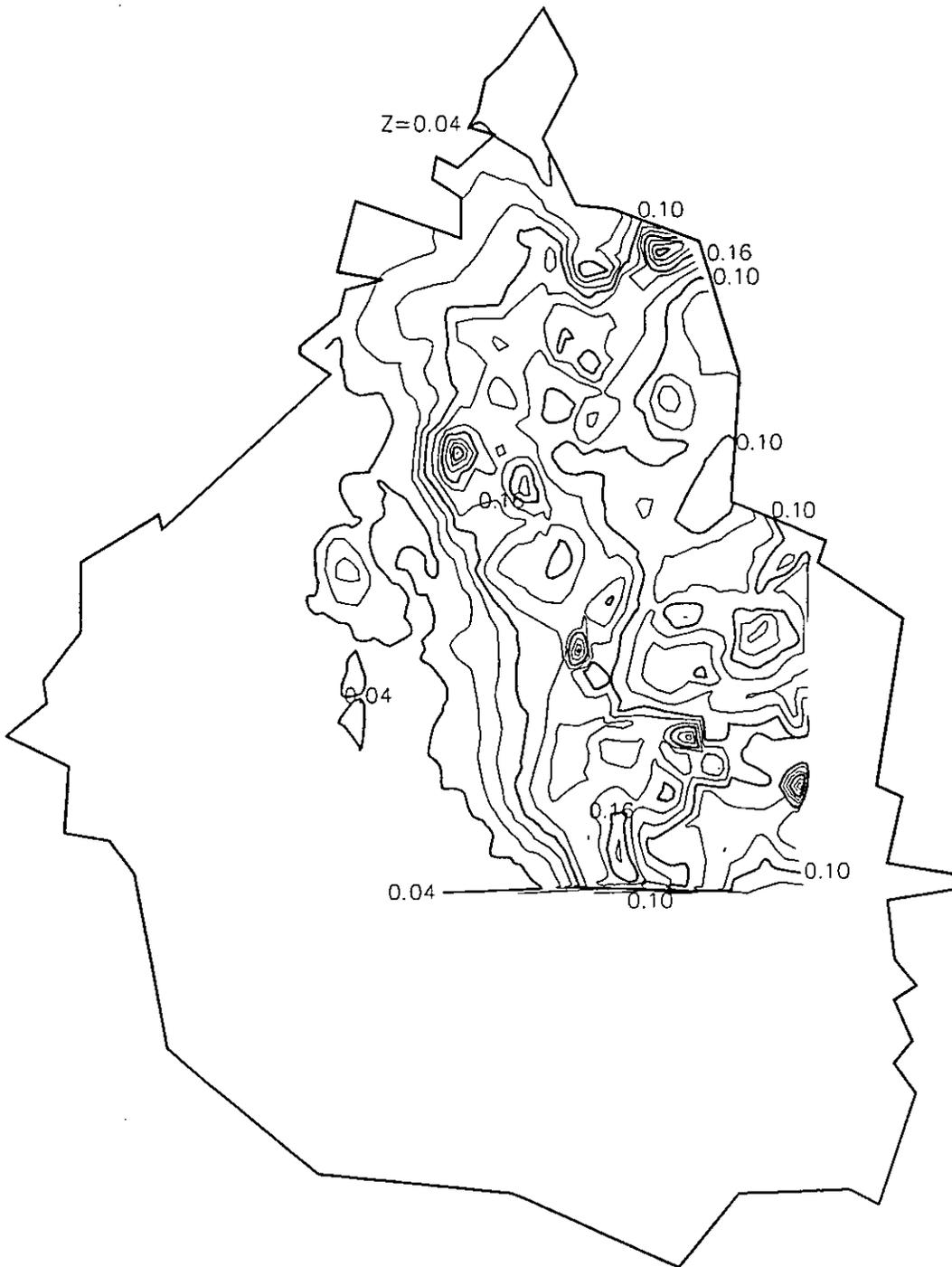


Fig 5.13 Isosistas de intensidades ( $Sa/g$ ). Tipo de estructura 1 (curvas @ 0.02).

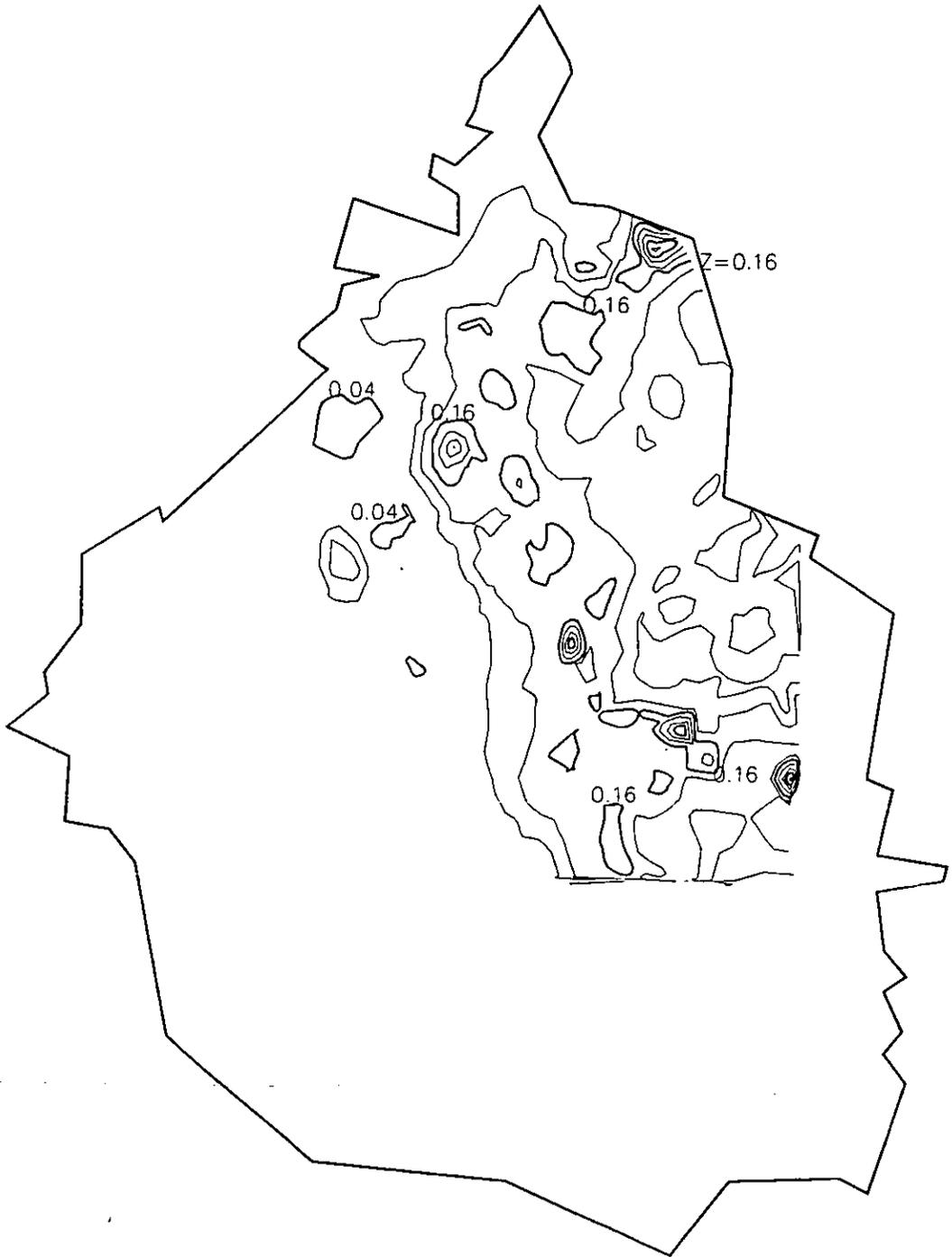


Fig 5.14 Isosistas de intensidades ( $S_a/g$ ). Tipo de estructura 2 (curvas @ 0.04).

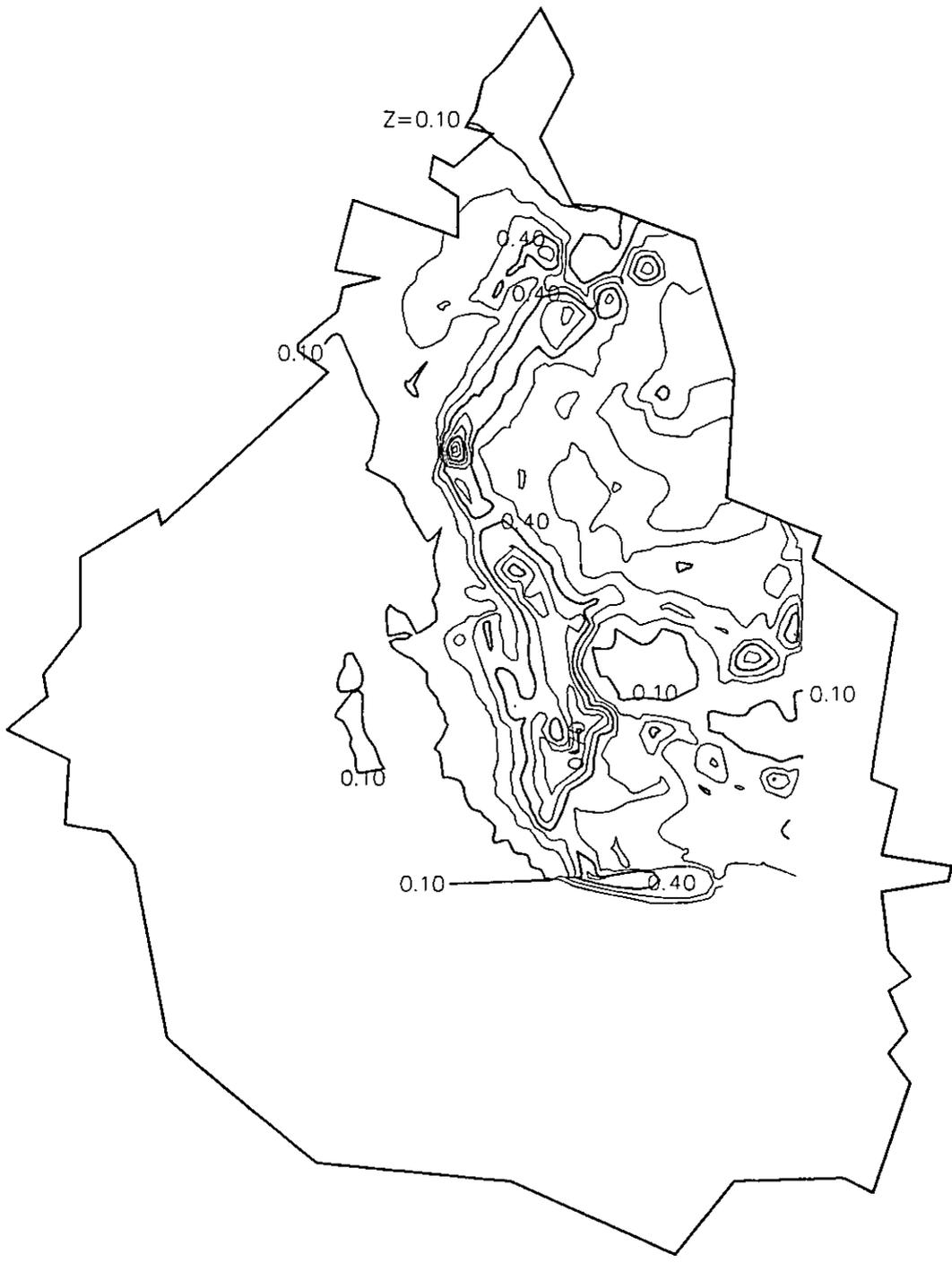


Fig 5.15 Isosistas de intensidades ( $S_a/g$ ). Tipo de estructura 4 (curvas @ 0.10).

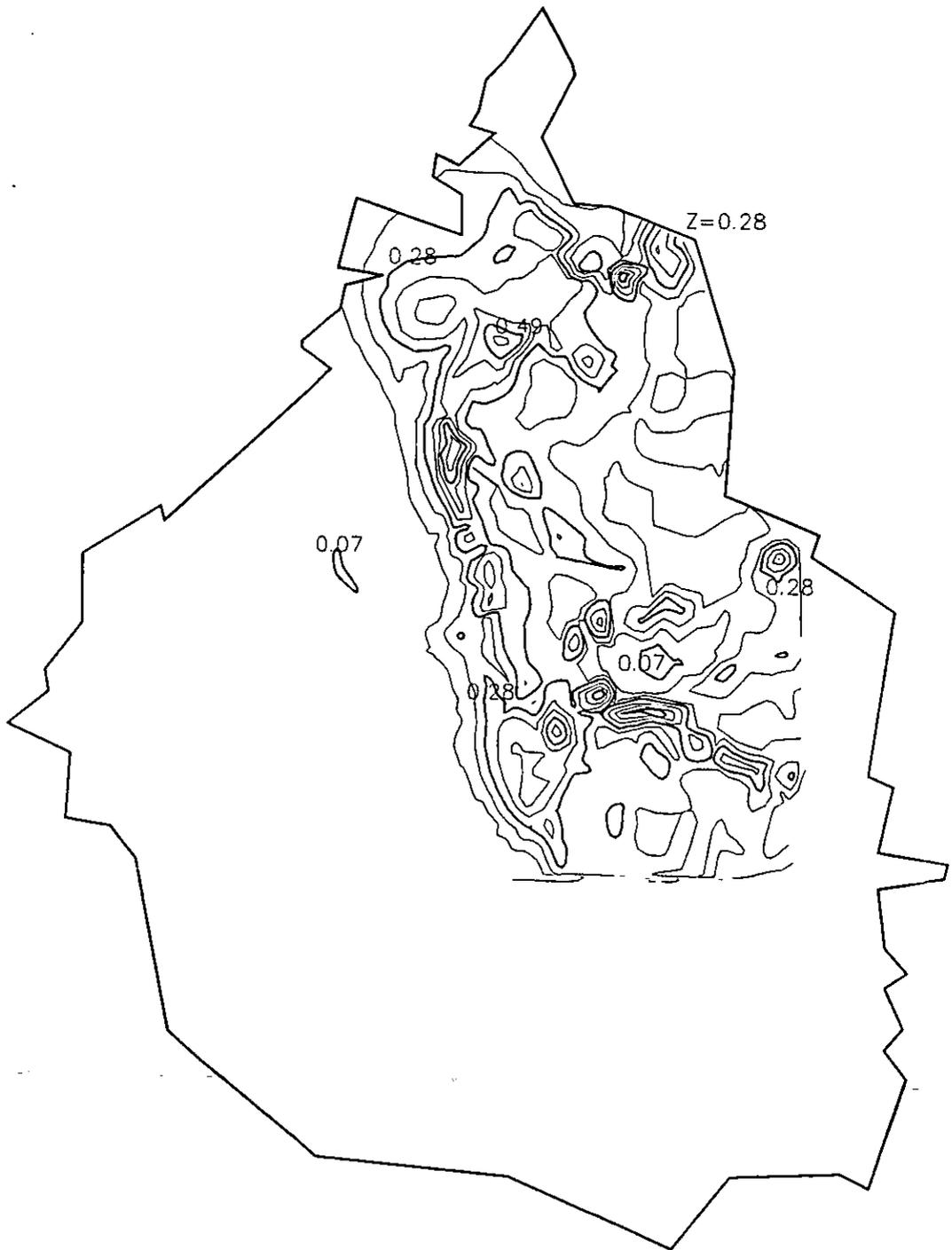


Fig 5.16 Isosistas de intensidades ( $Sa/g$ ). Tipo de estructura 7 (curvas @ 0.07).

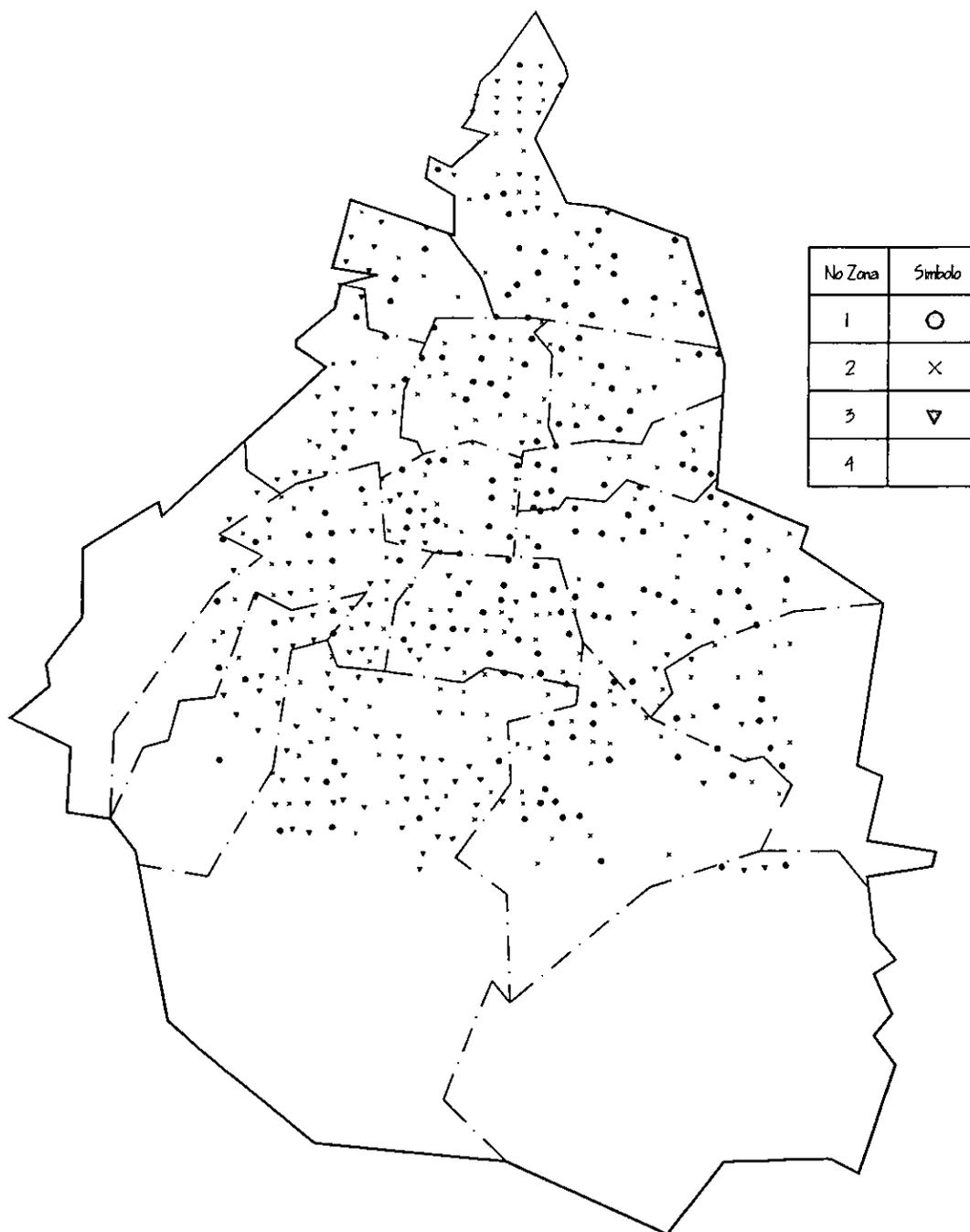


Fig. 5.17 Zonación 1D, Tipo de estructura 1, considerando 751 celdas.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

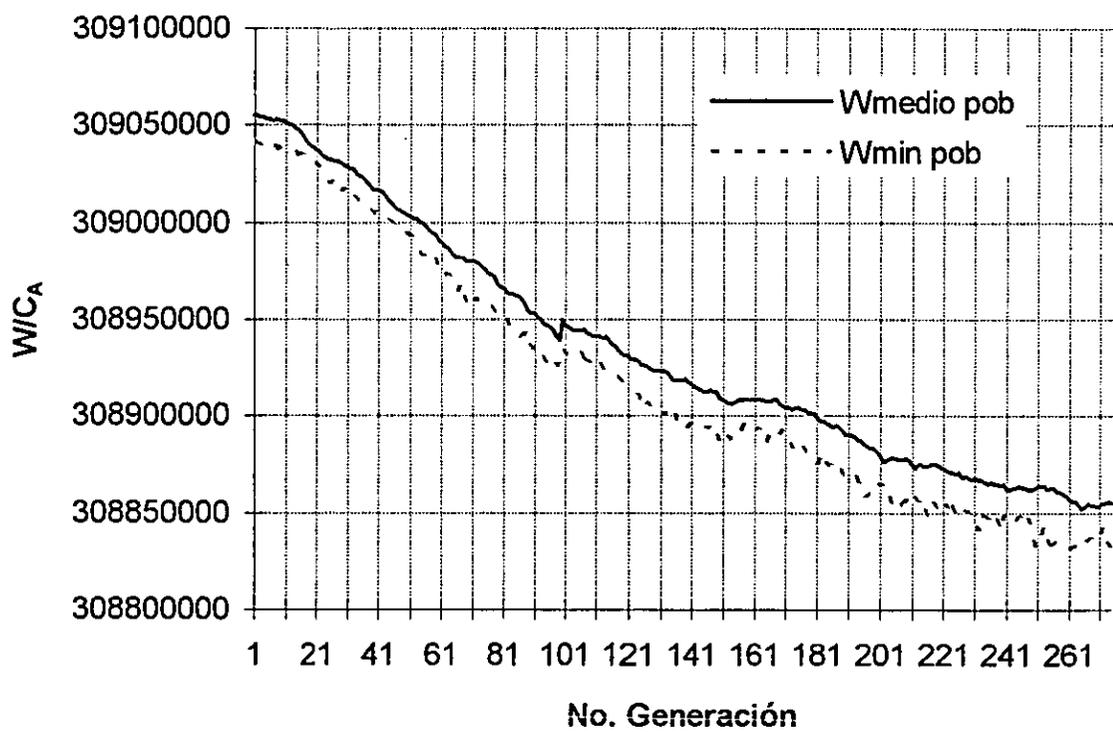
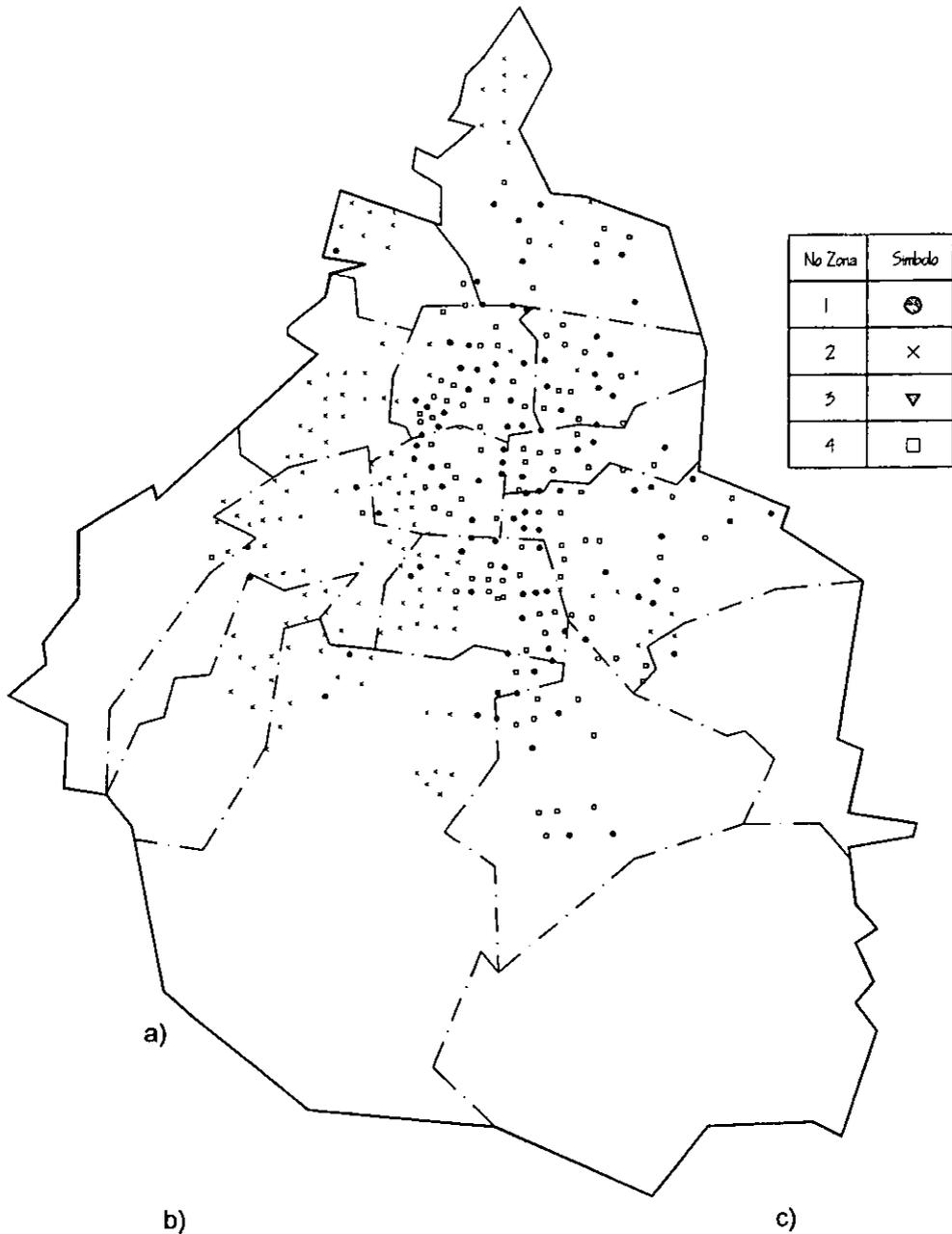


Fig. 5.18 Convergencia de los costos de la población durante la simulación. Zonación 1D, Tipo de estructura 1, considerando 751 celdas.



