

**Un modelo de interacción
espacial para identificar
la estructura funcional de la
red de ciudades de México:
diseño, instrumentación y
conclusiones experimentales**



3

Introducción: una red de ciudades para cada propósito

VALE INICIAR ESTE capítulo retomando algunas de las premisas centrales de este análisis sobre la *red de ciudades de México*, que se propusieron en el Capítulo 2, porque definen las líneas del trabajo empírico que se presentan en éste y en el siguiente capítulo de este estudio. Estas premisas derriban la idea de que existe *una sola y única red de ciudades* (como lo asume el estudio del Conapo, 1991) y, por el contrario, postulan que existe “*una red de ciudades para cada propósito*” de planeación y política, tanto pública como privada. Estas premisas son las siguientes:

- i. No existe *una sola definición operativa de red de ciudades*. Lo que existe es *una red de ciudades para cada propósito* de planeación o de política tanto pública como privada. Por tanto, el primer punto que hay que resolver es *cuál es el propósito* para el que se pretende definir una red de ciudades. *En función del propósito es posible identificar la red...* las redes de asentamientos son, simplemente, un tipo específico de región: *una región funcional*.
- ii. En este trabajo *se asume un propósito* de política orientado a *apoyar las decisiones de inversiones públicas y privadas*, en términos de su escala y localización espacial, sectorial y temporal, de ajustar la distribución espacial

de la población de acuerdo con las potencialidades de la red de ciudades, de integrar más eficazmente el territorio y de simular escenarios que permitan evaluar *ex ante* decisiones de política e inversión.

- iii.* Por lo tanto, las interacciones urbanas que *resultan centrales* para este trabajo son las que se *derivan de la movilidad de bienes, servicios y consumidores en el territorio*.

Estas premisas son las que guían la manufactura de lo que se presenta en el resto de este estudio.

Estrategia de exposición del capítulo

El capítulo se organiza en seis secciones (aparte de esta introducción) de la siguiente manera: en la primera sección se presenta de forma sintética la metodología de Nyusten y Dacey (1968) para definir la *estructura funcional* de las redes de ciudades. Si bien se trata de un trabajo clásico, el mérito de esta metodología es que no sólo es una de las más utilizadas para definir la estructura funcional de redes, sino que sigue siendo punto de apoyo principal para trabajos contemporáneos sobre el tema. A enero de 2011 se reportan más de cincuenta artículos especializados publicados en revistas internacionales que han utilizado la metodología de Nyusten y Dacey en los últimos 10 años, y tiene cerca de cinco mil registros en Internet.¹ Es importante tener clara la metodología de Nyusten y Dacey para entender y valorar puntualmente los análisis y los resultados empíricos que se presentan en las siguientes secciones del capítulo y en el Capítulo 4 de este documento.

Una vez revisada la metodología de Nyusten y