No. Zona	$C_{Zk}$	$W_{Zk}/C_A$
1	0.0968	19 288 400
2	0.0638	33 487 000
3	0.0856	27 662 100
4	0.0971	20 951 500
	$W_{TOTAL} =$	<b>101 389 000</b>

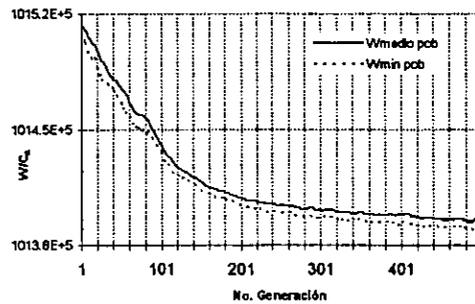
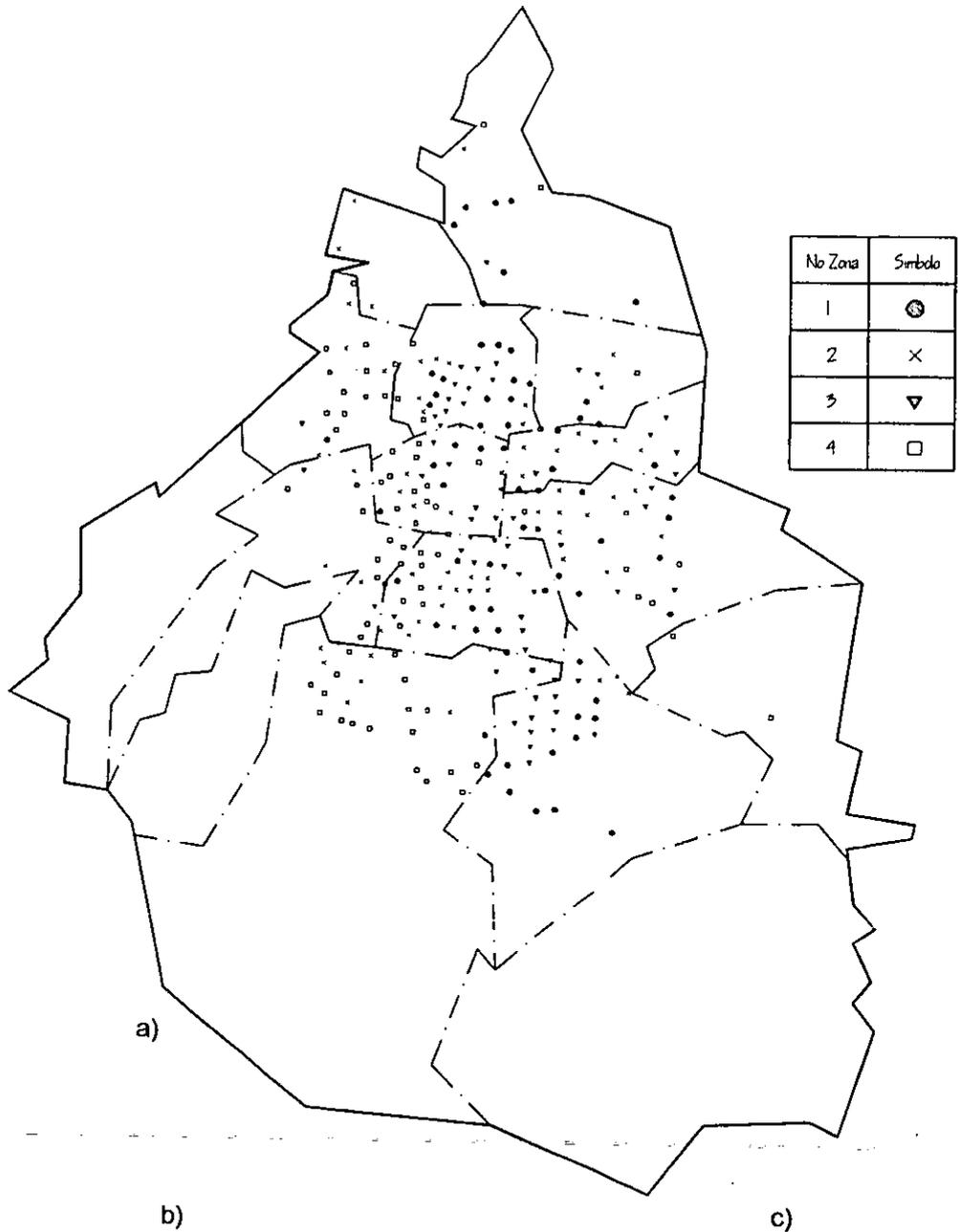


Fig. 5.19 a) Zonación en 1D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para el tipo de estructura 2, considerando 751 celdas.



No. Zona	$C_{4R}$	$W_{4R}/C_A$
1	0.1159	12 346 500
2	0.0987	10 269 200
3	0.1360	9 002 130
4	0.0893	19 968 500
	$W_{TOTAL} =$	<b>51 586 330</b>

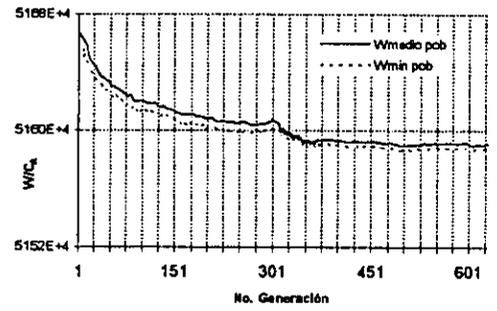
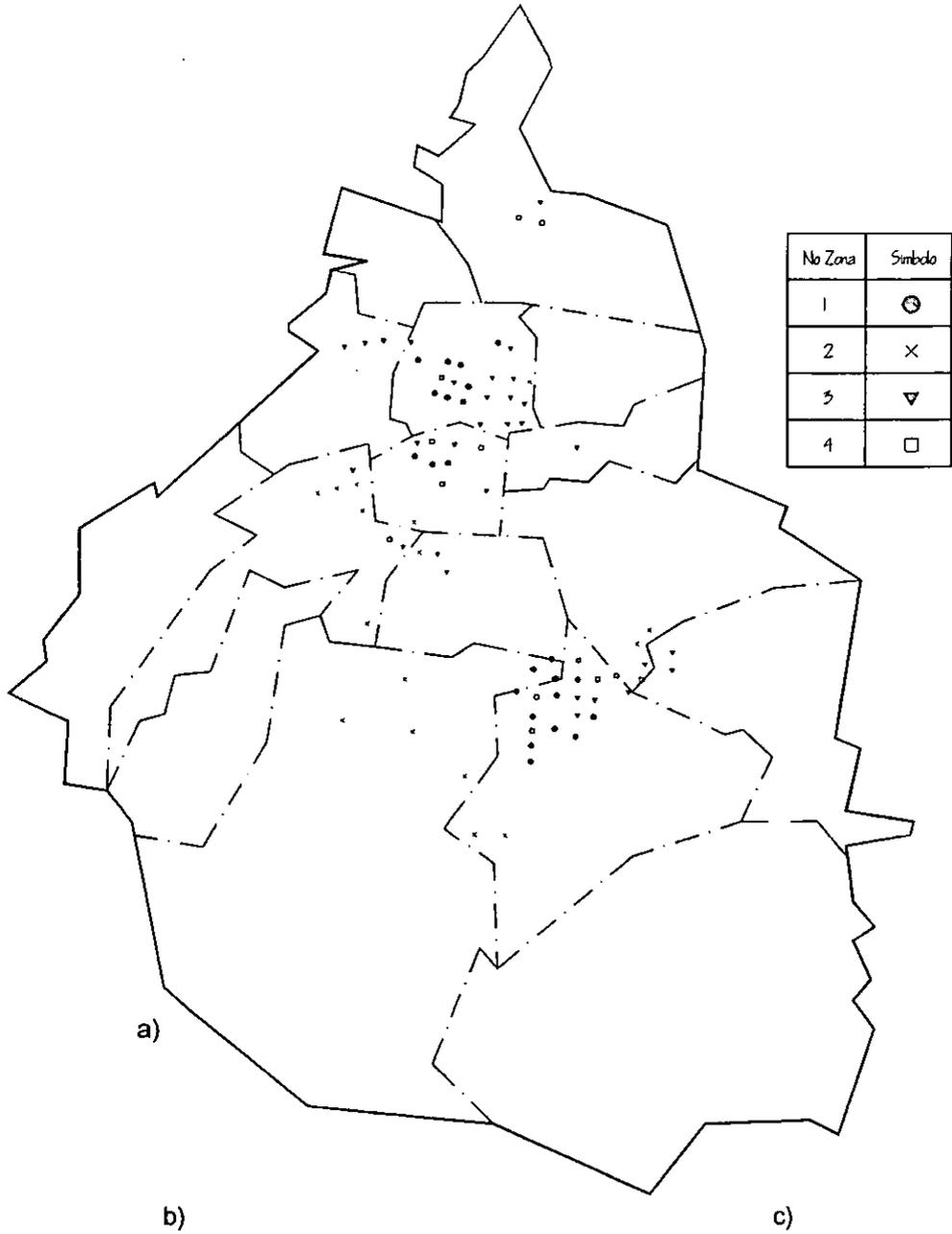


Fig. 5.20 a) Zonación en 1D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para el tipo de estructura 4, considerando 751 celdas.



No. Zona	$c_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.1181	4 164 570
2	0.0743	2 240 970
3	0.1058	3 738 040
4	0.1389	2 557 770
	<b><math>W_{TOTAL} =</math></b>	<b>12 701 350</b>

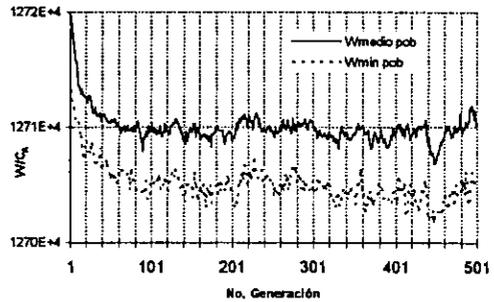
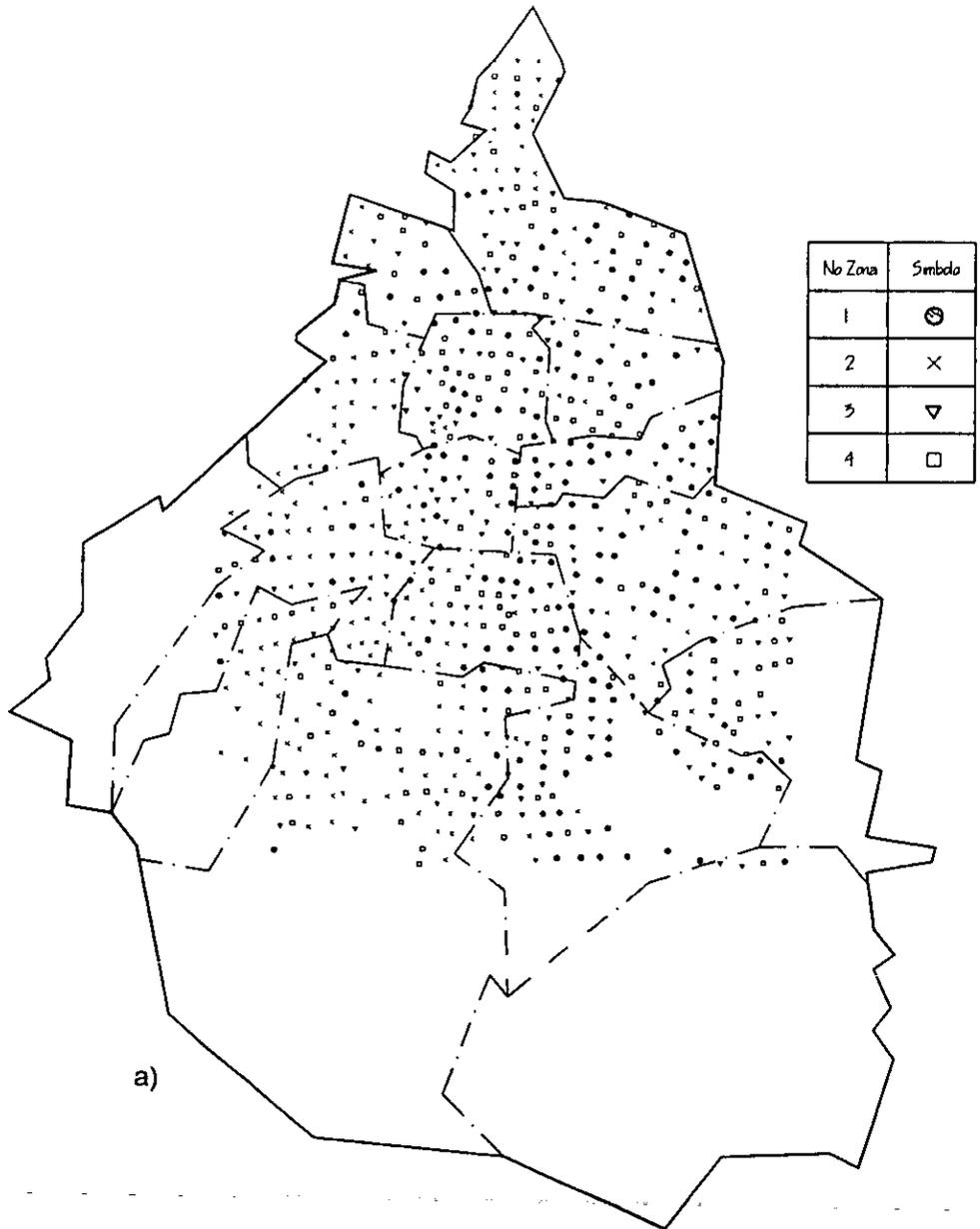


Fig. 5.21 a) Zonación en 1D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para el tipo de estructura 7, considerando 751 celdas.



a)

b)

c)

No. Zona	$C_{1k}$	$W_{1k}/C_A$	$C_{2k}$	$W_{2k}/C_A$
1	0.0694	84 981 800	0.0931	28 695 400
2	0.0610	84 356 100	0.0660	24 234 200
3	0.0826	75 309 400	0.0848	22 586 500
4	0.0860	64 159 900	0.0901	25 933 500
		$W_{TOTAL} = 410\ 256\ 800$		

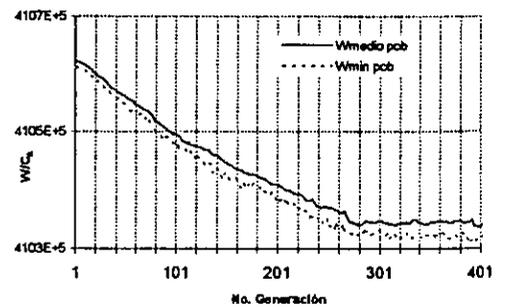
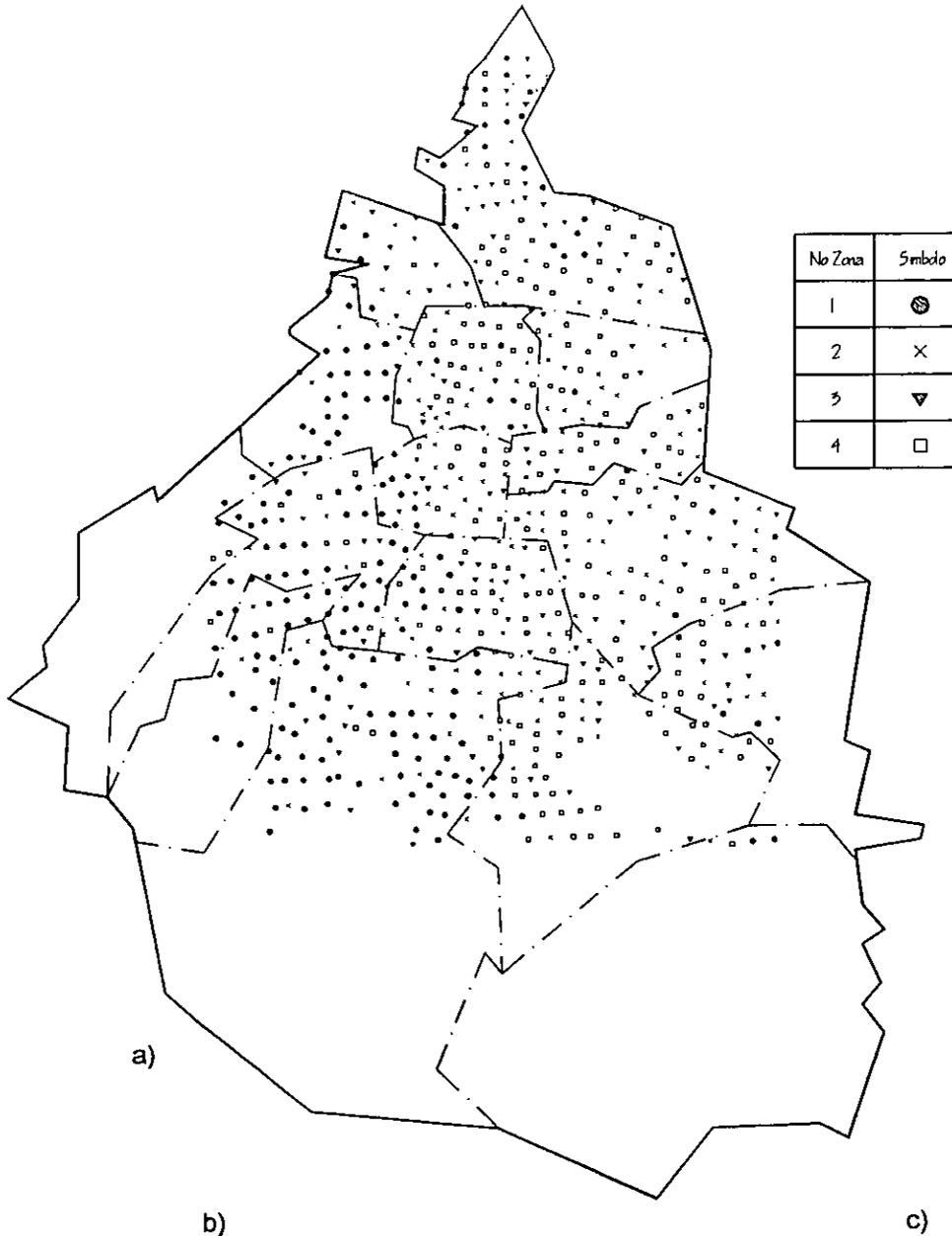


Fig. 5.22 a) Zonación en 2D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1 y 2, considerando 751 celdas.



No. Zona	$C_{1k}$	$W_{1k}/C_A$	$C_{4k}$	$W_{4k}/C_A$
1	0.0596	96 667 600	0.0929	18 819 200
2	0.0873	61 240 500	0.1168	10 090 500
3	0.0806	53 131 100	0.1080	8 880 890
4	0.0910	97 676 900	0.1213	13 841 000
<b><math>W_{TOTAL} = 360\ 347\ 690</math></b>				

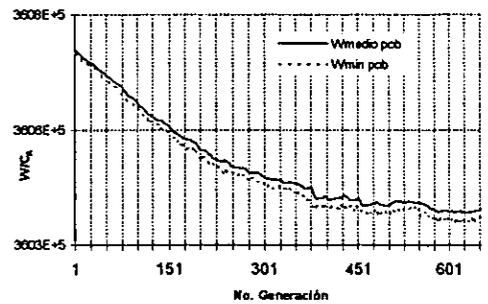
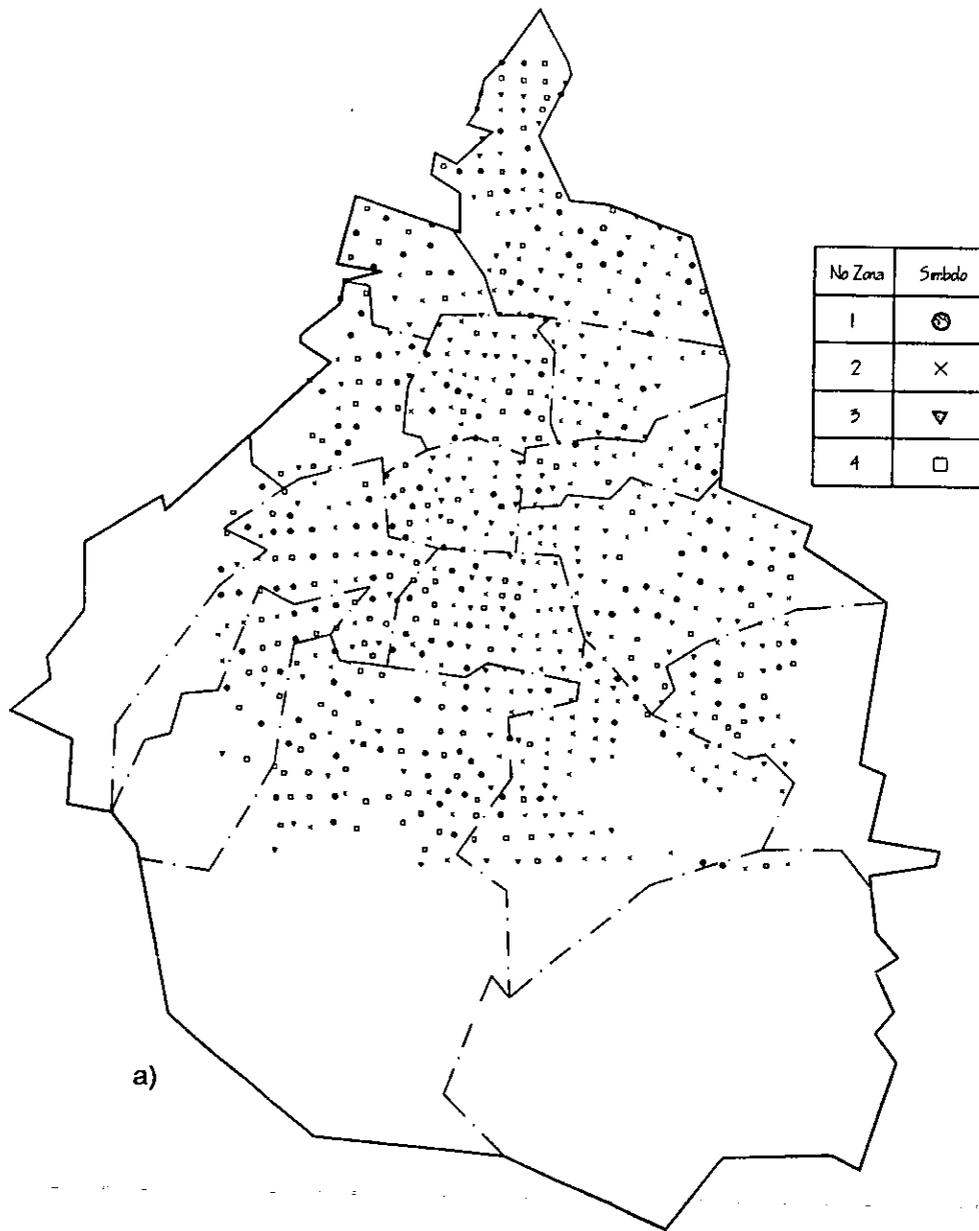


Fig. 5.23 a) Zonación en 2D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1 y 4, considerando 751 celdas.



a)

b)

No. Zona	$C_{1k}$	$W_{1k}/C_A$	$C_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.0708	72 819 100	0.1190	2 615 720
2	0.0886	91 931 800	0.1268	4 759 200
3	0.0892	75 892 200	0.1041	3 468 070
4	0.0659	68 209 700	0.1057	1 875 490
$W_{TOTAL} = 321\ 571\ 280$				

c)

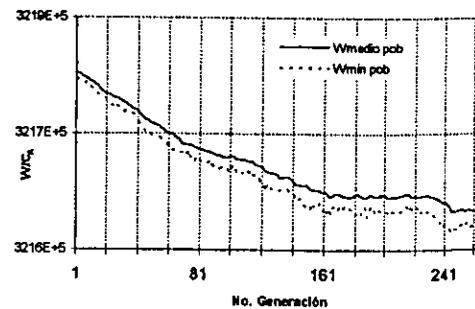
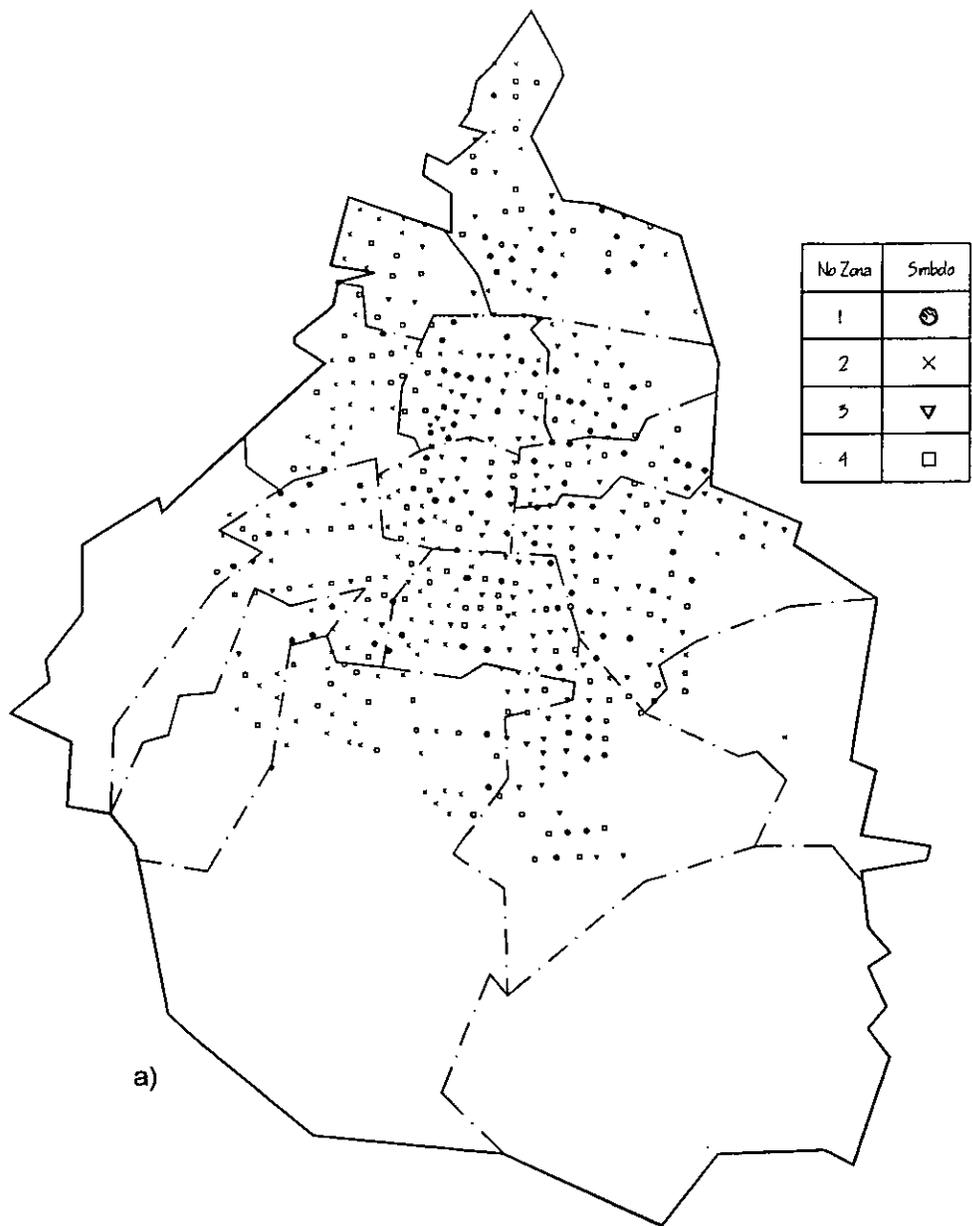


Fig. 5.24 a) Zonación en 2D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1 y 7, considerando 751 celdas.



a)

b)

c)

No. Zona	$c_{2k}$	$W_{2k}/C_A$	$c_{4k}$	$W_{4k}/C_A$
1	0.0928	20 769 900	0.1173	7 546 960
2	0.0658	28 622 100	0.0899	15 546 300
3	0.0953	28 035 400	0.1264	15 008 200
4	0.0824	23 997 400	0.0980	13 505 700
<b><math>W_{TOTAL} =</math></b>			<b>153 031 960</b>	

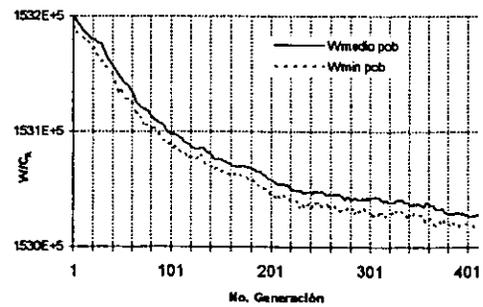
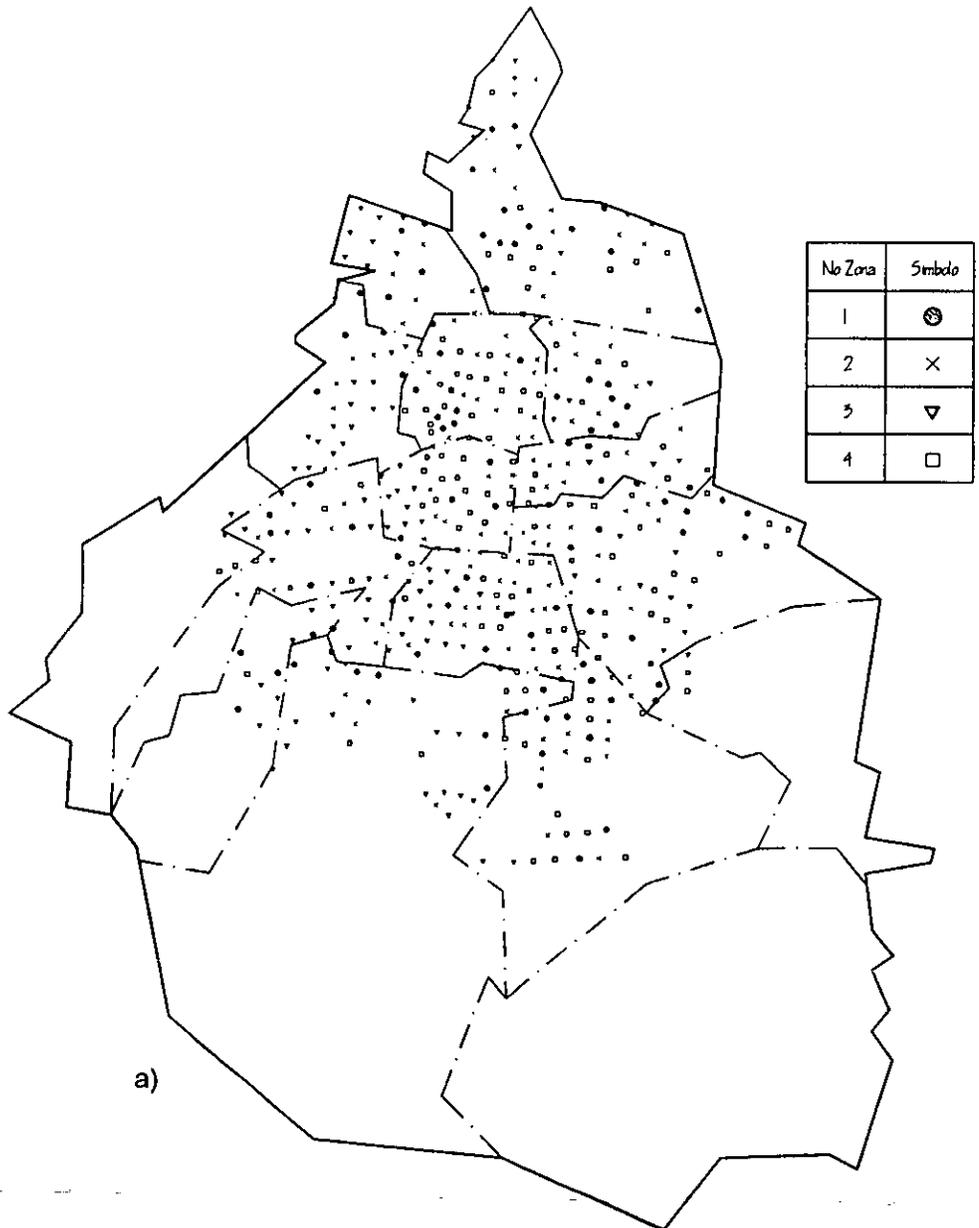


Fig. 5.25 a) Zonación en 2D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 2 y 4, considerando 751 celdas.



a)

b)

c)

No. Zona	$C_{2k}$	$W_{2k}/C_A$	$C_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.0845	18 923 200	0.1302	4 029 950
2	0.0939	27 501 700	0.1178	3 432 790
3	0.0658	31 251 100	0.0890	1 828 450
4	0.0945	23 743 800	0.1088	3 422 490
$W_{TOTAL} = 114 133 480$				

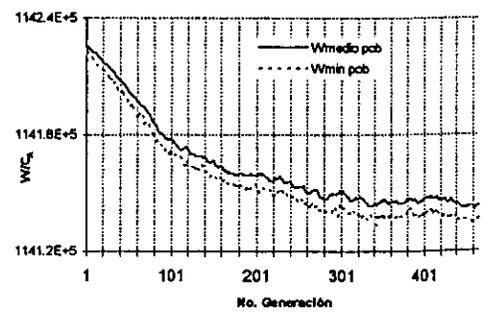
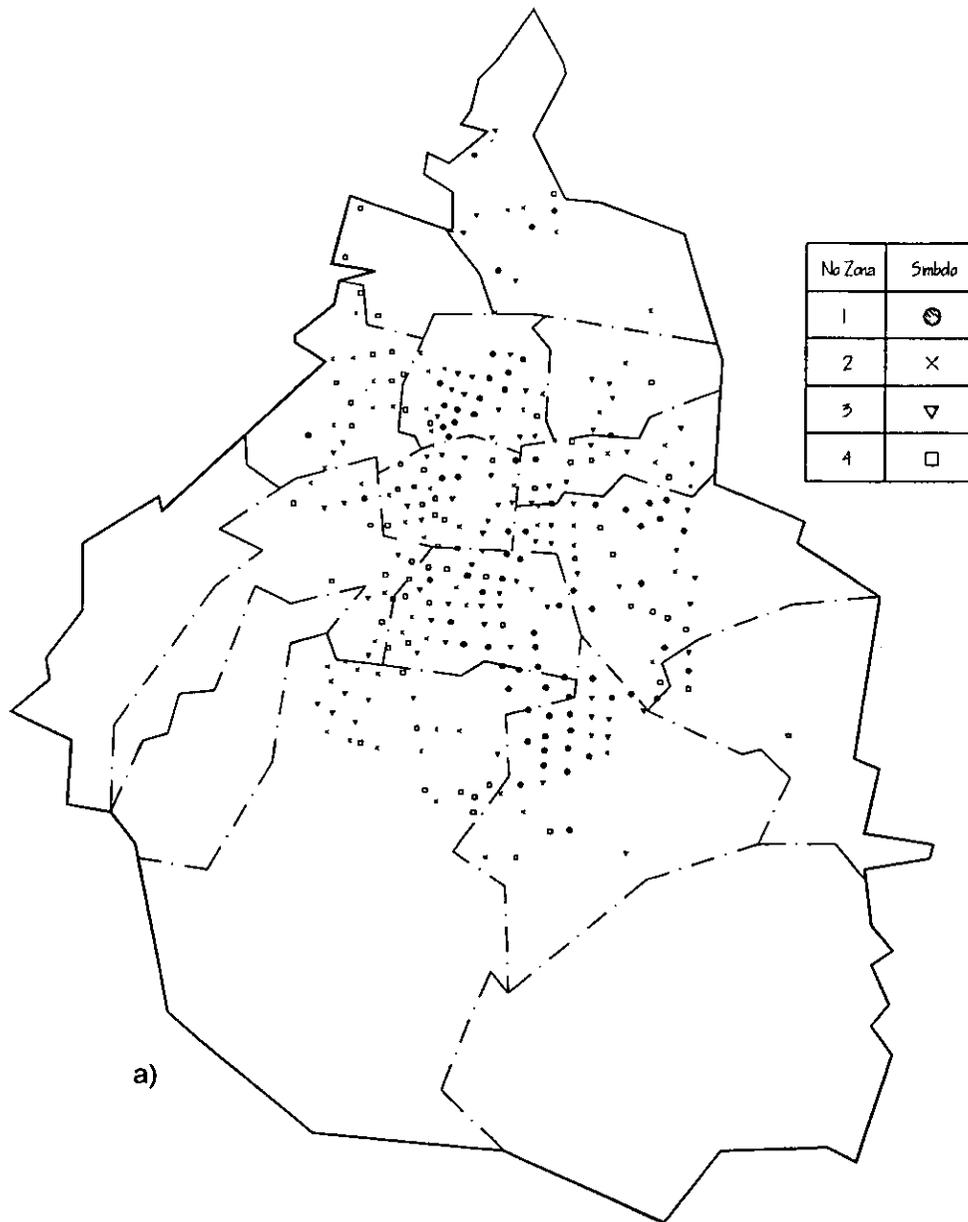


Fig. 5.26 a) Zonación en 2D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 2 y 7, considerando 751 celdas.



a)

b)

c)

No. Zona	$C_{4k}$	$W_{4k}/C_A$	$C_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.1312	10 877 000	0.1277	6 472 680
2	0.0942	14 265 800	0.0871	1 253 240
3	0.1159	11 791 800	0.1092	3 563 230
4	0.0917	14 665 700	0.0942	1 422 710
				<b><math>W_{TOTAL} = 64 312 160</math></b>

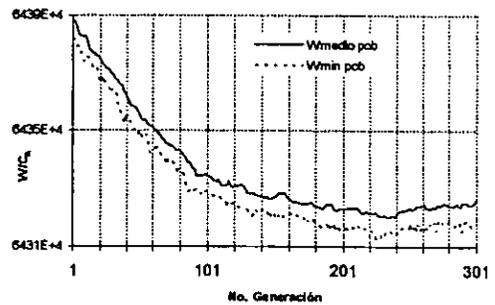
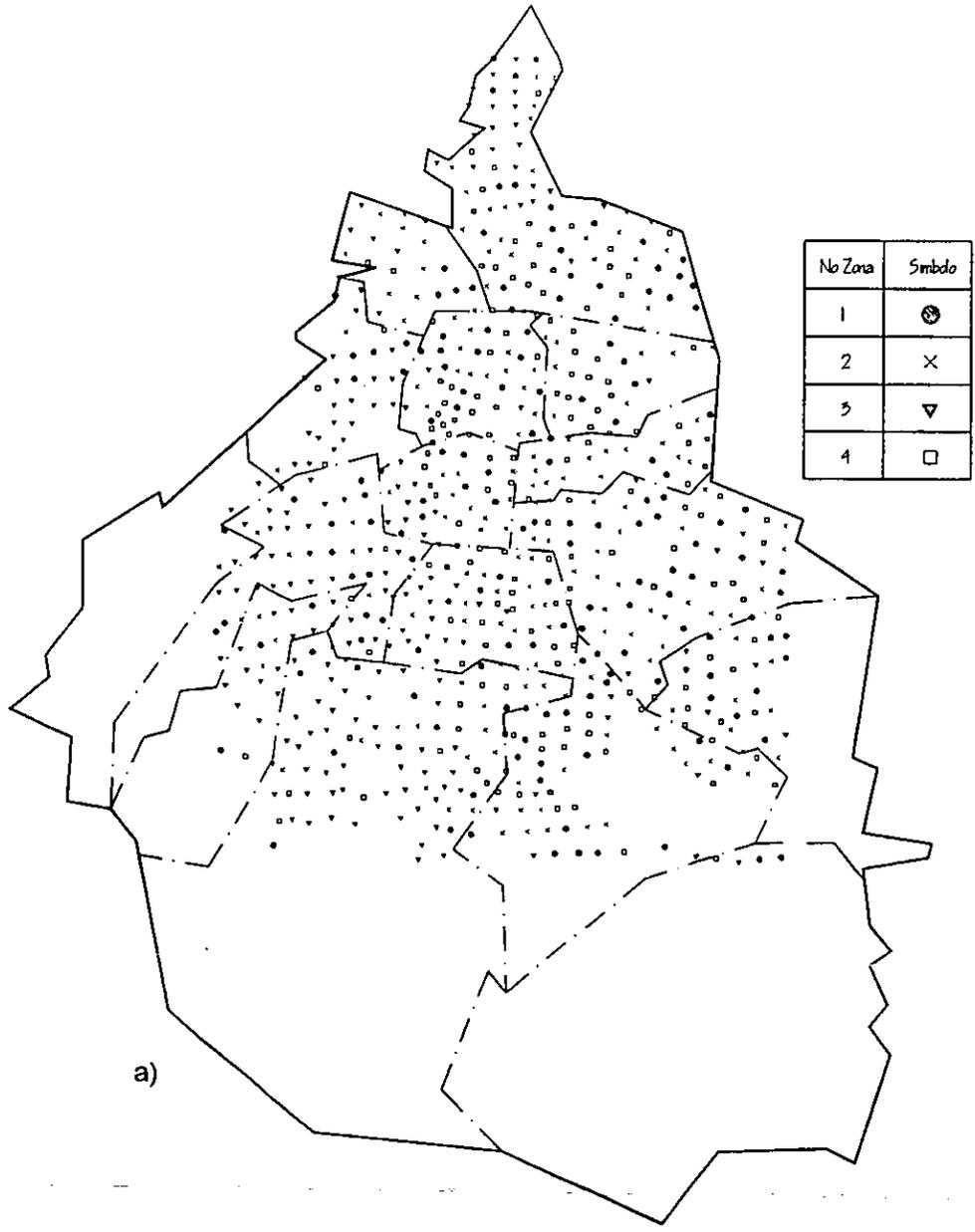


Fig. 5.27 a) Zonación en 2D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 4 y 7, considerando 751 celdas.



a)

b)

c)

No. Zona	$c_{1k}$	$W_{1k}/C_A$	$c_{2k}$	$W_{2k}/C_A$	$c_{4k}$	$W_{4k}/C_A$
1	0.0851	69 844 200	0.0863	19 109 200	0.1139	9 686 360
2	0.0862	81 912 800	0.0898	29 897 200	0.1154	10 067 900
3	0.0599	86 971 100	0.0654	27 240 400	0.0917	17 749 900
4	0.0885	70 056 900	0.0944	25 190 600	0.1187	14 129 600
$W_{TOTAL} = 461 856 160$						

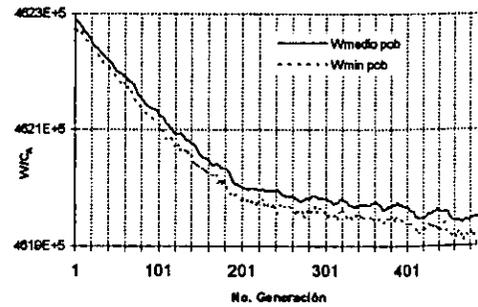
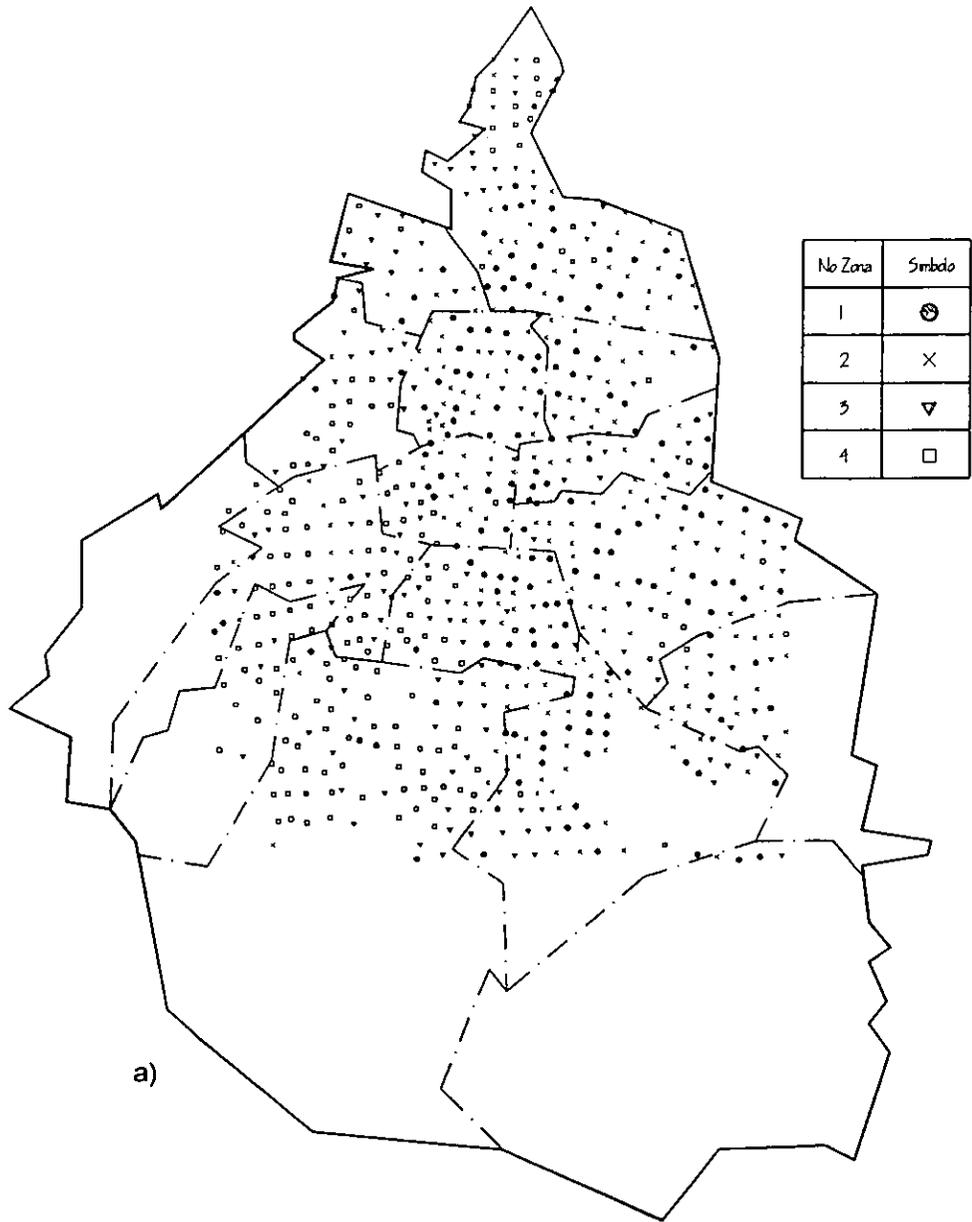


Fig. 5.28 a) Zonación en 3D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1, 2 y 4, considerando 751 celdas.



a)

b)

c)

No. Zona	$c_{1k}$	$W_{1k}/C_A$	$c_{2k}$	$W_{2k}/C_A$	$c_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.0905	71 584 000	0.0945	28 654 100	0.1093	4 715 090
2	0.0919	87 026 400	0.0952	26 993 300	0.1291	5 693 100
3	0.0730	68 155 400	0.0773	20 448 200	0.0950	980 520
4	0.0575	81 891 600	0.0631	25 307 800	0.0880	1 323 500
<b><math>W_{TOTAL} = 422 773 010</math></b>						

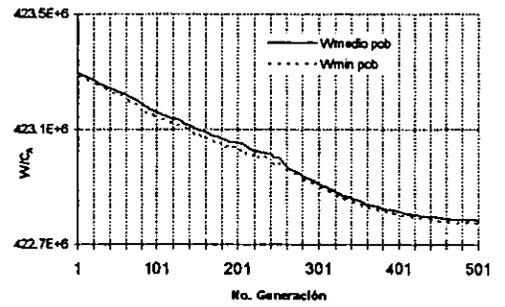
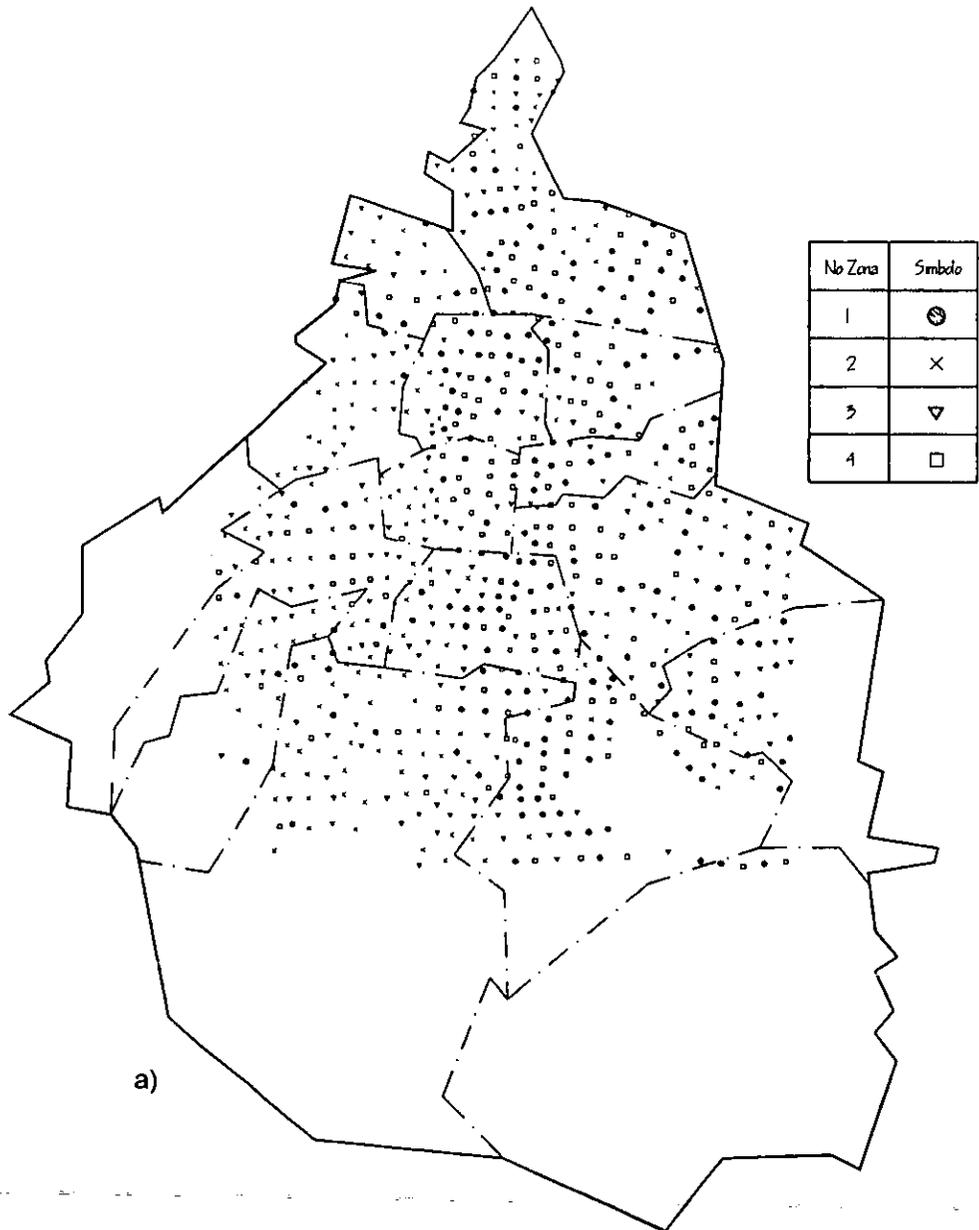


Fig. 5.29 a) Zonación en 3D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1, 2 y 7, considerando 751 celdas.



a)

b)

c)

No. Zona	$c_{1k}$	$W_{1k}/C_A$	$c_{4k}$	$W_{4k}/C_A$	$c_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.0887	85 520 500	0.1215	12 183 900	0.1207	5 615 130
2	0.0638	74 734 100	0.0939	15 523 900	0.0989	2 199 540
3	0.0731	69 659 000	0.0964	12 182 200	0.1144	1 435 510
4	0.0896	78 917 600	0.1218	11 732 600	0.1211	3 470 400
<b><math>W_{TOTAL} = 373\ 174\ 380</math></b>						

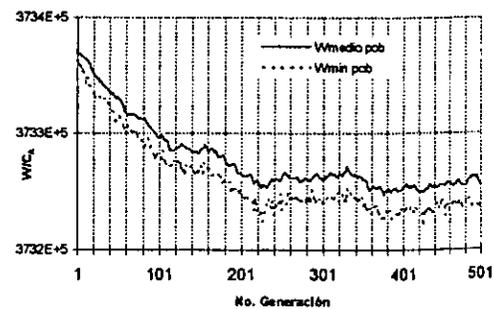
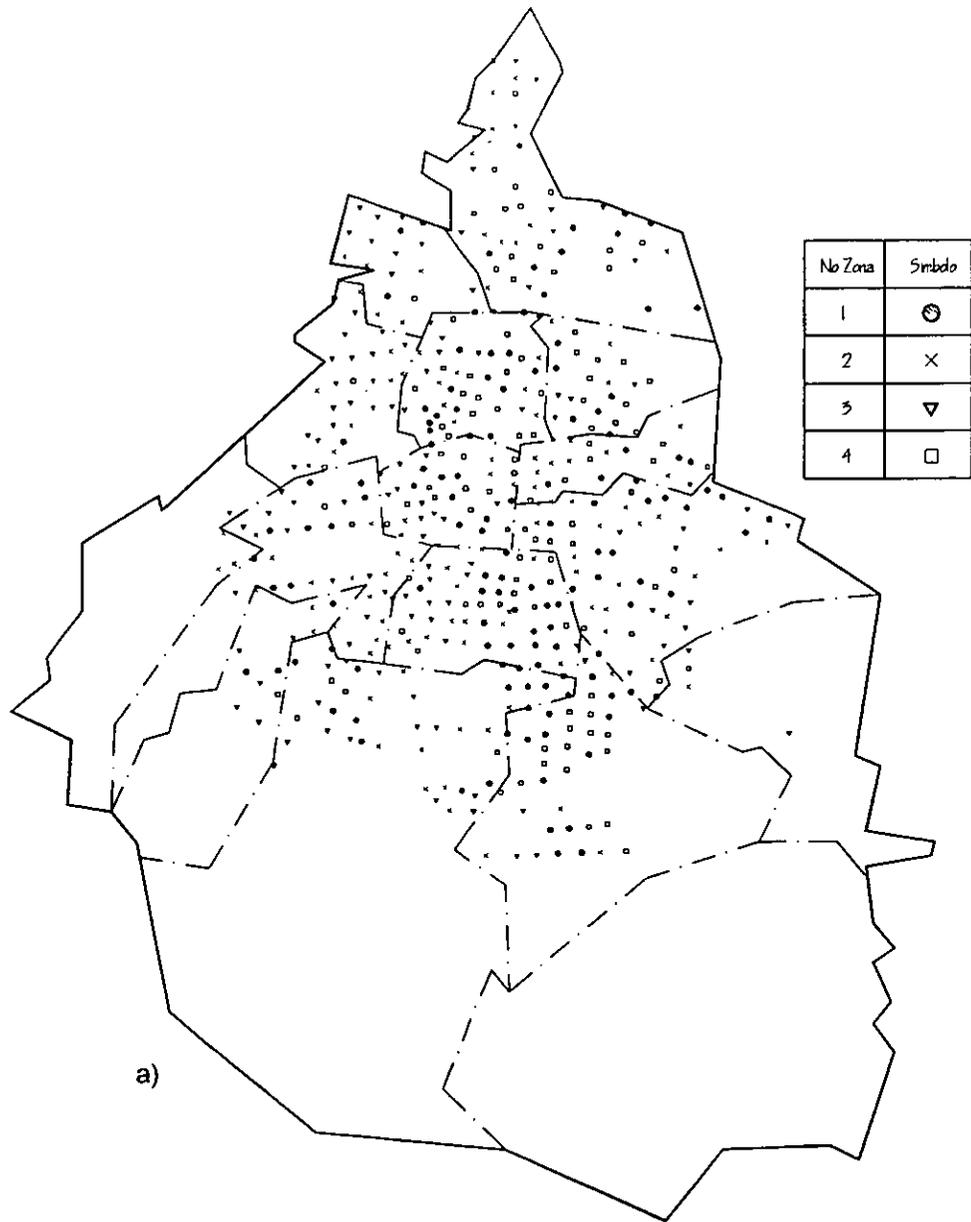


Fig. 5.30 a) Zonación en 3D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1, 4 y 7, considerando 751 celdas.



a)

b)

c)

No. Zona	$C_{2k}$	$W_{2k}/C_A$	$C_{4k}$	$W_{4k}/C_A$	$C_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.0907	23 266 100	0.1211	12 587 700	0.1283	5 236 800
2	0.0830	21 449 100	0.0973	9 130 830	0.0991	1 306 800
3	0.0703	30 611 100	0.0919	18 842 800	0.0895	1 579 130
4	0.0945	26 129 200	0.1243	11 052 000	0.1138	4 591 130
$W_{TOTAL} = 165\ 782\ 690$						

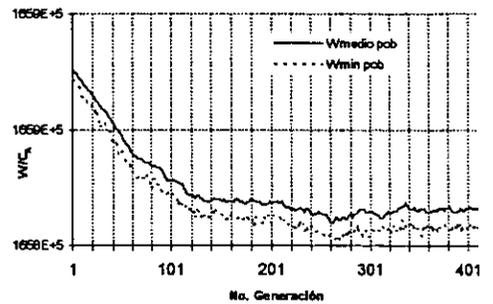
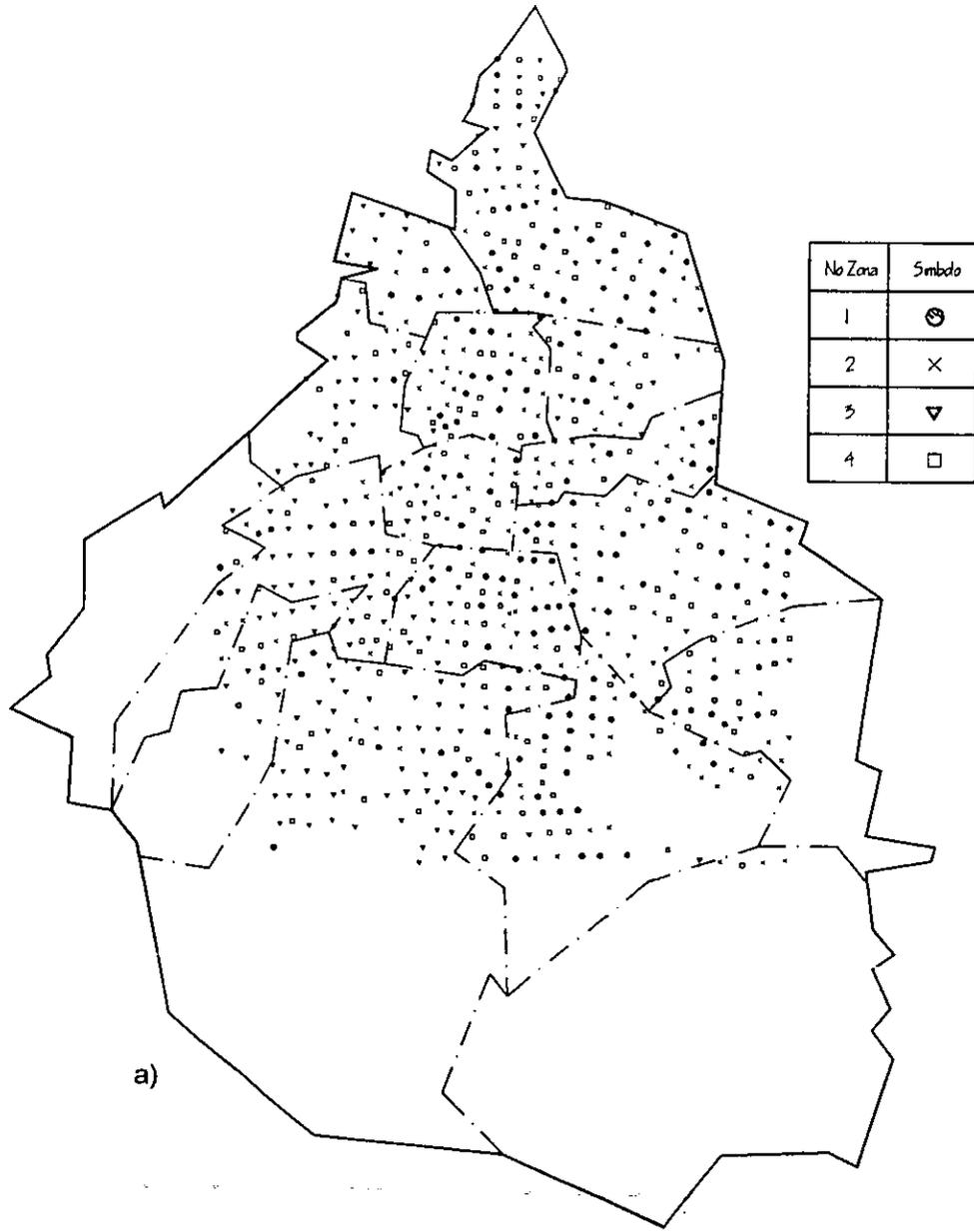


Fig. 5.31 a) Zonación en 3D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 2, 4 y 7, considerando 751 celdas.



a)

b)

c)

No Zona	1	2	3	4
$c_{1k}$	0.0907	0.0877	0.0609	0.0795
$W_{1k}/C_A$	75 562 200	81 040 600	88 986 900	63 183 800
$c_{2k}$	0.0953	0.0914	0.0663	0.0864
$W_{2k}/C_A$	25 023 800	24 697 500	30 470 000	21 238 000
$c_{4k}$	0.1234	0.1111	0.0907	0.1127
$W_{4k}/C_A$	13 612 500	12 333 500	17 803 100	7 876 050
$c_{7k}$	0.1222	0.1152	0.0956	0.1134
$W_{7k}/C_A$	6 563 800	1 674 780	1 373 630	3 108 510
$W_{TOTAL} = 474 548 670$				

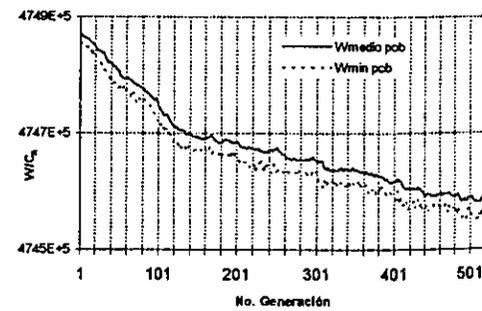
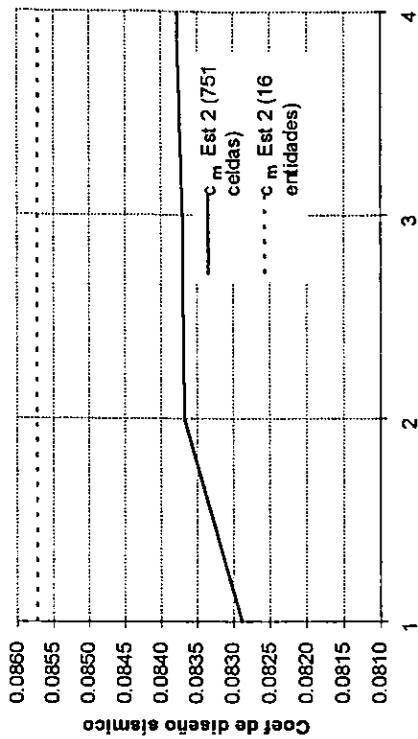
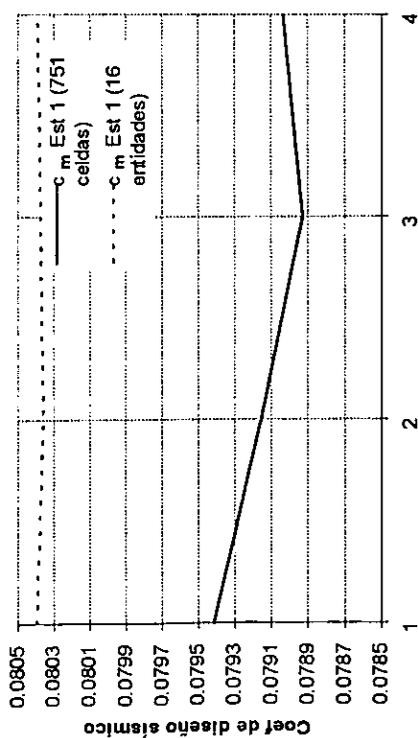


Fig. 5.32 a) Zonación en 4D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1, 2, 4 y 7, considerando 751 celdas.



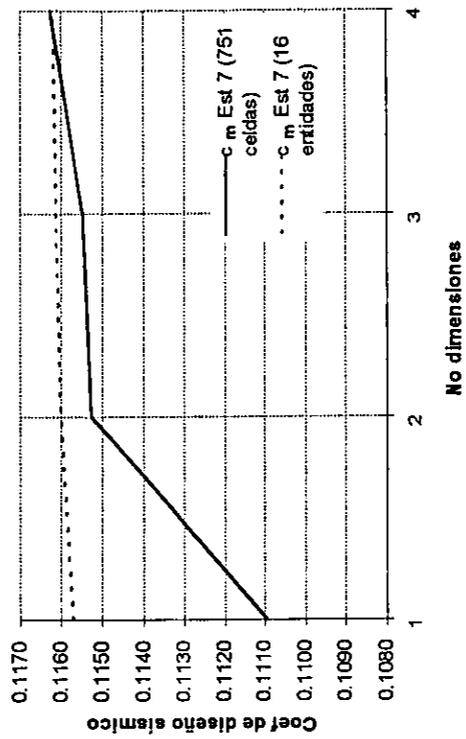
No dimensiones

a)



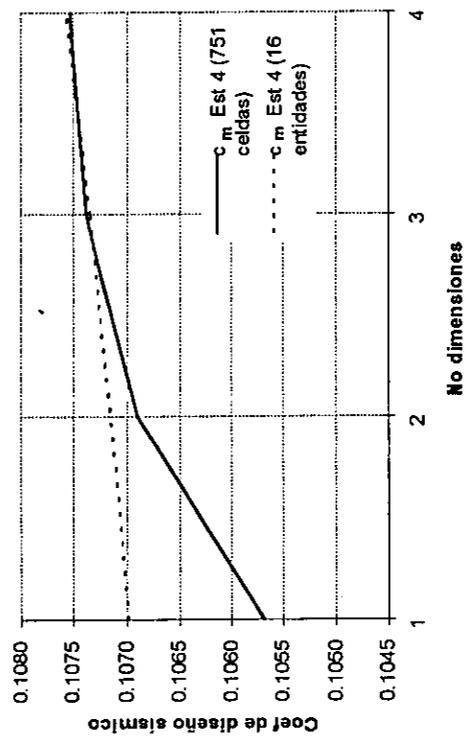
No dimensiones

b)



No dimensiones

c)



No dimensiones

d)

Fig. 5.33 Coeficientes de diseño sísmico medios ( $c_m$ ) asociados a las estructuras a) tipo 1, b) tipo 2, c) tipo 4 y d) tipo 7, correspondientes a las zonaciones en 1 - 4 dimensiones.

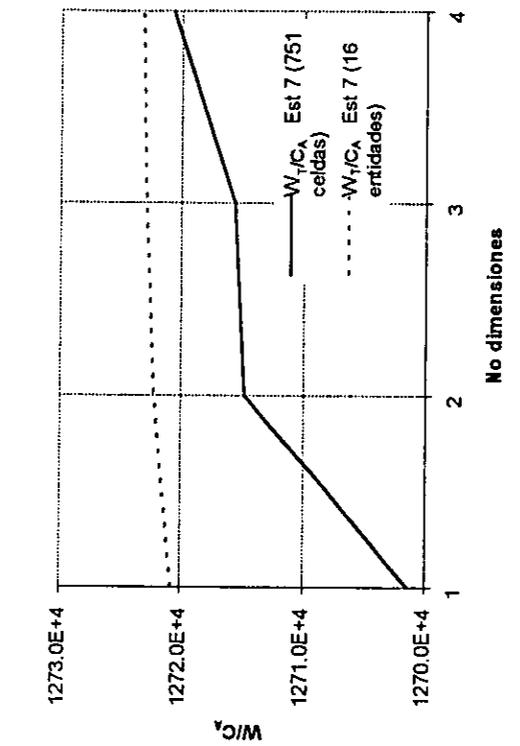
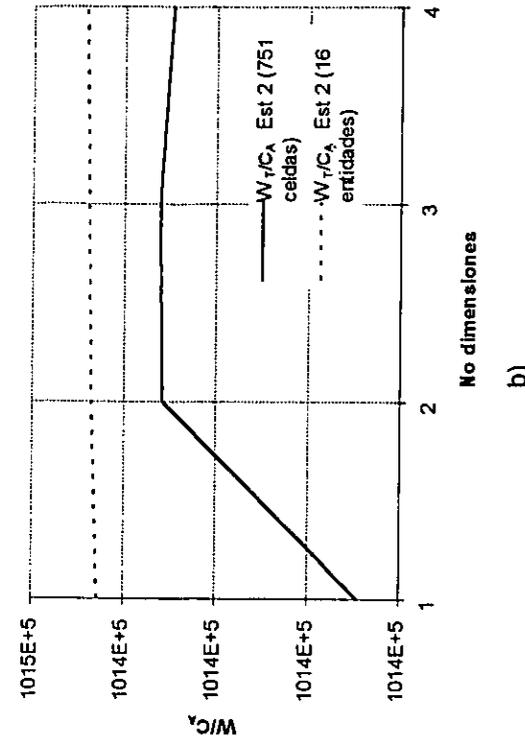
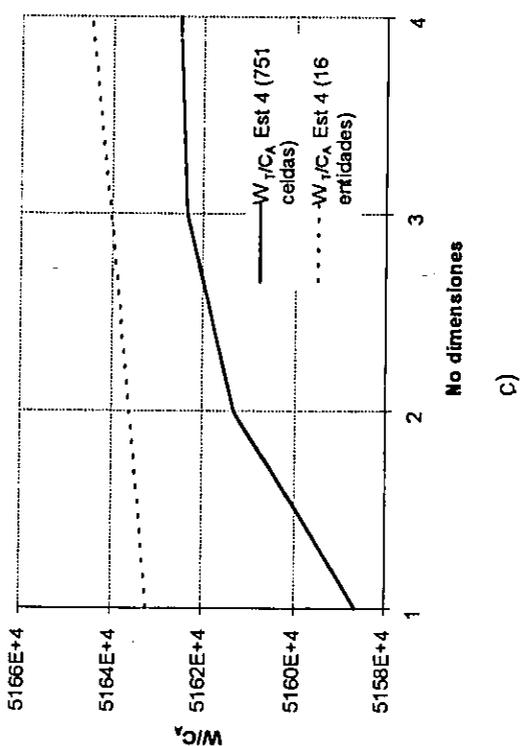
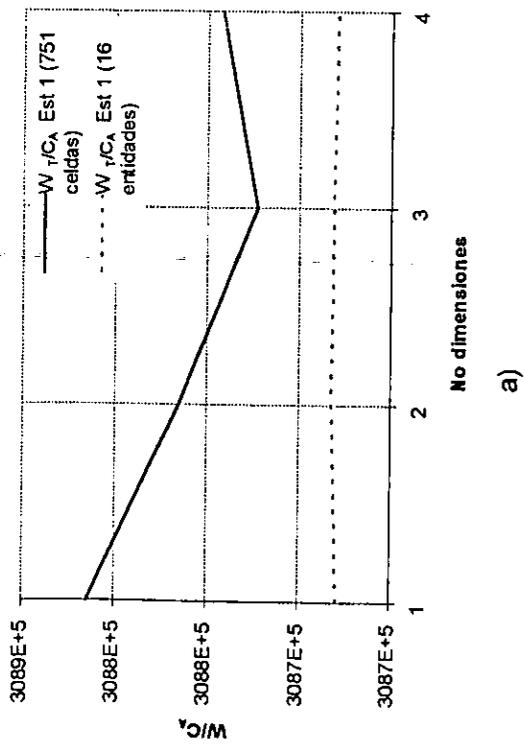


Fig. 5.34 Costos totales medios (W<sub>7</sub>/C<sub>A</sub>) asociados a las estructuras a) tipo 1, b) tipo 2, c) tipo 4 y d) tipo 7, correspondientes a las zonaciones en 1 - 4 dimensiones.

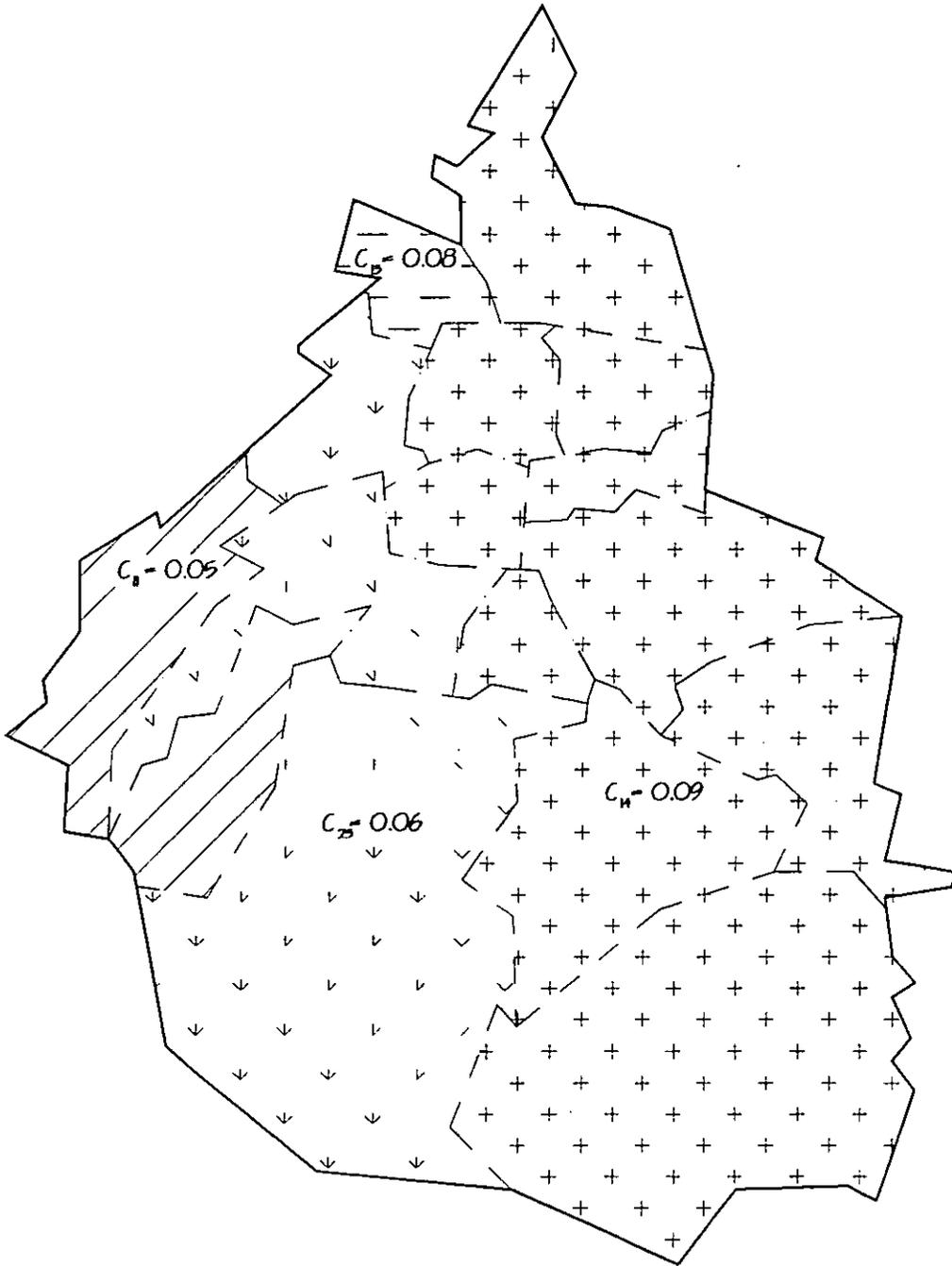


Fig. 5.35 Zonación 1D, Tipo de estructura 1, considerando 16 entidades.

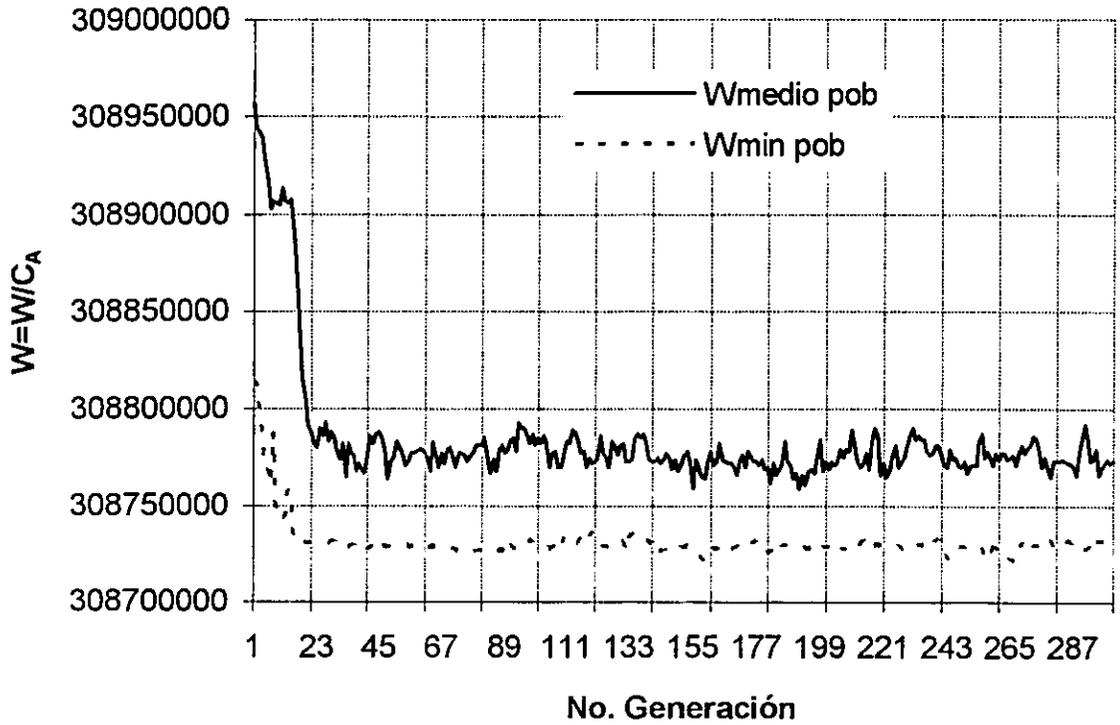
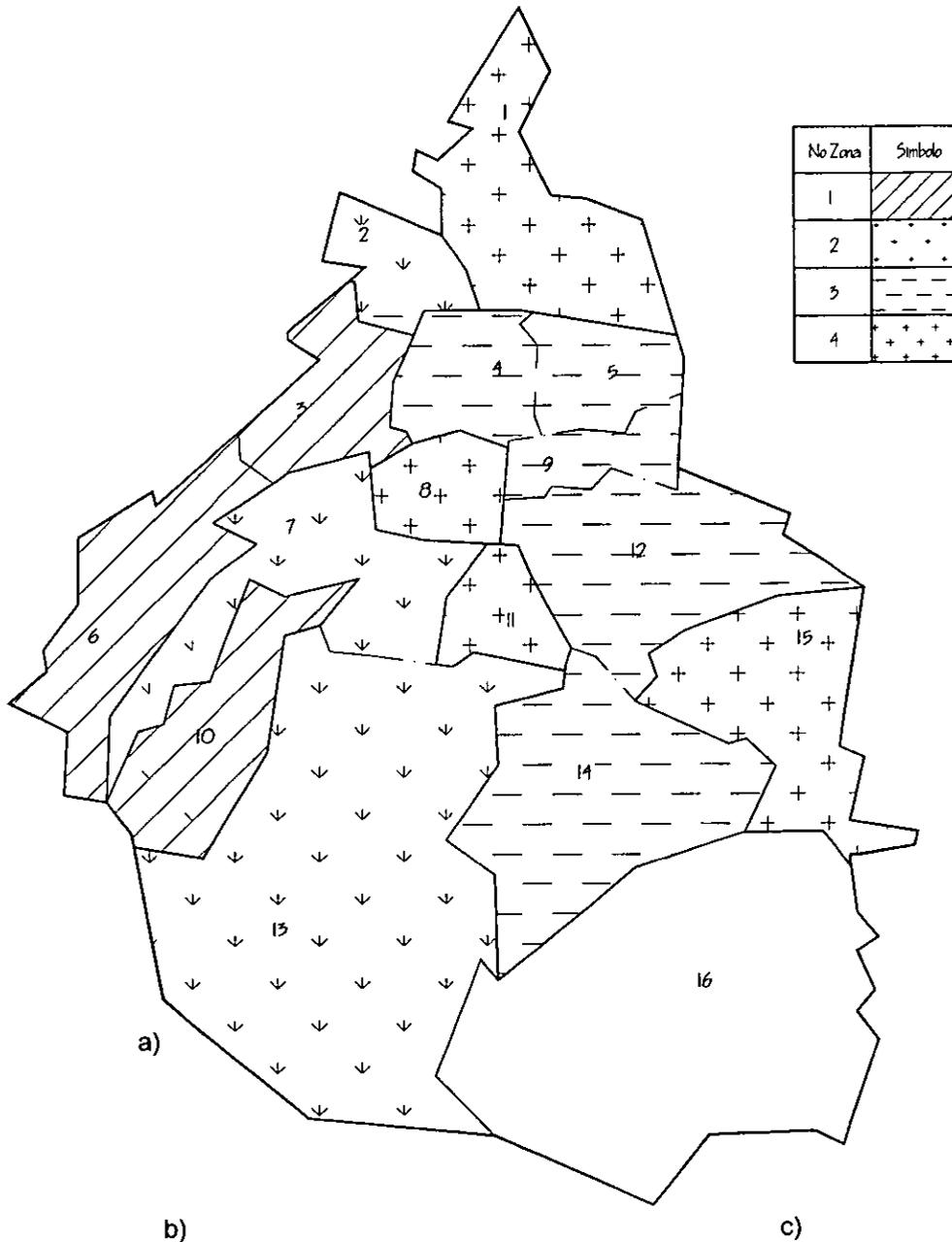


Fig. 5.36 Convergencia de los costos de la población durante la simulación. Zonación 1D, Tipo de estructura 1, considerando 16 entidades.



No Zona	Simbolo
1	Diagonal lines
2	Dots
3	Horizontal lines
4	Plus signs

No. Zona	$C_{2k}$	$W_{2k}/C_A$
1	0.0682	13 715 300
2	0.0782	24 014 400
3	0.0959	28 830 700
4	0.0893	34 885 200
	$W_{TOTAL} =$	101 445 600

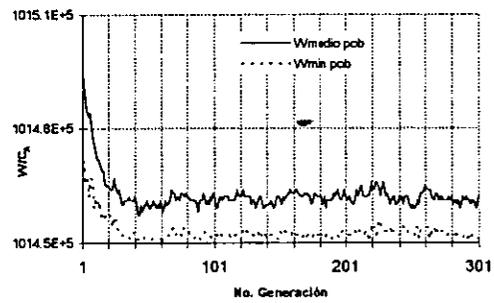
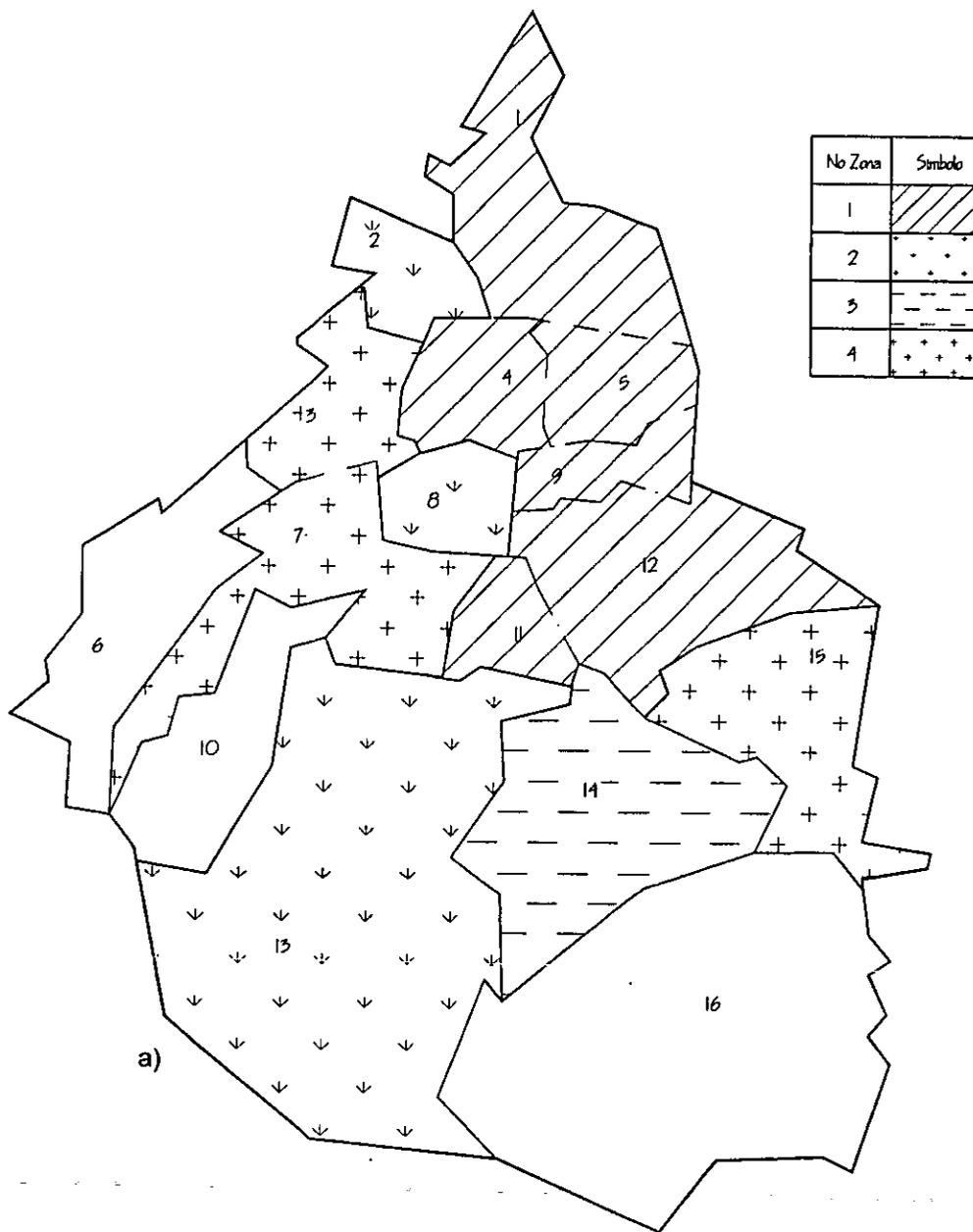


Fig. 5.37 a) Zonación en 1D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para el tipo de estructura 2, considerando 16 entidades.



a)

b)

No. Zona	$C_{4k}$	$W_{4k}/C_A$
1	0.1146	23 672 400
2	0.1011	13 724 500
3	0.1286	3 976 930
4	0.0890	10 258 100
$W_{TOTAL} =$		51 631 930

c)

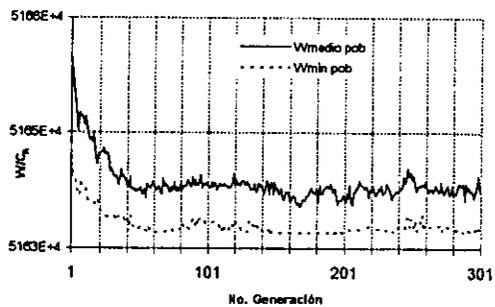
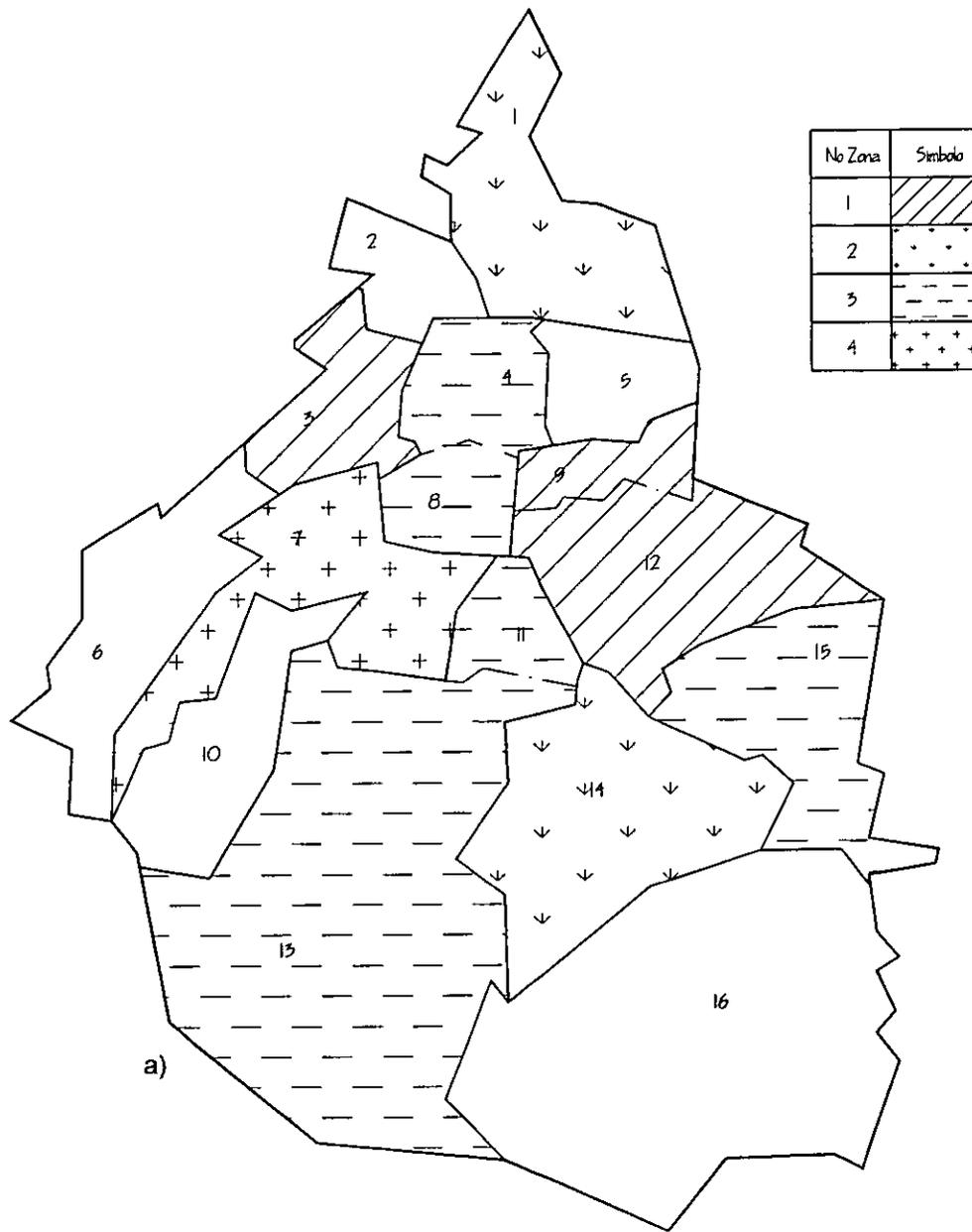


Fig. 5.38 a) Zonación en 1D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para el tipo de estructura 4, considerando 16 entidades.



a)

b)

No. Zona	$C_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.1001	742 397
2	0.1219	7 065 010
3	0.1100	4 748 600
4	0.0867	164 717
	$W_{TOTAL} =$	12 720 724

c)

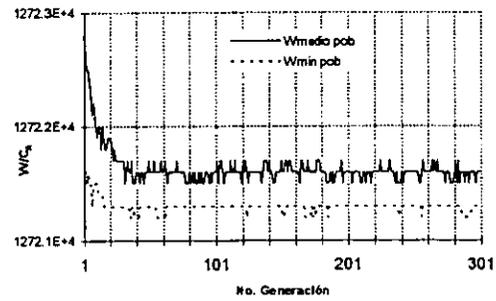
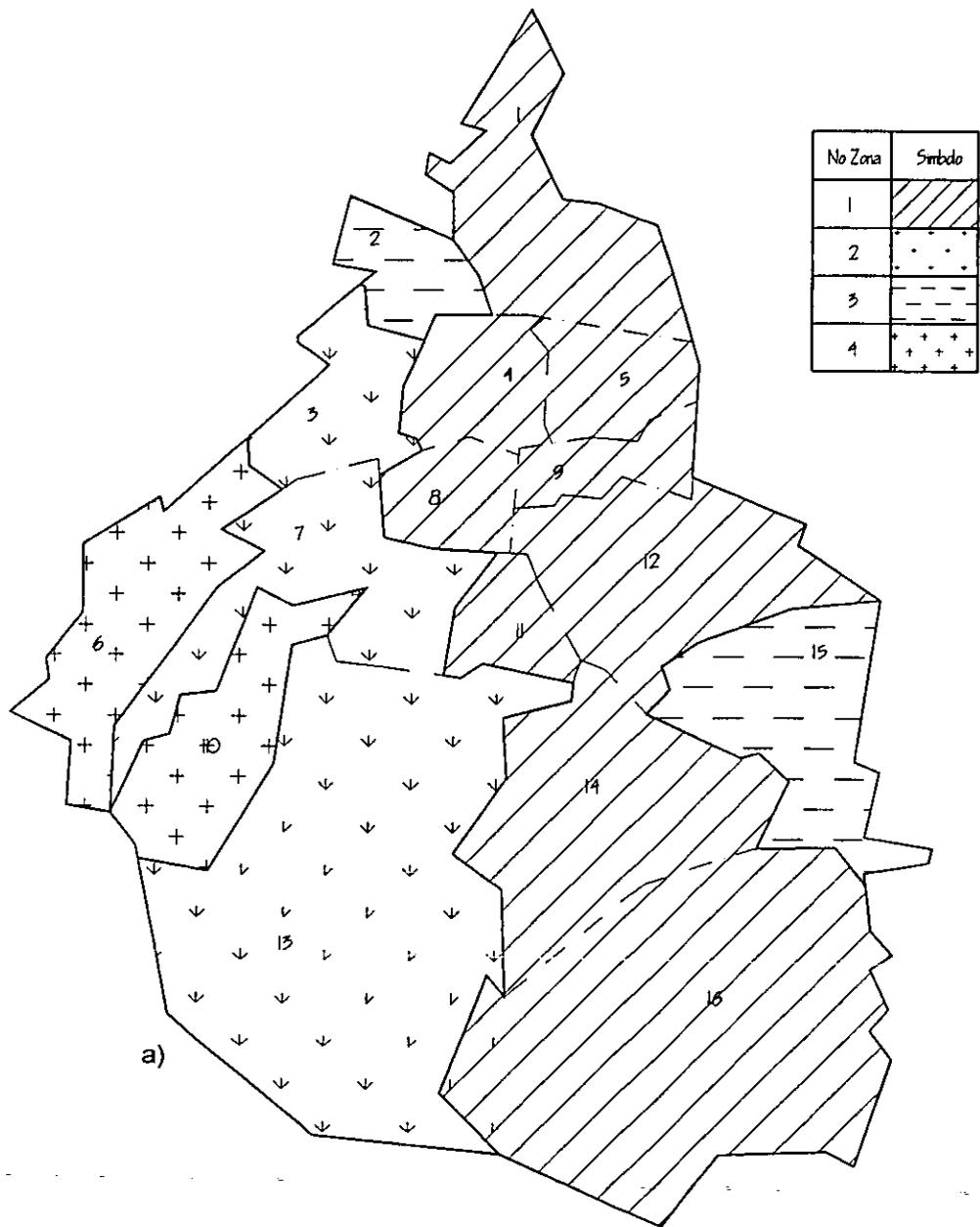


Fig. 5.39 a) Zonación en 1D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para el tipo de estructura 7, considerando 16 entidades.



b)

c)

No. Zona	$C_{1k}$	$W_{1k}/C_A$	$C_{2k}$	$W_{2k}/C_A$
1	0.0892	185 920 000	0.0925	63 324 800
2	0.0646	78 635 100	0.0738	24 367 400
3	0.0823	28 890 700	0.0800	11 426 700
4	0.0507	15 279 800	0.0550	2 329 440
$W_{TOTAL} = 410 173 940$				

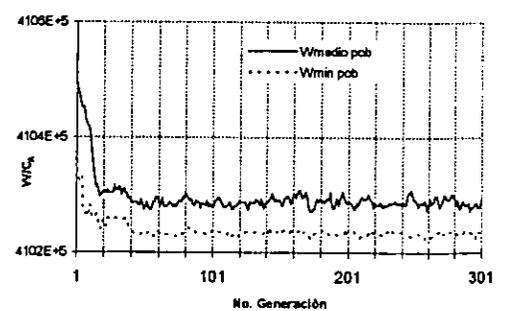
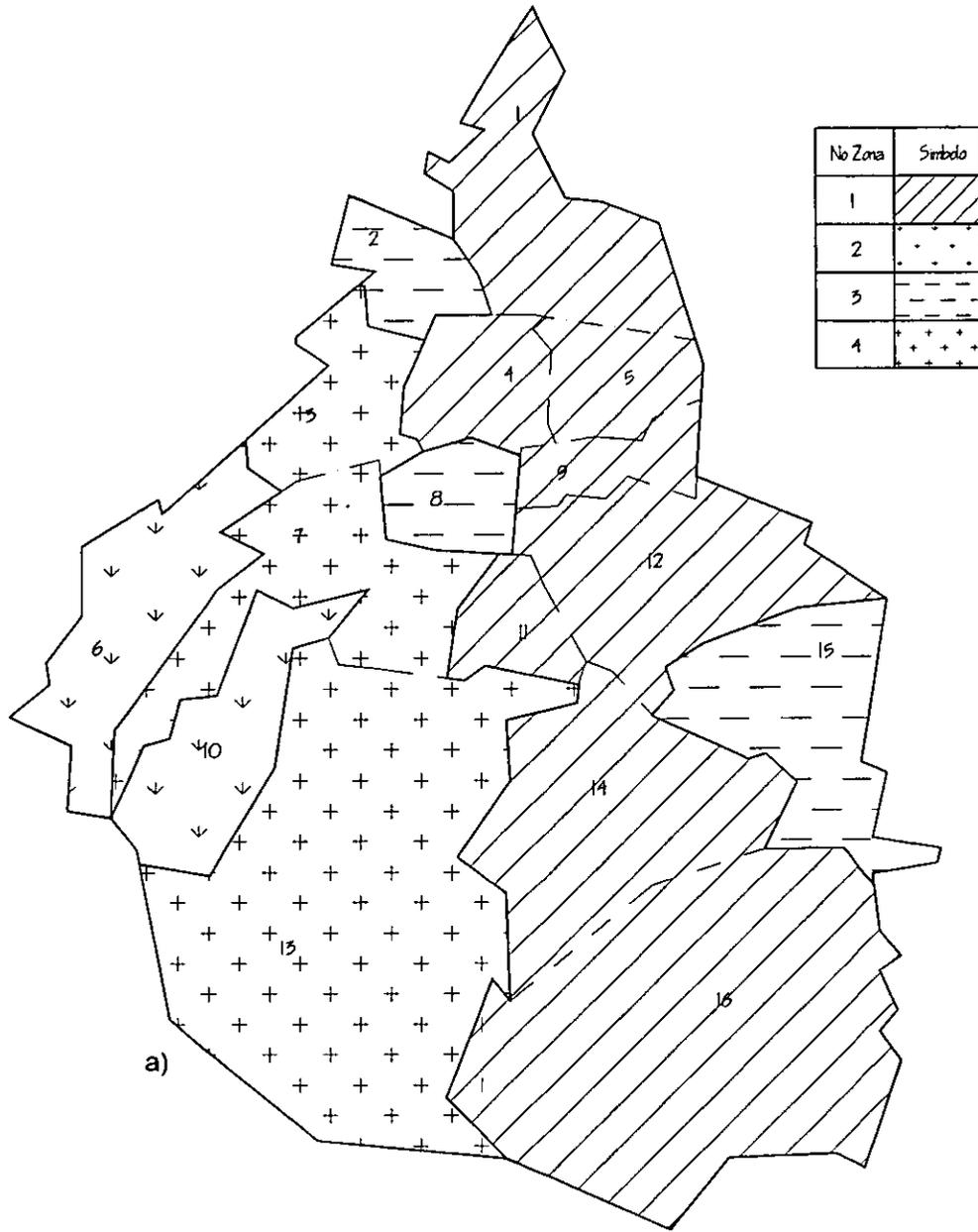


Fig. 5.40 a) Zonación en 2D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1 y 2, considerando 16 entidades



b)

No. Zona	$c_{1k}$	$W_{1k}/C_A$	$c_{4k}$	$W_{4k}/C_A$
1	0.0892	168 664 000	0.1169	27 652 700
2	0.0507	15 279 800	0.0000	
3	0.0845	46 149 400	0.1002	7 603 900
4	0.0646	78 635 100	0.0944	16 382 300
		$W_{TOTAL} =$	360 367 200	

c)

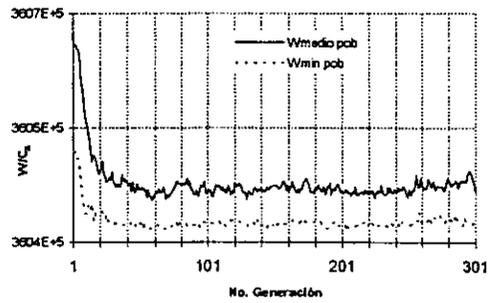
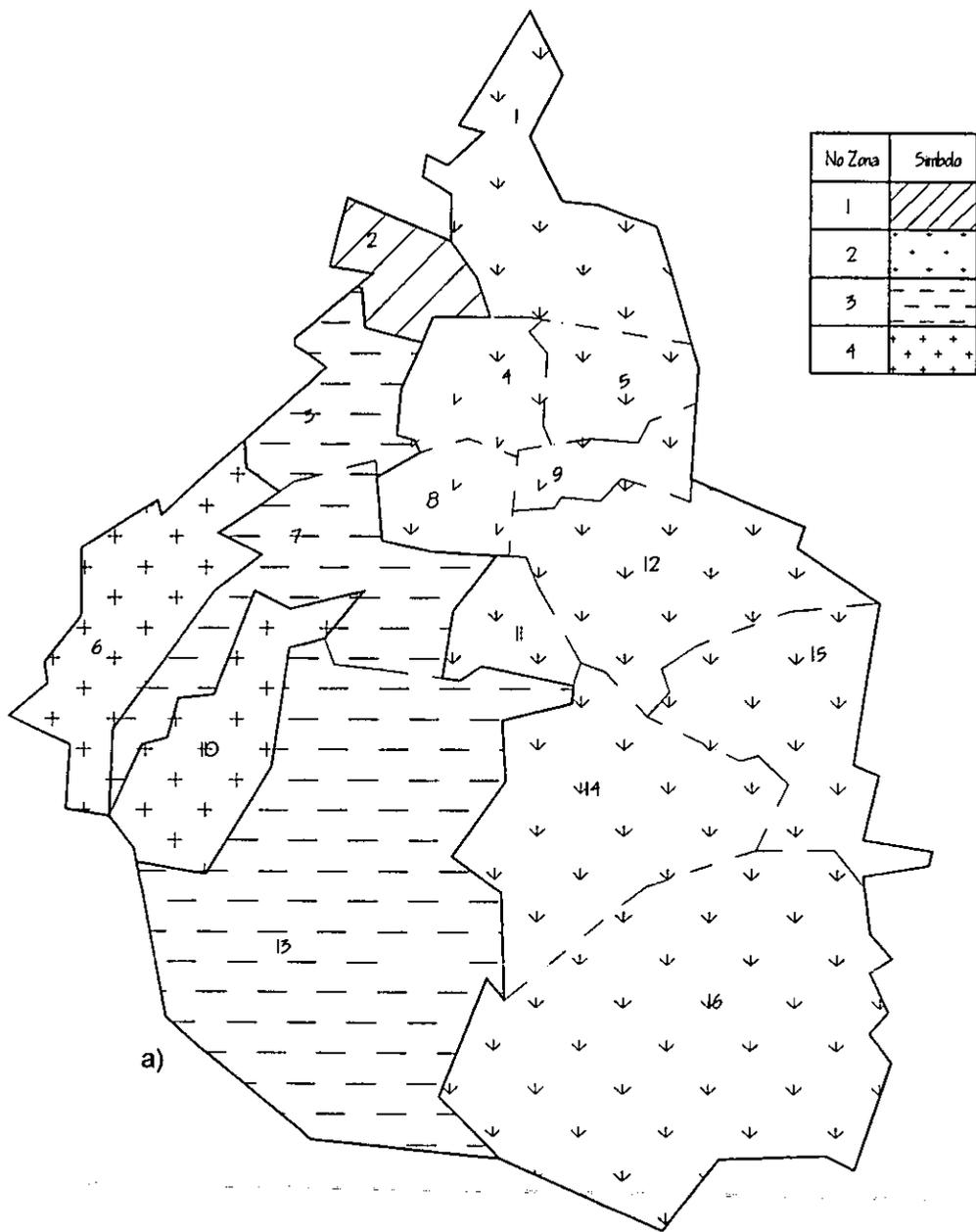


Fig. 5.41 a) Zonación en 2D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1 y 4, considerando 16 entidades



No. Zona	$C_{1k}$	$W_{1k}/C_A$	$C_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.0792	16 525 800	0.0000	
2	0.0891	198 282 000	0.1178	10 729 700
3	0.0646	78 635 100	0.1074	1 993 510
4	0.0507	15 279 800	0.0000	
		$W_{TOTAL} =$		321 445 910

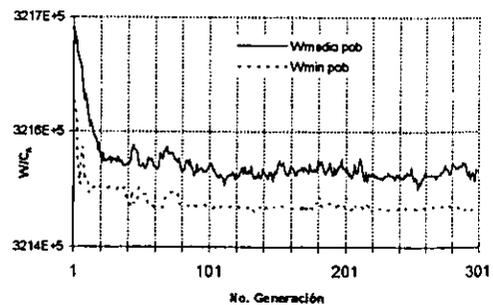
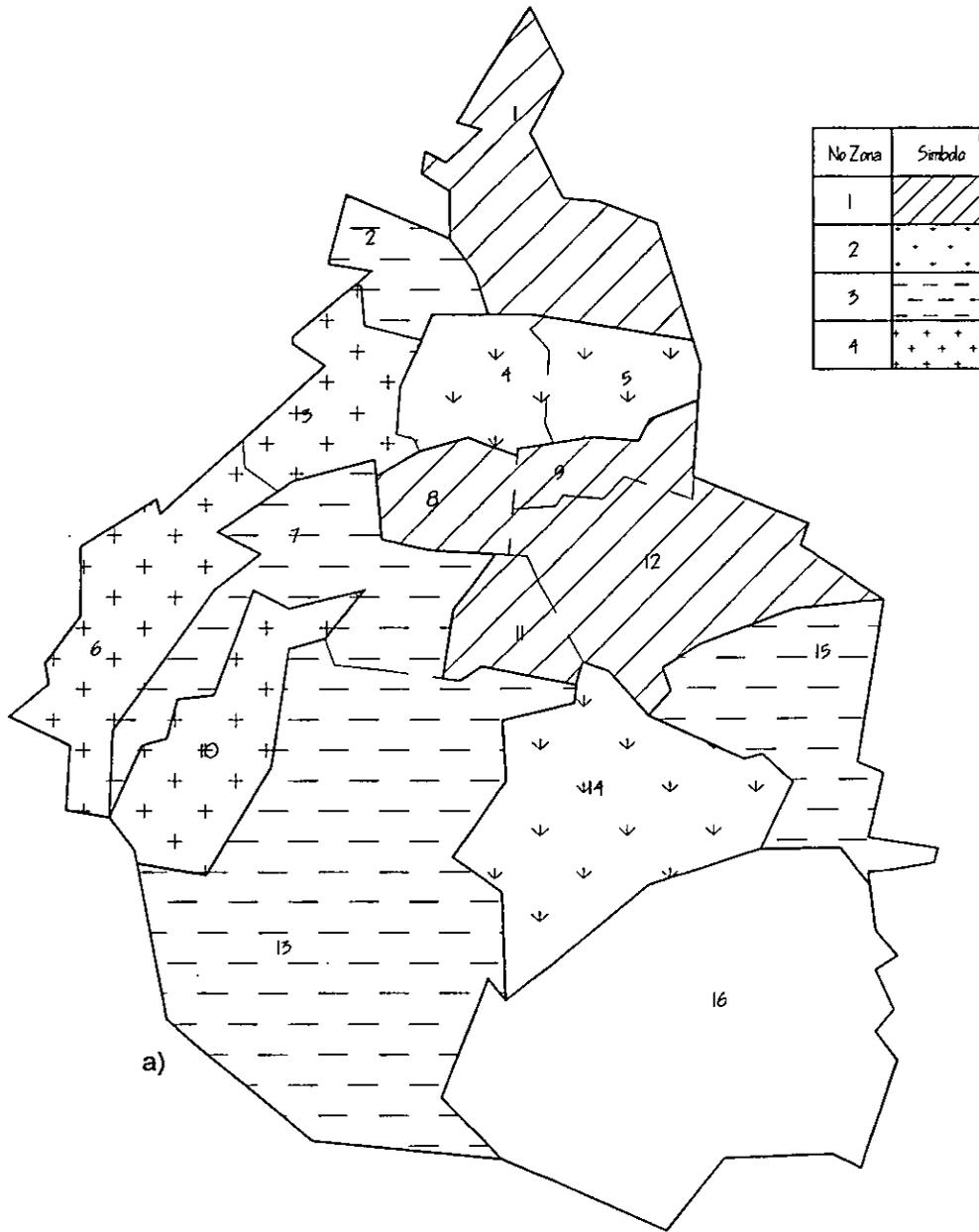


Fig. 5.42 a) Zonación en 2D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1 y 7, considerando 16 entidades



a)

b)

c)

No. Zona	$C_{2k}$	$W_{2k}/C_A$	$C_{4k}$	$W_{4k}/C_A$
1	0.0902	42 553 800	0.1090	17 182 900
2	0.0967	20 767 800	0.1199	16 342 300
3	0.0783	24 409 300	0.0975	9 855 530
4	0.0682	13 715 300	0.0896	8 255 970
		$W_{TOTAL} =$	153 082 900	

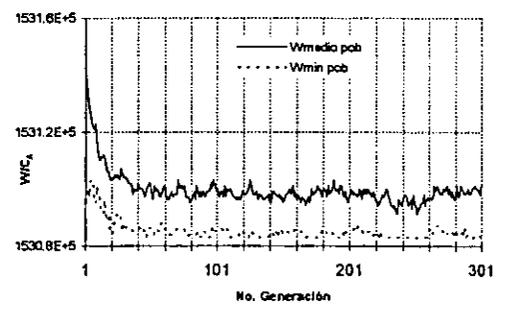
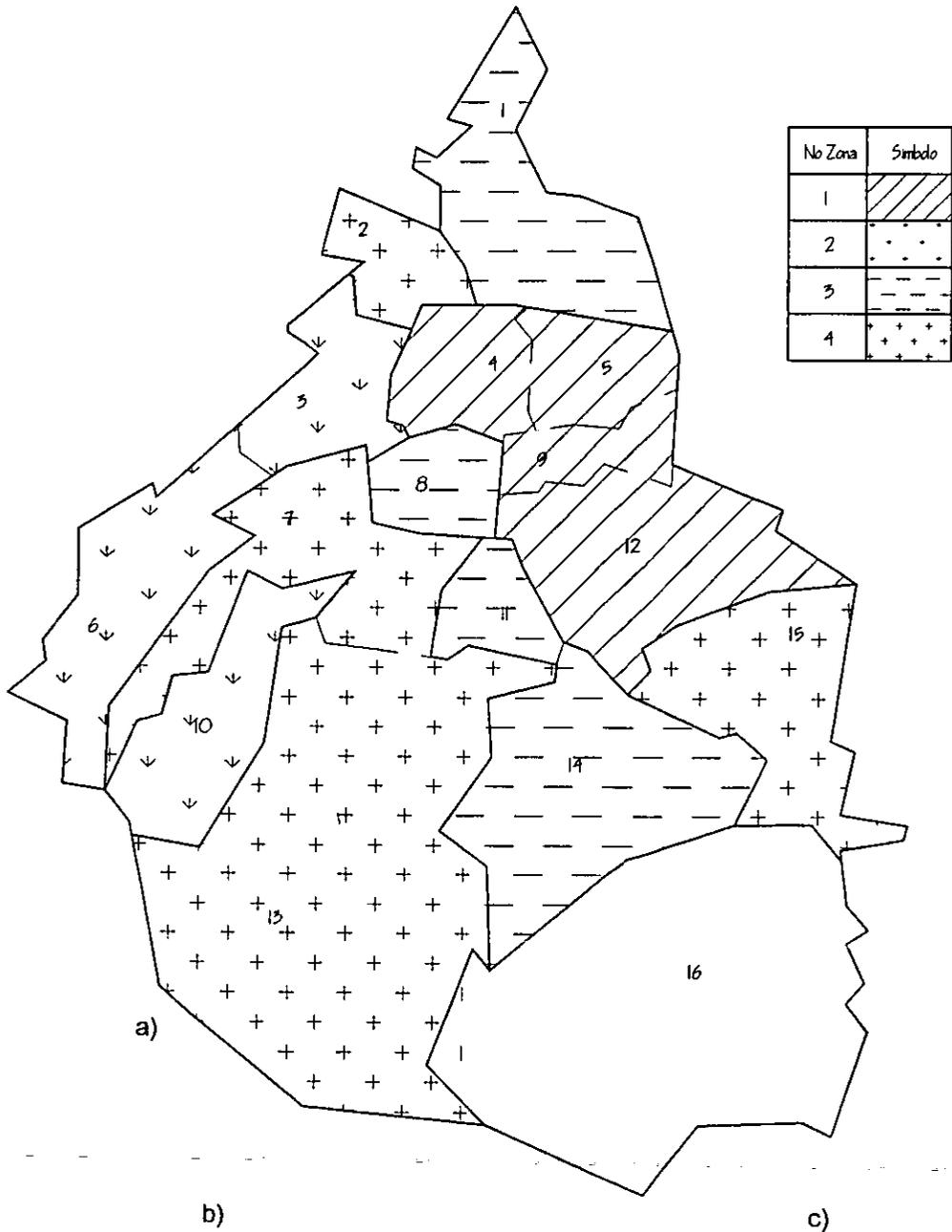


Fig. 5.43 a) Zonación en 2D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 2 y 4, considerando 16 entidades



No. Zona	$C_{2k}$	$W_{2k}/C_A$	$C_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.0959	26 363 300	0.1090	2 748 090
2	0.0682	13 715 300	0.1037	41 838
3	0.0898	36 958 400	0.1208	7 783 790
4	0.0783	24 409 300	0.1074	2 148 160
$W_{TOTAL} = 114\ 168\ 178$				

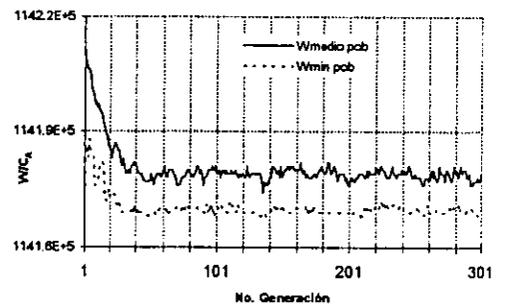
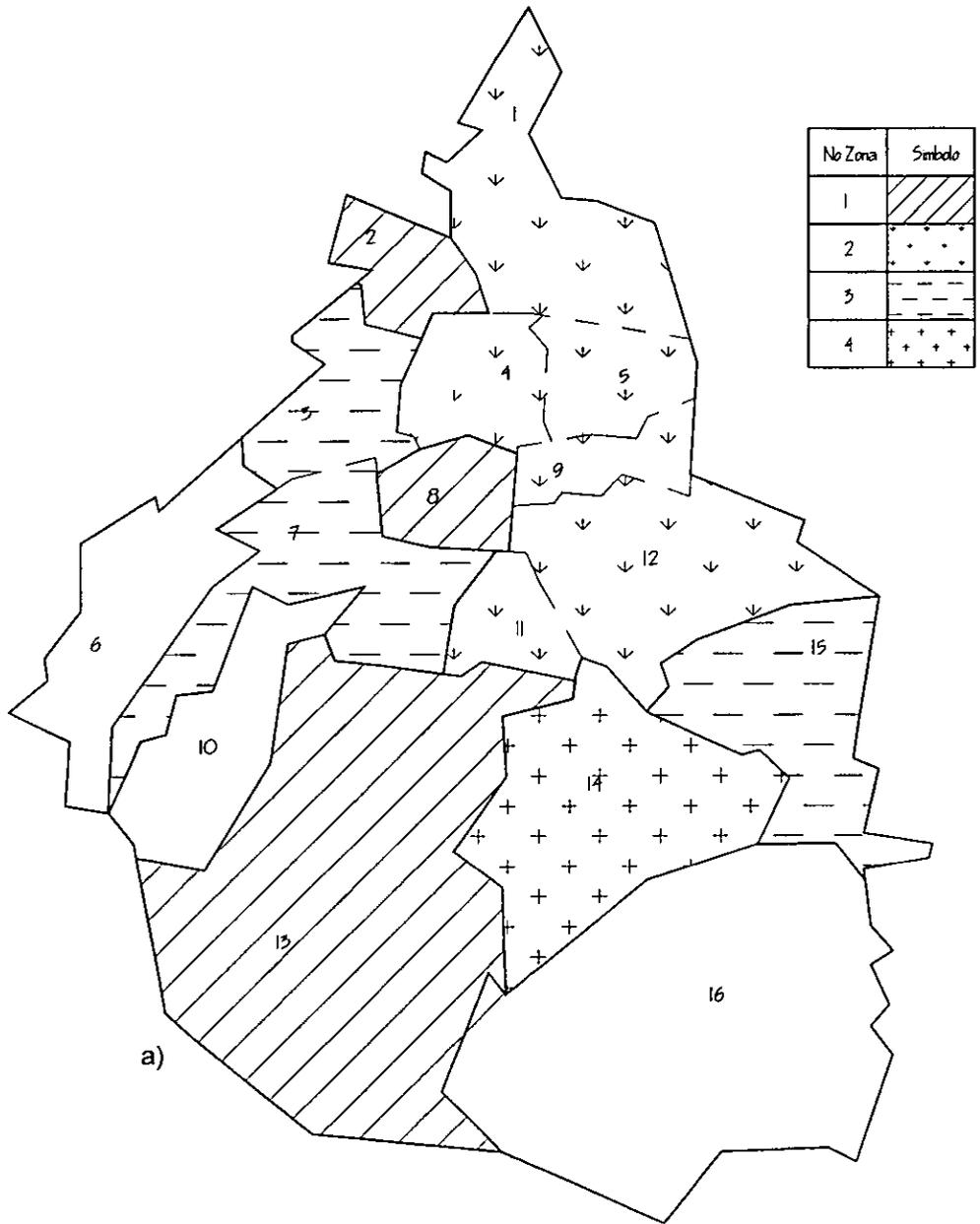


Fig. 5.44 a) Zonación en 2D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 2 y 7, considerando 16 entidades



No. Zona	$C_{4k}$	$W_{4k}/C_A$	$C_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.1011	13 724 500	0.1088	1 979 400
2	0.1146	23 672 400	0.1105	3 481 060
3	0.0890	10 258 100	0.0990	403 227
4	0.1286	3 976 930	0.1216	6 857 870
$W_{TOTAL} =$			<b>64 353 487</b>	

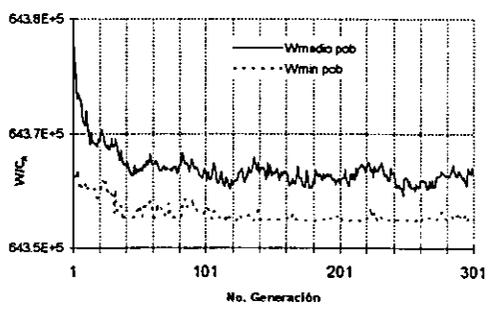
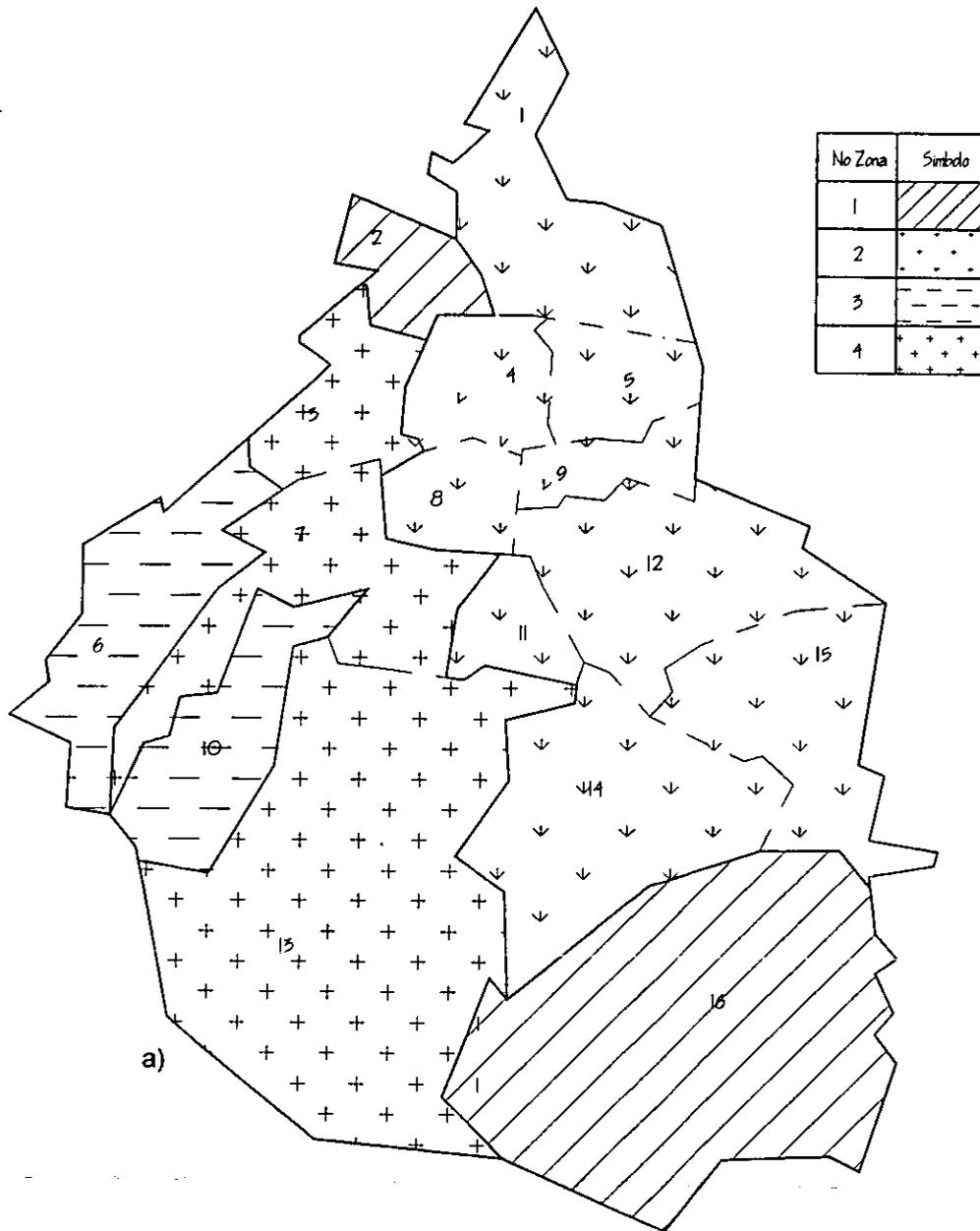


Fig. 5.45 a) Zonación en 2D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 4 y 7, considerando 16 entidades



a)

b)

No. Zona	$c_{1k}$	$W_{1k}/C_A$	$c_{2k}$	$W_{2k}/C_A$	$c_{4k}$	$W_{4k}/C_A$
1	0.0795	17 038 200	0.0799	11 031 900	0.0959	957 824
2	0.0890	197 770 000	0.0924	63 719 600	0.1142	34 304 800
3	0.0507	15 279 800	0.0550	2 329 440	0.0000	
4	0.0646	78 635 100	0.0738	24 367 400	0.0944	16 382 300
$W_{TOTAL} = 461\ 816\ 364$						

c)

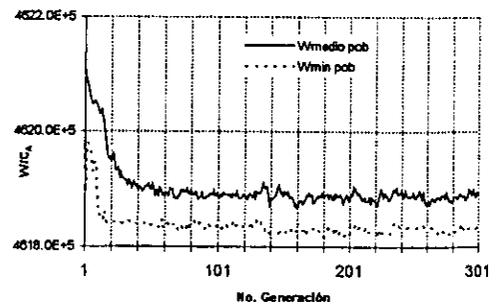
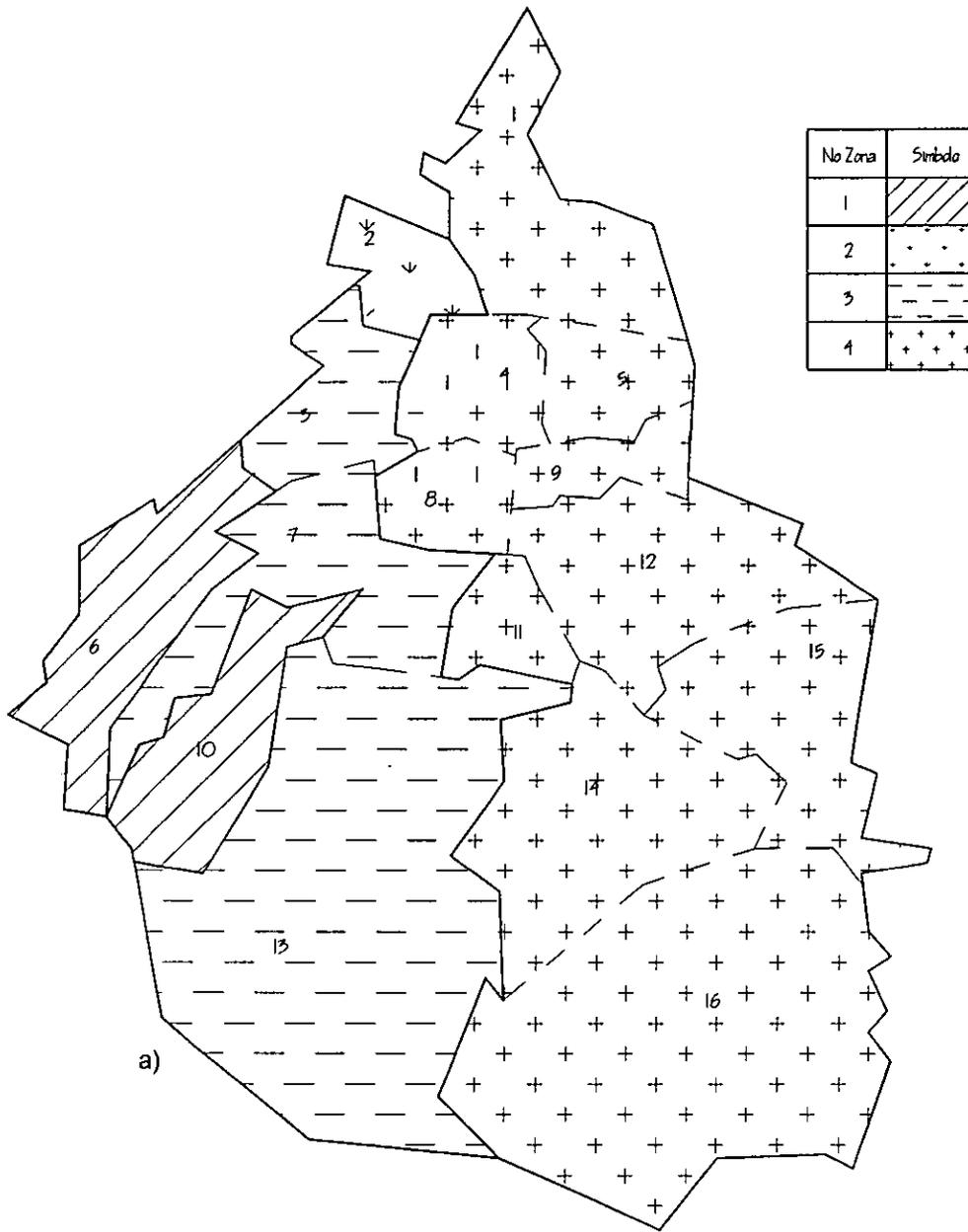


Fig. 5.46 a) Zonación en 3D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1, 2 y 4, considerando 16 entidades



a)

b)

c)

No. Zona	$c_{1k}$	$W_{1k}/C_A$	$c_{2k}$	$W_{2k}/C_A$	$c_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.0507	15 279 800	0.0550	2 329 440	0.0000	
2	0.0792	16 525 800	0.0799	11 031 900	0.0000	
3	0.0646	78 635 100	0.0738	24 367 400	0.1074	1 993 510
4	0.0891	198 282 000	0.0924	63 719 600	0.1178	10 729 700
$W_{TOTAL} = 422 894 250$						

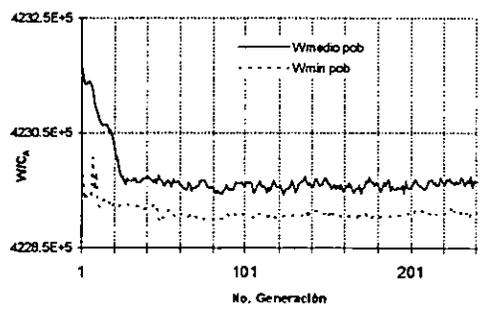
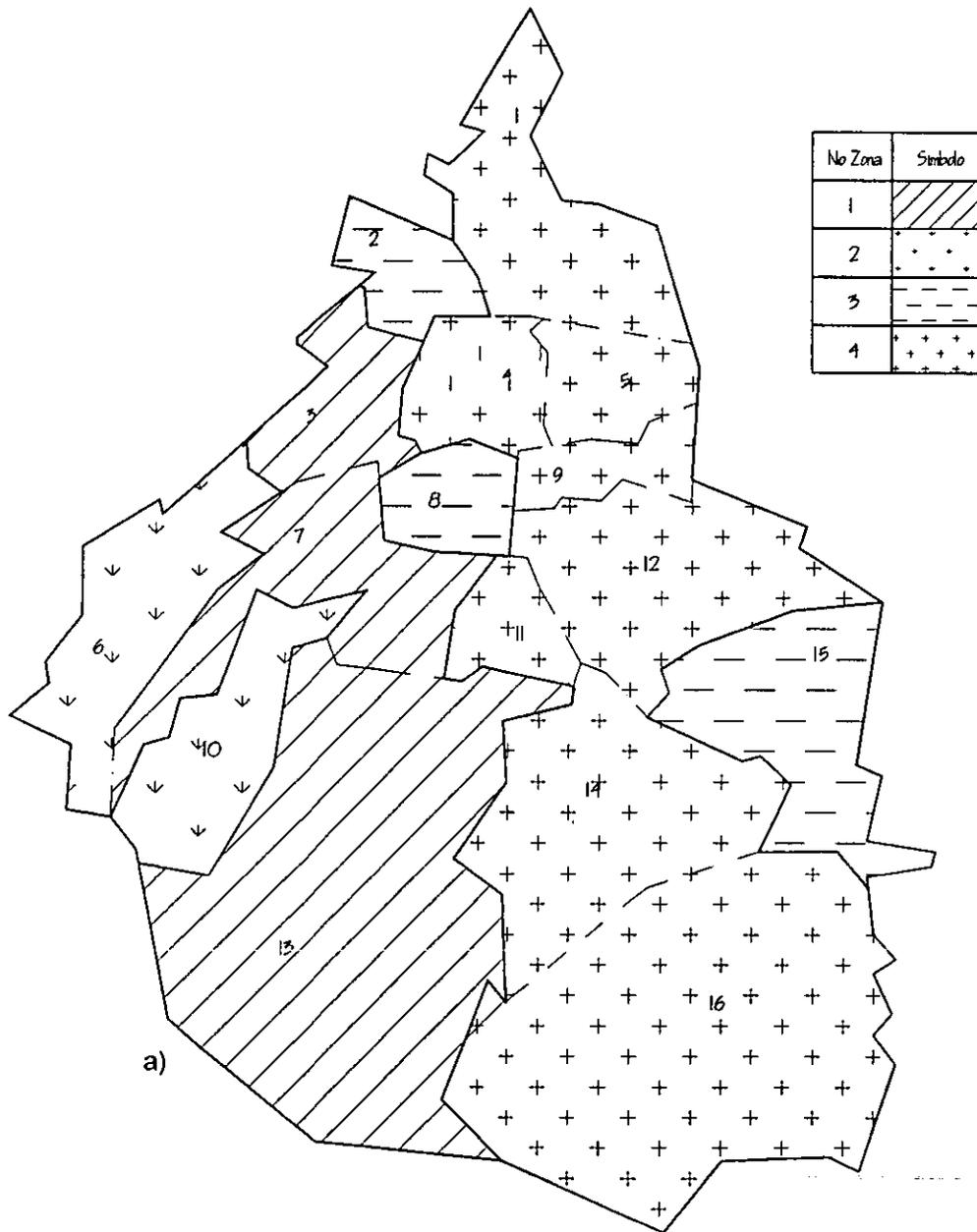


Fig. 5.47 a) Zonación en 3D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1, 2 y 7, considerando 16 entidades



a)

b)

c)

No. Zona	$C_{1k}$	$W_{1k}/C_A$	$C_{4k}$	$W_{4k}/C_A$	$C_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.0646	78 635 100	0.0944	16 382 300	0.1074	1 993 510
2	0.0507	15 279 800	0.0000		0.0000	
3	0.0645	46 149 400	0.1002	7 603 900	0.1062	389 279
4	0.0892	168 664 000	0.1169	27 652 700	0.1182	10 340 200
$W_{TOTAL} = 373\ 090\ 189$						

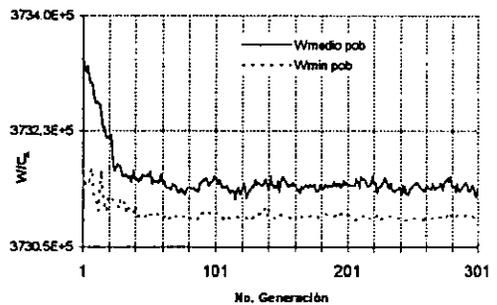
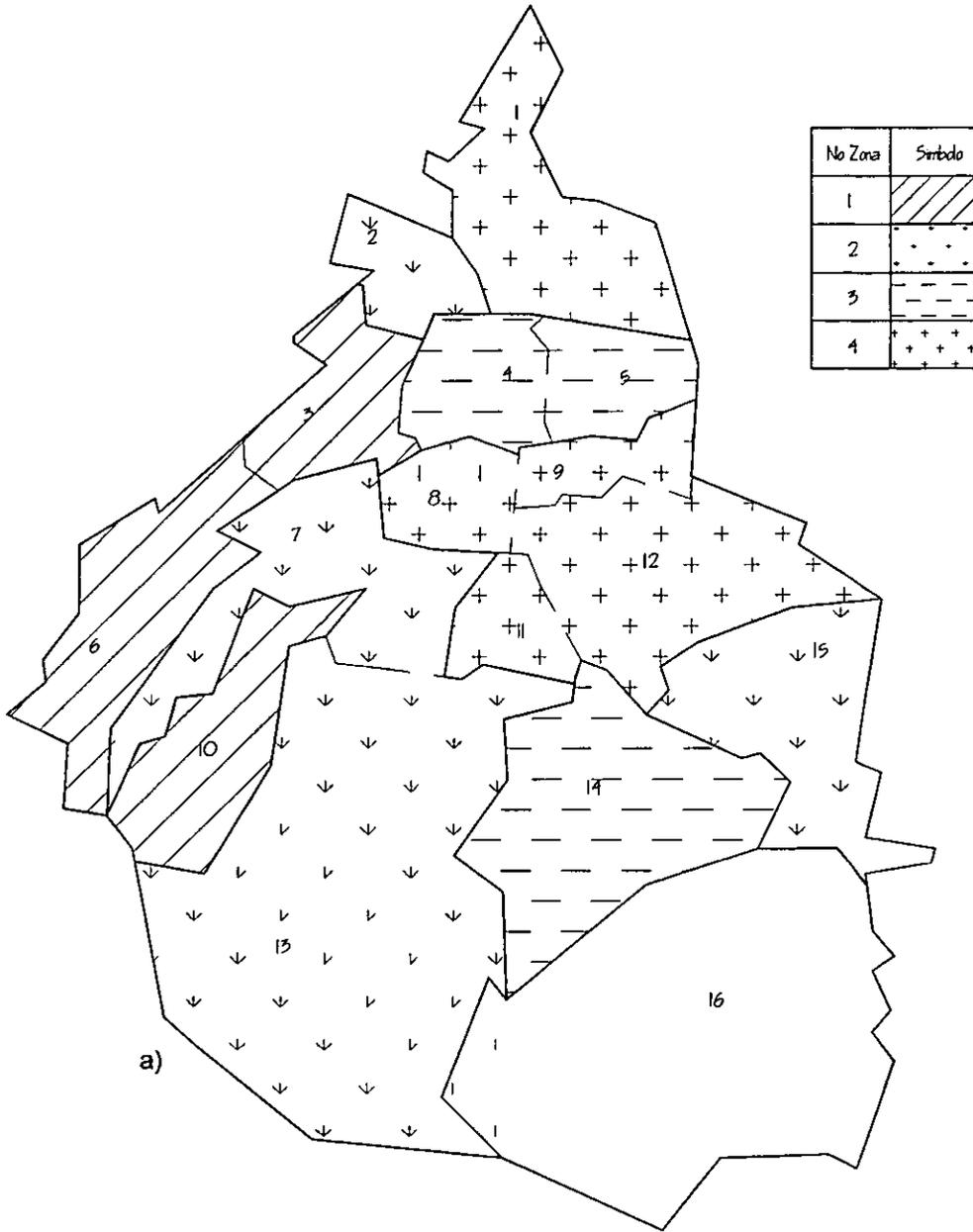


Fig. 5.48 a) Zonación en 3D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1, 4 y 7, considerando 16 entidades



No Zona	Smbdo
1	
2	
3	
4	

a)

b)

c)

No. Zona	$C_{2k}$	$W_{2k}/C_A$	$C_{4k}$	$W_{4k}/C_A$	$C_{7k}$	$W_{7k}/C_A$
1	0.0682	13 715 300	0.0896	8 255 970	0.1037	41 838
2	0.0783	24 409 300	0.0975	9 855 530	0.1074	2 148 160
3	0.0967	20 767 800	0.1199	16 342 300	0.1195	8 905 770
4	0.0902	42 553 800	0.1090	17 182 900	0.1085	1 626 630
$W_{TOTAL} = 165 805 298$						

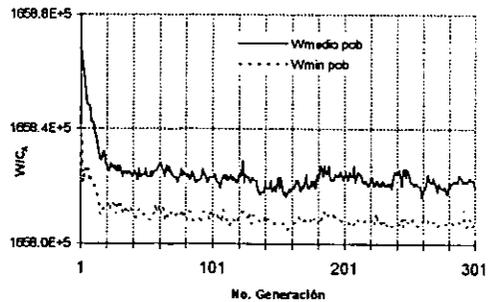
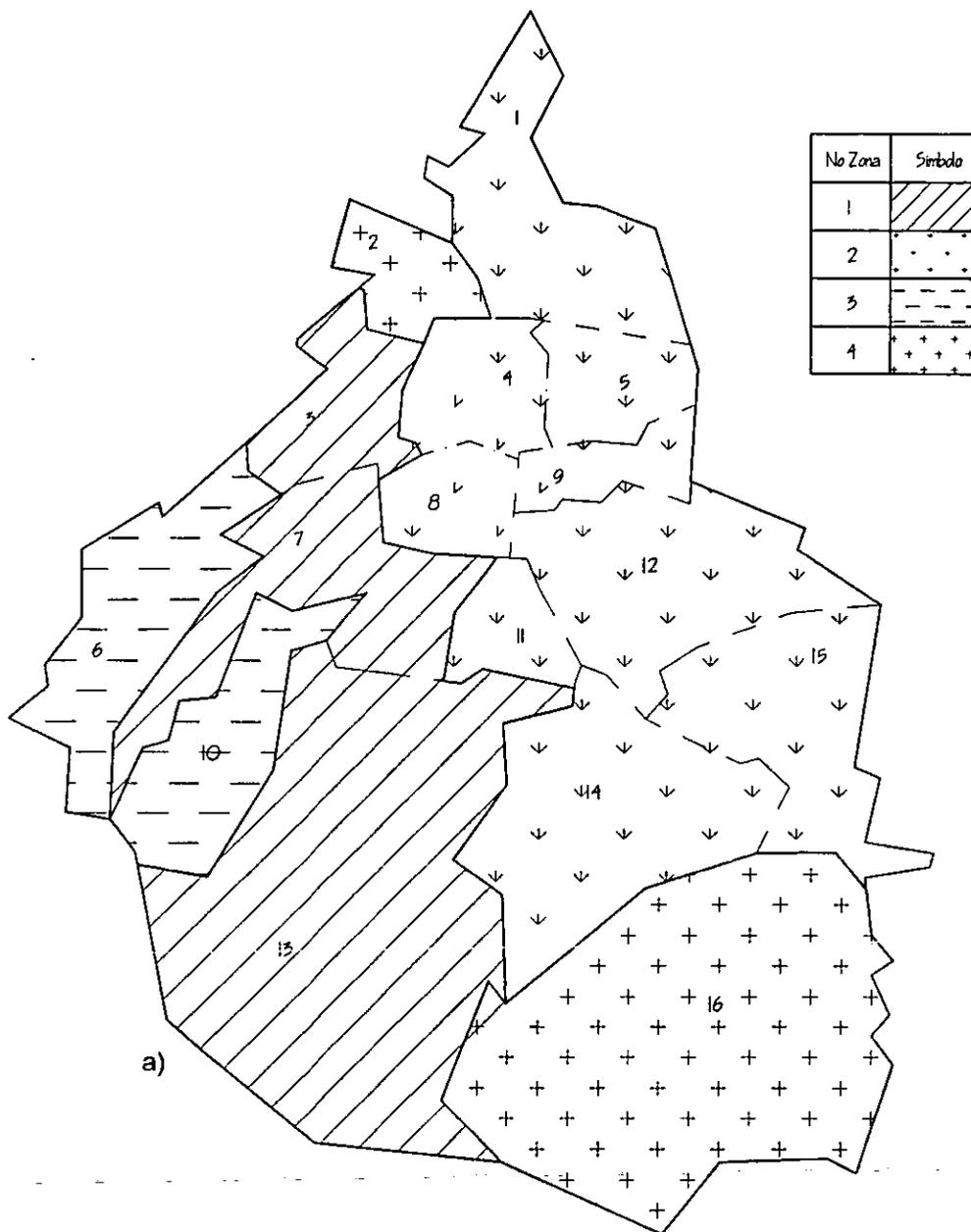


Fig. 5.49 a) Zonación en 3D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 2, 4 y 7, considerando 16 entidades



a)

b)

c)

No Zona	1	2	3	4
$C_{1k}$	0.0646	0.0890	0.0507	0.0785
$W_{1k}/C_A$	78 635 100	197 770 000	15 279 800	17 038 200
$C_{2k}$	0.0738	0.0924	0.0550	0.0799
$W_{2k}/C_A$	24 367 400	63 719 600	2 329 440	11 031 900
$C_{4k}$	0.0944	0.1142	0.0000	0.0959
$W_{4k}/C_A$	16 382 300	34 304 800		957 824
$C_{7k}$	0.1074	0.1178	0.0000	0.0000
$W_{7k}/C_A$	1 993 510	10 729 700		
	$W_{TOTAL} = 474 539 574$			

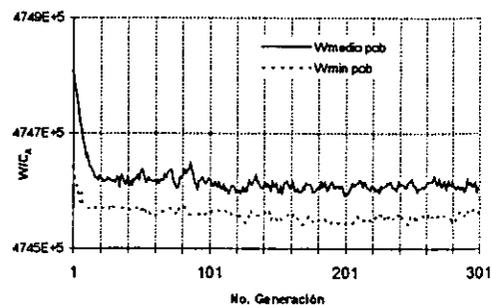


Fig. 5.50 a) Zonación en 4D, b) Coeficientes y costos óptimos y c) Convergencia de los costos para los tipos de estructuras 1, 2, 4 y 7, considerando 16 entidades.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En el presente trabajo se ha mostrado el planteamiento mediante el cual se define la esperanza del valor presente del costo total de una estructura que se emplea en la zonación sísmica. La esperanza de dicho costo toma en cuenta la incertidumbre en la ley de atenuación utilizada. Así mismo se desarrollaron dos métodos mediante los cuáles se puede obtener la zonación sísmica óptima. El primero de ellos, denominado método de combinaciones, realiza una búsqueda ordenada en todas las zonaciones posibles en la región en estudio. El segundo es el del algoritmo genético que calcula la zonación sísmica óptima a través de someter un conjunto inicial de zonaciones a procesos análogos a los desarrollados por la naturaleza en la selección natural. Se presentan ejemplos resueltos mediante estos métodos utilizando la expresión obtenida del costo total. En dichos ejemplos se muestra la eficiencia de cada uno de los métodos al obtener la zonación sísmica óptima, así como su versatilidad al calcular zonaciones considerando varios tipos de estructura.

El planteamiento presentado para determinar la expresión que define la esperanza del valor presente del costo total de las estructuras, es resultado de incluir la incertidumbre en la ley de atenuación al planteamiento desarrollado en un trabajo anterior (García-Pérez, 1994). En el cálculo del costo total, existen incertidumbres las cuales están relacionadas con las estructuras (propiedades mecánicas, daños en sus contenidos, impacto de su falla en la sociedad, costos de mantenimiento, respuesta de las estructuras ante eventos sísmicos), con las intensidades (tiempo, lugar y magnitud de ocurrencia de los sismos en la ley de atenuación, en los efectos locales del sitio, en el contenido de frecuencias del movimiento), y con otros factores que influyen en dicho costo. Si se desea una mejor descripción del costo mencionado, es necesario incorporar las incertidumbres que impacten significativamente en su evaluación. Por lo que en futuras investigaciones se recomienda incluir formas que tomen en cuenta un mayor número de incertidumbres, lo que traería una zonación que optimice costos más representativos de la realidad. Por otro lado, la expresión que evalúa la esperanza del valor presente del costo total está en función del coeficiente de diseño sísmico y la tasa de excedencia de la intensidad empleada. Sin embargo existen casos en los cuales los costos dependen de otros factores (tipo de suelo que requiere una cimentación especial; incremento en los costos de transporte, mano de obra y/o materiales en la región). Esta variación de los costos puede incorporarse al modificar en una proporción adecuada el número de estructuras del tipo afectado dentro del área de influencia. Así mismo, una mejor estimación de los daños sufridos por una estructura requiere el uso del contenido de frecuencias y la duración del movimiento, y no solamente el valor del espectro de aceleraciones asociado al periodo fundamental de vibración de la estructura considerada. Por lo que se recomienda el desarrollo de expresiones que evalúen el daño en función del contenido de

frecuencias del movimiento del terreno, en lugar de aquéllas que toman en cuenta las aceleraciones correspondientes a un espectro como las empleadas en este trabajo.

El método de combinaciones encuentra la zonación óptima a través de una búsqueda exhaustiva y ordenada en todas las zonaciones posibles de la región en estudio. Esto implica un elevado número de evaluaciones del costo de las zonaciones obtenidas, lo cual limita el método a la solución de regiones compuestas por un número reducido de celdas. Para aplicar el método a regiones de tamaño moderado se definen dos criterios discriminatorios que disminuyen el número de zonaciones posibles de la región en estudio. A pesar de las limitaciones que presenta este método, es aplicable a regiones de tamaño pequeño a moderado (regiones constituidas hasta por 20 celdas) y sus criterios discriminatorios pueden ser incluidos en otros métodos más sofisticados (como el algoritmo genético) para aumentar la eficiencia en la búsqueda de la zonación óptima.

Por otra parte, el algoritmo genético es un procedimiento de optimación que resulta muy flexible, eficiente y general. Se obtienen mejores resultados que simplemente realizar búsquedas ordenadas en todas las zonaciones posibles, siempre que se mantengan valores mínimos de la relación entre el número de evoluciones y el número de zonaciones posibles. El valor mínimo en esta relación puede variar según la función utilizada para evaluar la esperanza del valor presente del costo por zonificar. Para disminuir el valor mínimo de dicha relación, se recomienda emplear criterios para "sembrar" zonaciones que resulten próximas a la óptima. Si la función utilizada para evaluar el costo es continua, creciente al aumentar el valor de la intensidad y decreciente al disminuir el valor de los coeficientes (en ambos casos monótonamente), se sugieren los siguientes criterios para definir zonaciones próximas a las óptimas:

- Para el caso de una dimensión, se agruparán las intensidades con valores similares lo cual se puede obtener si se ordenan de manera ascendente (o descendente) y se proponen fronteras que agrupen bloques de elementos contiguos de las intensidades así ordenadas. Estas fronteras se pueden definir de tal manera que asocien zonas cuyos valores de áreas de construcción sean similares y/o se ubiquen donde los valores de las derivadas del vector (definido al ordenar las intensidades) sean mayores.

- Para el caso de más de una dimensión, se realizarán combinaciones de las zonaciones óptimas en una dimensión de los tipos de estructura involucrados. Estas combinaciones se determinarán mediante la asignación de una celda a la zona que le corresponde en la zonación óptima en una dimensión asociado al tipo de estructura cuyo aporte al costo de la celda en cuestión sea el mayor.

El sembrado de zonaciones cuyo costo se encuentre próximo al óptimo asegura la realización de un menor número de evoluciones para calcular la zonación óptima.

De lo anterior se tiene que el algoritmo genético es un método más eficiente que el de combinaciones para calcular la zonación sísmica óptima de una región con sismicidad y distribución del número de estructuras conocidas. Un índice de dicha eficiencia se define como la

relación entre el número de zonaciones realizadas para obtener la zonación sísmica óptima y el número de zonaciones posibles. Así para el ejemplo de una dimensión (figura 5.4, tabla 5.4) resuelto mediante el método de combinaciones, el índice es próximo a 1. Para el caso de una dimensión, tipo de estructura 1, considerando 16 entidades (figura 5.35, tabla 5.17) calculado con el algoritmo genético se tiene que dicho índice es de  $4^{5.3}/(4^{16}/4!)=8.67*10^{-6}$ . Al comparar estos índices ( $1 \gg 8.67*10^{-6}$ ) se demuestra la mayor eficiencia del algoritmo genético. Además, los tiempos de cómputo son mucho menores en el algoritmo genético ( $7.2*10^{-3}$  seg, por valor de intensidad) que en el de combinaciones (7.7 seg, por valor de intensidad; tiempos evaluados en una computadora personal IBM, Pentium II, 330 MHz, 32 MB en RAM), debido a que el primero fue realizado en Visual C++ (1993), lenguaje de programación más eficiente que el MATLAB (1993), utilizado para implementar el método de combinaciones; ya que en este último se utilizaron funciones recursivas de propósito general y que consumen más tiempo que las funciones específicamente diseñadas para el algoritmo genético.

El algoritmo genético adaptado puede ser utilizado para evaluar la esperanza del valor presente del costo total con funciones distintas a la utilizada y que tome en cuenta otros factores e incertidumbres. Así mismo, dicho algoritmo puede considerar diversos tipos de estructura en la zonación, lo cuál nos permite la construcción de espectros de diseño sísmico cuyos coeficientes minimicen la esperanza del valor presente del costo total ocasionado por zonificar.

El algoritmo genético, utilizado en este trabajo, es uno del tipo simple. El uso de otros algoritmos más complejos existentes en la literatura (Goldberg, 1989), en especial aquellos cuyos parámetros asociados al algoritmo se modifican en función de la convergencia alcanzada, permitirían obtener con un menor número de evoluciones la zonación óptima. En futuros estudios, se recomienda la investigación de dichos algoritmos que presentan ventajas sobre el utilizado en el presente trabajo.

## **7. AGRADECIMIENTOS**

Mi más sincero agradecimiento por su total apoyo al Dr. Jaime García Pérez, quien dirigió el presente trabajo.

A todos mis profesores y jurados de tesis: Dr. Luis Esteva Maraboto, Dra. Sonia E. Ruiz Gómez, Dr. Orlando Díaz López, y en especial al Dr. Mario Ordaz Schroeder, quienes revisaron y enriquecieron con sus comentarios el contenido de esta tesis.

Agradezco a todos ellos por su generosa disposición de compartir sus conocimientos y su valioso tiempo.

## 8. REFERENCIAS.

Abdullah I, Malkawi H, M. EERI, Al-Homoud A S, Batayneh J S (1995) "Probabilistic seismic hazard zonation and dynamic site periods mapping for major cities in Jordan", *Earthquake Spectra* Vol. 11 No. 4, pp 637-658.

Avilés J y Pérez-Rocha L E (1998) "Site effects and soil-structure interaction in the Valley of Mexico", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 17 No 1, pp 29-39.

Cardona O D y Yamin L E (1997) "Seismic microzonation and estimation of earthquake loss scenarios: Integrated risk mitigation project of Bogota, Colombia", *Earthquake Spectra* Vol. 13 No 4, pp 795-814.

Chávez M (2000) "Impact of local geology on the seismic vulnerability of the metropolitan zone of Guadalajara, Mexico", Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand Society of Earthquake Engineering, New Zealand 2000, Paper No. 1600.

Chávez M y Castro R (1988) "Attenuation of modified Mercalli intensity with distance in Mexico", *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol 78 No 6, pp 1857-1884.

Chávez M y García-Rubio I (1995) "Seismic vulnerability of the metropolitan zone of Guadalajara, Mexico", Proceedings of the Fifth International Conference on Seismic Zonation, France, Vol 1, pp 33 - 40.

Chávez M y Ramírez R (1998) "Earthquake observed site effects in the metropolitan zone of Guadalajara, Mexico", The effects on surface geology on seismic motion: Recent progress and new horizon on ESG study, Proceedings of the Second International Symposium, A. A. Balkema, Rotterdam, Vol 2, pp 189 - 496.

Chávez-García F J y Bard P Y (1993a) "Gravity waves in Mexico City?—I. Gravity perturbed waves in an elastic solid", *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol 83 No 6, pp 1637-1655.

Chávez-García F J y Bard P Y (1993b) "Gravity waves in Mexico City?—II. Coupling between an inelastic solid and a fluid layer", *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol 83 No 6, pp 1656-1675.

Chávez-García F J y Bard P Y (1994) "Site effects in Mexico City eight years after the September 1985 Michoacan earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 13 No 4, pp 229 - 247.

Chávez-García F J, Cuenca J y Lermo J (1995) "Seismic microzonation in Mexico: the examples of Mexico City, Oaxaca and Puebla", *Proceedings of the Fifth International Conference on Seismic Zonation*, France, Vol 1, pp 699 - 706.

Chavez-García F J y Cuenca J (1998) "Site effects and microzonation in Acapulco", *Earthquake Spectra* Vol 14 No 1, pp 75-93.

Comisión Federal de Electricidad (CFE) (1976), *Manual de diseño de obras civiles*.

Comisión Federal de Electricidad (CFE) (1993), *Manual de diseño de obras civiles*.

Cornell C A y Vanmarcke E (1969) "The major influences on seismic risk", *Memorias IV Congreso mundial de Ingeniería Sísmica*, Santiago de Chile, Chile, pp A169-83.

Cruz R, Ramírez, Rodríguez J, Albores A, Najera F, García J y Rivero F (1997) "Zonificación sísmica de la Ciudad de Tapachula, Chiapas", *Memoria del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Veracruz, México.

Esteva L y Trigos J (1976) "Recomendaciones para la formulación de reglamentos de diseño sísmico en el país", *Secretaría de Obras Públicas*, México.

García-Pérez J (1994) "Zonación y microzonación óptimas", *Tesis doctoral, DEPI, UNAM*.

García-Pérez J (2000) "Seismic zoning for initial- and total-cost minimization", *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol. 29 No. 6, pp 847-866.

García-Pérez J y Rosenblueth E (1994a) "Zonación sísmica para minimización del costo inicial en problemas reducibles a una dimensión", *Ingeniería Sísmica* No. 47, pp 1-19.

García-Pérez J y Rosenblueth E (1994b) "Zonación sísmica para minimización del costo total en problemas reducibles a una dimensión", *Ingeniería Sísmica* No. 48, pp 1-10.

García-Pérez J y Rosenblueth E (1995) "Zonación sísmica en problemas no reducibles a una dimensión", *Ingeniería Sísmica* No. 49, pp 1-19.

García-Pérez J, Castellanos F y Díaz O (1999) "Zonación sísmica para diseño de minimización del costo total", Memoria del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Morelia, México, pp 947-955.

Gaull B A, Kagami H y Tamiguchi H (1995) "The microzonation of Perth, Western Australia, using microtremors spectral ratios", *Earthquake Spectra* Vol. 11 No 2, pp 173-192.

Goldberg D E (1989) "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning", Addison-Wesley.

Grandori G (1977) "Seismic zoning as a problem of optimization", Proc. Second International Conference on Structural Safety and Reliability, Munich, pp 613-624.

Iglesias J (1989) "The Mexico Earthquake of September 19, 1985 - Seismic zoning of Mexico City after the 1985 Earthquake", *Earthquake Spectra* Vol. 5 No. 1, pp 257-271.

Lermo J, Rodríguez M y Singh S K (1988) "The Mexico earthquake of September 19, 1985—natural period of sites in the Valley of Mexico from microtremor measurements and strong motion data", *Earthquake Spectra* Vol 4 No. 4, pp 805-814.

Lermo J y Chávez-García F J (1994) "Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 13 No 6, pp 413-423.

Marsal R, Mazari M e Hiriart H (1953) "Cimentaciones en la Ciudad de México", Ediciones ICA, B16.

MATLAB for Windows (1993) Version 4.0. The MathWorks, Inc.

Montoya-Dulché C E y Vitiello F (1996) "Aplicación de los algoritmos genéticos al problema de la microzonación sísmica óptima", *Ingeniería Civil* No. 326.

Normas técnicas complementarias para diseño por sismo (1987), Gaceta oficial del Departamento del Distrito Federal, oct

Normas técnicas complementarias para diseño por sismo (1993), Gaceta oficial del Departamento del Distrito Federal.

Noguez R, Ramírez M, Ramírez H, Syoval M R, Mendoza E, García J, Rivero F e Iglesias J (1997) "Propuesta de zonificación sísmica de los municipios de Toluca, Lerma y Metepec, Estado de México", Memoria del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz, México.

Ordaz M y col (1988) "The Mexico earthquake of September 19, 1985— estimation of response spectra in the lake bed zone of the Valley of Mexico", *Earthquake Spectra* Vol 4 No. 4, pp 815-834.

Ordaz M, Jara J M y Singh S K (1989) "Riesgo sísmico y espectro de diseño en el Estado de Guerrero", Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Ordaz M y Singh S K (1992) "Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City", *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol 82 No 1, pp 24-43.

Ordaz M, Rosenblueth E y Reinoso E (1993) "Future ground motions in Mexico", *Tectonophysics*, 218, 1-3, Feb 15, pp 141-155.

Ordaz M y Faccioli E (1994) "Site response analysis in the Valley of Mexico: selection of input motion and extent of non-linear soil behaviour", *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol. 23 No. 8, pp 895-908.

Ordaz M, Meli R, Montoya-Dulché C, Sánchez L, Pérez Rocha L (1994) "Bases de datos para la estimación del riesgo sísmico en la Ciudad de México", Cuaderno de Investigación No. 1, CENAPRED.

Ordaz M, Reinoso E, Pérez Rocha L, Montoya C (1995) "Z Programa para la determinación de espectros de sitio en el DF", Desarrollado bajo contrato (DDF) México, jun.

Ordaz M, Miranda E, Reinoso E y Pérez-Rocha L E (2000) "Seismic loss estimation model for Mexico City", Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand Society of Earthquake Engineering, New Zealand 2000, Paper No. 1902.

Osorio-Carrera E, Garía-Isidor S, Ramírez-Centeno M, López Areiga G y Ruiz-Acevedo C (1997) "Propuesta de zonificación sísmica para la ciudad de Tehuacán, Puebla", Memoria del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz, México.

Panza G F, Vaccari F, Costa G, Suhadolc P, y Fäh D (1996) "Seismic Input Modeling for zoning and microzoning", *Earthquake Spectra* Vol. 12 No 3, pp 529-566.

Pérez-Rocha L E, Sánchez-Sesma F J y Reinoso E (1991) "Three-dimensional site effects in Mexico City: evidences from accelerometric network and theoretical results", Proceedings of the 4th Conference on Seismic Zonation, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland California, Vol 3, pp 327-334.

Pérez-Rocha L E, Sánchez-Sesma F J, Ordaz M, Singh S K y Reinoso E (2000) "Strong ground motion prediction at Mexico City", Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand Society of Earthquake Engineering, New Zealand 2000, Paper No. 2693.

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (1987), Diario Oficial de la Federación, julio.

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (1993), Diario Oficial de la Federación.

Reinoso E y Ordaz M (1999) "Spectral ratios for Mexico City from free-field recordings", *Earthquake Spectra* Vol 15 No. 2, pp 273-295.

Rosenblueth E (1977) "Optimum regionalization", Proc. Second International Conference on Structural Safety and Reliability, Munich, pp 575-592.

Rosenblueth E y García-Pérez J (1994) "Optimal zoning", *Engineering structures* Vol. 16 No. 7, pp 460-469.

Sánchez-Sesma F J, Pérez-Rocha L E y Reinoso E (1993) "Ground motion in Mexico City during the April 25, 1989, Guerrero earthquake", *Tectonophysics*, 218, 1-3, Feb 15, pp 127-140.

Singh S K, Ordaz M y Pérez-Rocha L E (1996) "The great Mexican earthquake of 19 June 1858: expected ground motions and damage in Mexico City from a similar future event", *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol 86 No 6, pp 1655-1666.

## APÉNDICE 1.

### DEFINICIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO EN UN PROGRAMA DE COMPUTADORA. "ALGENETIC"

El algoritmo genético, descrito en el capítulo 4, se codificó en un programa de computadora en Visual C++ (1993), mediante el cual se realiza la búsqueda de la zonación óptima en función de la expresión considerada para evaluar la esperanza del valor presente del costo por zonificar. A continuación se describirá de manera general el programa realizado siguiendo el diagrama de flujo que se muestra en la fig. A1.1.

La información inicial que requiere el programa son pares de vectores que contengan el área de construcción y las intensidades en las estructuras tipo  $i$ , caracterizadas mediante su periodo fundamental de vibración  $T_i$ , construidas en cada celda  $j$  constituyentes de la región a zonificar. Habrá tantos pares de vectores como tipos de estructuras considerados. Dichos vectores se guardan en archivos tipo ASCII, de los cuales el programa obtiene la información mediante su lectura que se efectúa en la *DEFINICIÓN DE LA VARIABLE MATRIZZPA* (Ver A.8 FUNCIÓN MOD1DCOW).

#### A.1 FUNCIÓN DONDE SE GENERA LA POBLACIÓN.

La creación de la población se realiza en la *DEFINICIÓN DE LA VARIABLE GA*. Si al definir la variable no se ocupan parámetros, la creación es aleatoria, es decir, las celdas (genes) que componen a la región en estudio son asignadas a una de las  $K$  zonas aleatoriamente con una distribución de probabilidad uniforme. En caso de definir un número como parámetro, se "sembrarán" dicho número de regiones, es decir, el usuario podrá proponerlas. El resto se crearán aleatoriamente. El sembrado tiene por objeto buscar en zonas de la función donde se sospecha la existencia de algún óptimo.

Cada región está formada por celdas y los valores que pueden tomar éstas, se les conoce como alelos (número de zona a la cual se asigna la celda). Los alelos se representan mediante el sistema binario para mejorar la eficiencia del algoritmo. El uso de este sistema implica que cada celda está asociada a un número de elementos mediante los cuales sea posible representar el rango de valores que puede tomar dicho alelo; por ejemplo, si se va a zonificar una región en dos zonas, cada celda tendrá un elemento asociado que puede tomar los valores 0 ó 1. Para el caso en que se quiera zonificar una región en tres zonas, se tiene que las celdas estarán compuestas de por lo menos dos elementos; sin embargo, 4 números se pueden representar mediante el sistema binario al considerar dos elementos. Los tres valores deseados (tres zonas) se obtienen a partir de la parte entera del producto de una constante de proporcionalidad y los 4 números

mencionados. Al aplicar la solución anterior, un alelo tendrá el doble de probabilidad de existir que el resto. Para evitar esto se aumenta el número de elementos asociados a cada celda, de manera que las diferencias entre las probabilidades de existencia de los alelos sean aceptables. Para el caso de 3 zonas se utilizaron 8 elementos, lo cual implica que un alelo tiene 1.2% mayor probabilidad de existencia que el resto. Por ejemplo, si se tiene una región compuesta de cuatro celdas y que se desea dividir en 3 zonas, una posible región zonificada sería {0,1,1,2}. Si la constante de proporcionalidad es igual a 0.0117 y se asocian 8 elementos a cada celda, la región zonificada anterior se puede representar en sistema binario como {0 0 0 0 0 0 0 0, 1 0 0 0 0 0 0 0, 1 0 0 0 0 0 0 0, 1 1 1 1 1 1 1 1}. Esta representación se guarda como cadenas de caracteres en vez de números (enteros o algún otro tipo de número) ya que así se ahorra por lo menos un 75% de la cantidad de memoria utilizada al ejecutar el programa.

## **A.2 FUNCIÓN FNADAPTAB.**

Para evaluar el costo (adaptación) de cada región zonificada se requiere:

- a) Convertir las regiones de caracteres a números enteros (*DECODCROMO*).
- b) Convertir los alelos (zonas asignadas) del sistema binario a sistema decimal (*DECODBIN*). Para este fin se definen la constante de proporcionalidad y el número de elementos asociados a cada celda, de acuerdo con los criterios descritos en la sección anterior.
- c) A partir de la región obtenida en el inciso b), se calcula el costo asociado a dicha zonación (**A.8 FUNCIÓN MOD1DCOW**).

El cálculo del costo debido a una zonación dada (**A.8 FUNCIÓN MOD1DCOW**) se realizó de manera modular, es decir, se calcula dentro de un módulo (parte independiente del resto del programa) que requiere como información de entrada a la región obtenida en sistema decimal y produce como datos de salida el costo correspondiente a la región zonificada dada. Esto tiene el fin de utilizar el mismo algoritmo (excepto por las modificaciones necesarias en este módulo) en caso de utilizar alguna otra función que defina el costo mencionado y se considere otras incertidumbres. Una vez concluida la descripción del algoritmo genético se explicará más adelante el cálculo del costo (sección "A.8 FUNCIÓN MOD1DCOW"). Por el momento se consideran calculados los costos correspondientes a todas las regiones zonificadas que constituyen la población.

## **A.3 FUNCIÓN POSTADAPTACIÓN.**

A los costos obtenidos se les realizan las modificaciones por tipo de optimización (*MAXMIN*) y escalamiento (*JUSTICEFORALL*) mencionadas en el capítulo 4 (Ver 4.2.1.1 *Evaluación de la adaptación*). Los costos medio y óptimo calculados en la presente generación se escriben en un archivo cuyo nombre se define al inicio del programa (*STATISTICS*). Esta información se utiliza al

final de la simulación para observar el comportamiento y el grado de convergencia alcanzado en dicha simulación.

#### **A.4 FUNCIÓN SELECSUST.**

Posteriormente se calculan las probabilidades de supervivencia (*ADAPTABILIDAD*). Estas probabilidades son iguales a los costos modificados y normalizados por la suma de los costos modificados correspondientes a la población.

En función de las probabilidades de supervivencia se seleccionan regiones zonificadas (*SELECCIÓN*). Las regiones elegidas sustituirán a aquellas regiones que no fueron seleccionadas (*SUSTITUCIÓN*). Este proceso formará una nueva población en la cual pueden existir regiones con más de un representante. El proceso de selección consiste en:

- a) Formar un vector el cual se calcula tomando en cuenta los acumulados de las probabilidades de supervivencia. Por ejemplo, si se tienen tres regiones que componen a la población y sus probabilidades son respectivamente 0.3, 0.4 y 0.3, entonces el vector mencionado será {0.7, 0.3, 0.0}.
- b) Generar números aleatorios comprendidos en el rango [0,1] con distribución uniforme.
- c) Buscar el número de la región cuya probabilidad obtenida en el inciso a) sea la más próxima y menor o igual al número aleatorio generado en el inciso b). La región así obtenida es la elegida en esta iteración. Del ejemplo anterior, si el número aleatorio generado es 0.6, la región seleccionada es la número 2.
- d) El proceso descrito en los incisos a), b) y c) se repite un número de veces igual al número de regiones que componen la población.

En el proceso anterior pueden existir regiones que no hayan sido seleccionadas y otras que lo hayan sido más de una vez. Del ejemplo que se ilustra, se supone que las selecciones queden definidas por {0,2,1}, es decir, la región 1 no fue escogida, la 2 lo fue dos veces y la 3 una vez.

La sustitución consiste en reemplazar aquellas regiones que no fueron elegidas por aquellas que fueron seleccionadas más de una vez (*SUSTITUCIÓN*). En el ejemplo tratado, la región 1 desaparece y se sustituye por la región 2, por lo que si se define la población mediante un vector que contenga los número de las regiones definidos con su numeración asignada antes de la selección, dicha población resulta igual a {2,2,3}.

#### **A.5 FUNCIÓN IMPRESIONFOB.**

Se realiza la escritura en un archivo de la información relevante asociada a la zonación óptima de todas las generaciones realizadas hasta ese momento (*IMPRESIONFOB*). Esta información consiste en la descripción de la zonación óptima mediante la región zonificada

(cromosoma) correspondiente, el costo de la región zonificada, así como también los coeficientes de diseño óptimos, y el costo óptimo asociados a cada tipo de estructura y número de zona considerados. Para agilizar el programa, al inicio del mismo se define el número de generaciones que tienen que ocurrir después de la última escritura en el archivo, para que vuelva a realizar esta acción. Este módulo no pertenece al algoritmo genético y es independiente del mismo, además no requiere modificaciones en caso de que cambie la función que calcula la esperanza del valor presente del costo debido a la zonación.

#### **A.6 FUNCIÓN MATRIMONIO.**

El siguiente paso consiste en la cruce de las regiones que conforman a la población actual (*MATRIMONIO*). Para este propósito se procede como sigue:

- a) Se seleccionan las parejas de regiones que se van a cruzar (*LIGUE*). Esta selección se realiza en función de la probabilidad de cruce definida al inicio de la simulación. Por cada región que compone la población se genera un número aleatorio comprendido entre  $[0,1]$  con distribución uniforme, el cual se compara con la probabilidad de cruce. Si el número es menor o igual a dicha probabilidad, se elige la región en cuestión para su cruce. Para efectuar la cruce dos regiones son requeridas, por lo que la selección se realiza en números pares; en caso de que se tenga un número impar de regiones al terminar la selección, la última elegida se desecha.
- b) Se define aleatoriamente con distribución uniforme el primer elemento y el número de elementos, a partir del primero, que se intercambiarán en la cruce (*DEGENERE*). Se define a *NER* como el número de elementos que constituyen a la región y es igual al producto del número de celdas que conforman la región y el número de elementos asociados a cada celda. Así, los números aleatorios se generan en el rango  $[1,NER]$  para obtener el número asociado al primer elemento y  $[1,NER-1]$  para el número de elementos a intercambiar.
- c) Se realiza la cruce entre las regiones seleccionadas (*CRUZA*), es decir, se intercambia el rango de elementos de las dos regiones a cruzar. Este rango está definido según se describe en el inciso anterior.

#### **A.7 FUNCIÓN MUTACIÓN.**

La mutación consiste en el cambio del valor correspondiente de un elemento que representa a una región en sistema binario, es decir, modifica el valor de dicho elemento (0 ó 1, según corresponda). La selección del elemento a mutar (*LOCALIZACIÓN*) se realiza en función de la probabilidad de mutación. El inverso de la probabilidad de mutación define el máximo número posible de elementos que pueden separar al último elemento mutado del siguiente. Así para obtener el comportamiento y la convergencia deseados en las simulaciones se determinó que el valor de la probabilidad de mutación definida para un número de 8 elementos asociados a cada celda debe cumplir con la relación:

$$PM^{-1} / NER = 0.625 \quad (A1.1)$$

donde:  $PM^{-1}$  es el inverso de la probabilidad de mutación. NER es el número de elementos que conforman a una región y es igual al producto del número de celdas constituyentes de la región y el número de elementos asociados a cada celda.

La expresión A1.1 implica que una región se mutará por lo menos  $1 / 0.625 = 1.6$  veces. El alto número de mutaciones que implica la definición anterior se justifica por la manera en que se manejan las regiones en sistema binario. La traducción de los números de zona asignados a una celda de sistema binario a sistema decimal se efectúa tomando la parte entera del producto de un número representado por el sistema binario y una constante de proporcionalidad. Así, existe un conjunto de valores en el sistema binario que corresponden al mismo valor en el sistema decimal, por lo que la mutación en un elemento en el sistema binario no implica que se haya cambiado el valor de la zona en el sistema decimal. Por lo anterior se tiene que si se cambia el número de elementos asociados a la celda (8, para el caso de 3 zonas), se modificará la relación propuesta en A1.1 para calcular el valor de la probabilidad de mutación, hasta obtener el comportamiento deseado de los costos medios y óptimos obtenidos en las simulaciones.

Para definir el siguiente elemento a mutar a partir de la última mutación se toma la parte entera del producto entre el inverso de la probabilidad de mutación y un número aleatorio que se genera en el rango  $(0,1]$  con distribución uniforme (*MUTARATE*). Definido el número de elemento a mutar, lo que resta es cambiar su valor (0 ó 1, según corresponda) (*MUTANDO*), y se verifica que la siguiente mutación se encuentre dentro de los elementos de las regiones que constituyen a la población actual. En caso de que no se encuentre, se consideran los elementos no mutados en la población actual en la contabilidad de los elementos que separan a la última mutación y aquella por efectuar en la siguiente población.

La mutación es el último paso de un ciclo que se repite un número de iteraciones definido al inicio del programa. Al salir del ciclo mencionado se repiten algunas de las funciones anteriores, con el fin de evaluar la población final resultante. El algoritmo descrito se observa en su diagrama de flujo correspondiente, mostrado en la fig. A1.1.

## A.8 FUNCIÓN MOD1DCOW.

A continuación se detalla el procedimiento descrito para la evaluación de la función objetivo. El proceso de evaluación se puede resumir en los siguientes pasos:

- a) Se tiene como información inicial, para el módulo donde se define la función, al cromosoma que describe la región zonificada.
- b) Se calcula la expresión 4.8 asociada a  $\delta W_{ik} / \delta c_{ik}$  para un vector de valores de coeficientes  $\{c\}$  previamente definido (*METCKCOP*). En este paso se observa que el cómputo de la expresión anterior implica realizar los cálculos asociados a una celda una vez por cada región zonificada considerada dentro de la simulación, lo cual resulta ser ineficiente. Para evitar esto se

determina la expresión anterior para dos vectores, uno correspondiente a los valores de los coeficientes mencionados  $\{c\}$  y el otro a las intensidades  $\{z\}$  previamente definidas y que debe de cubrir el rango de valores de las intensidades demandadas por los distintos tipos de estructuras considerados. Así se obtiene una matriz en la que se guardan los datos anteriores y que se escribe en archivos binarios (*DEFINICIÓN DE LA VARIABLE MATRIZZPA*). A partir de dicha matriz se calcula, mediante interpolación, cada sumando de la expresión 4.8 asociado a las intensidades  $z_{ij}$  y al vector de coeficientes  $\{c\}$ . De esta manera, para cada región zonificada, se obtienen  $K$  vectores (uno por cada zona) de valores de la función  $\delta W_i / \delta c_i$  correspondientes al vector de coeficientes predefinido, a partir de los cuales se determinarán los valores de los  $K$  coeficientes óptimos de diseño  $c_{ik}$  para el tipo de estructura  $i$  y para cada zona  $k$ . La interpolación se realiza mediante polinomios de Lagrange de 2º, 3º y 5º grado (*APROXLINEAL*) en función de los datos disponibles. Los puntos a interpolar se consideran a la mitad de los datos utilizados para interpolar y obtenidos del vector  $\{z\}$ . Es así que si se tiene que la intensidad requerida está localizada entre los dos primeros (o últimos) valores del vector  $\{z\}$ , entonces se ocupa una interpolación de 2º grado. Si se encuentra entre el segundo y tercer valor (contados a partir de cualquier extremo) de  $\{z\}$ , entonces se ocupan los tres primeros (o últimos) valores asociados a dicho vector para realizar la interpolación de 3º grado. Para cualquier otro caso se realiza una interpolación de 5º grado.

- c) Se determinan los coeficientes óptimos correspondientes a las  $K$  zonas en que se divide la región considerando el tipo de estructura  $i$  (*CALCCWOPT*). Se encuentran los puntos en donde haya cambio de signo (*CKMINMAX*) en cada uno de los  $K$  vectores que definen los valores de la función  $\delta W_{ik} / \delta c_{ik}$  correspondientes al vector de coeficientes  $\{c\}$ . Utilizando los polinomios de Lagrange y los criterios de interpolación descritos en el inciso b) (*APROXLINEAL*), se obtienen los valores de los  $K$  coeficientes en donde se cumpla la condición  $\delta W_{ik} / \delta c_{ik} = 0$  para los  $K$  vectores de los valores de la derivada mencionada.
- d) Se define el costo de la región zonificada considerando el tipo de estructura  $i$  (*CALCCWOPT*). Con los  $K$  coeficientes obtenidos en el inciso c), se obtienen los costos correspondientes a las  $K$  zonas mediante la expresión 4.5. Para la determinación del costo se realiza un procedimiento análogo al utilizado para el cálculo de la derivada, es decir, se crea una matriz de valores de  $w(c,z)$  para los vectores  $\{z\}$  y  $\{c\}$  mencionados. La información de esta matriz se guarda en archivos binarios (*DEFINICIÓN DE LA VARIABLE MATRIZZPA*). De los valores de la matriz correspondiente se definen los  $K$  vectores que contienen los valores de los costos

asociados al vector  $\{c\}$ . A partir de este vector de valores de costos se interpola para obtener el costo  $W_{ik}$ , asociado al coeficiente óptimo de diseño  $c_{ik}$  ya determinado. Realizando este proceso para las  $K$  zonas, el cálculo del costo  $W_i$  debido a la zonación se realiza mediante la expresión 4.6.

e) En caso de que se consideren  $I$  tipos de estructuras, el costo buscado se encuentra realizando los incisos a), b) c) y d)  $I$  veces, de manera que el costo  $W$  se obtenga mediante la ecuación 4.7.

Con el procedimiento anterior se obtiene ya sea  $W$  o  $W_i$  que corresponden a los valores que entrega el módulo y que el algoritmo genético considera como los costos (adaptaciones) de las regiones zonificadas que constituyen a la población.

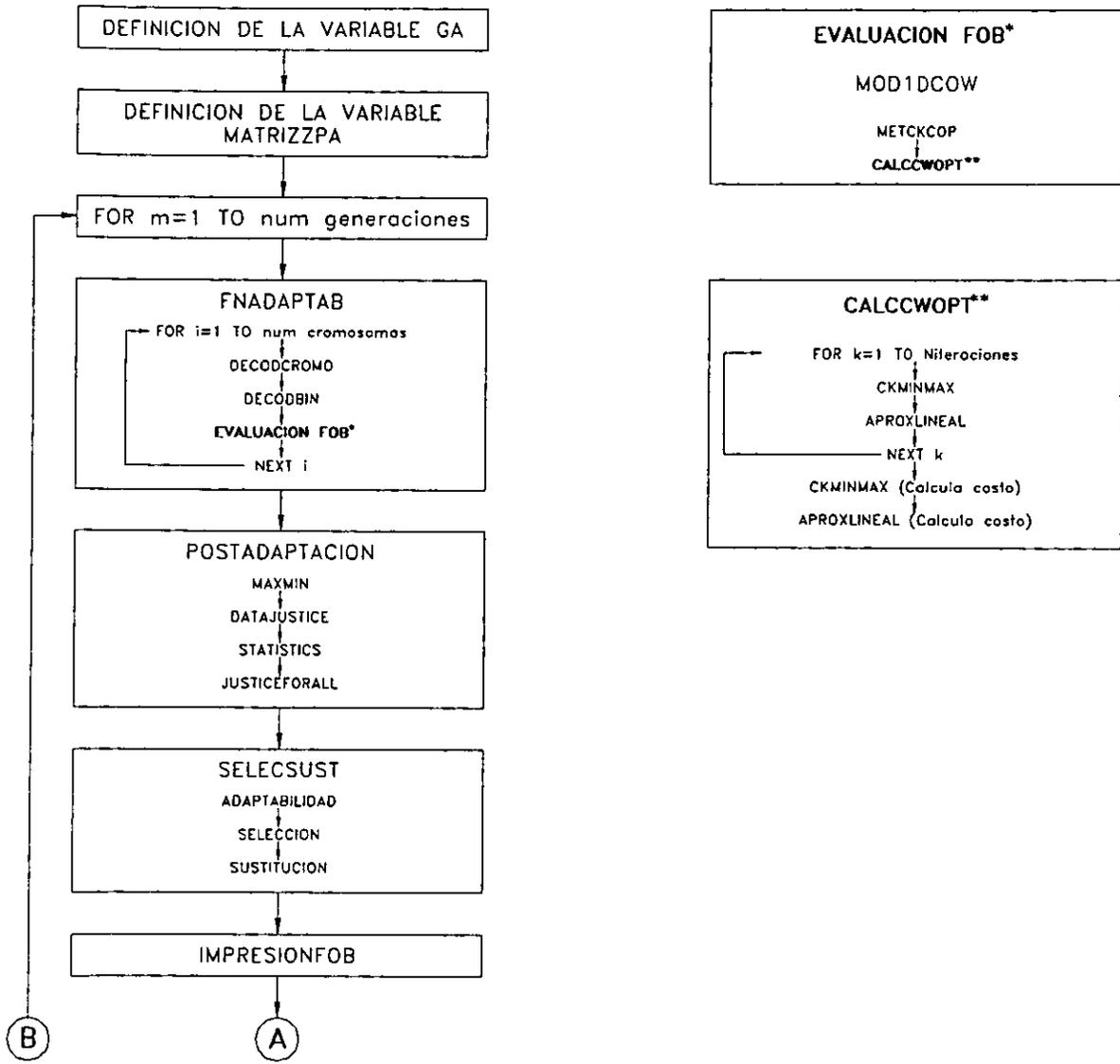


Fig. A1.1a Diagrama de flujo. Algoritmo genético.

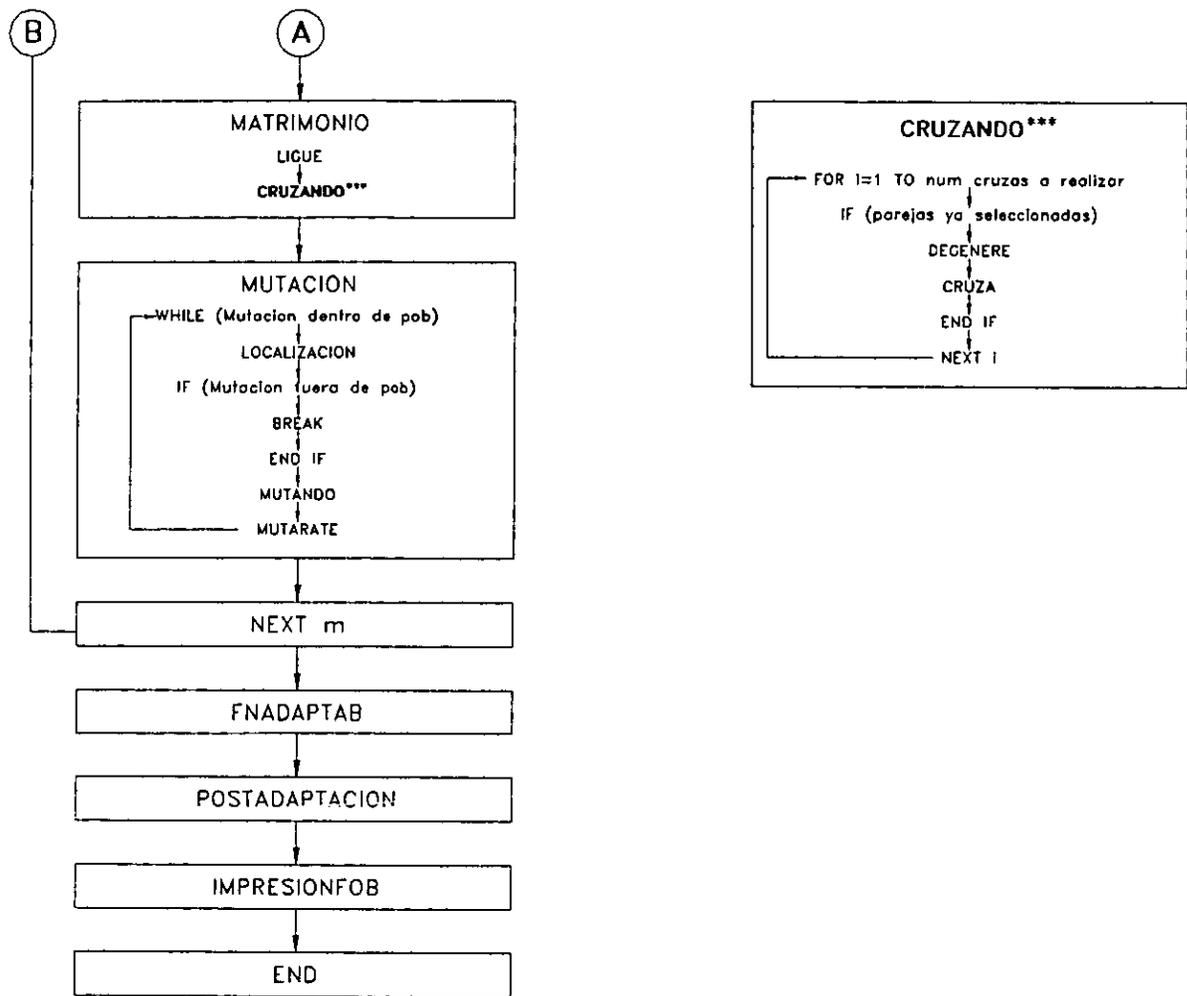


Fig. A1.1b Diagrama de flujo. Algoritmo genético.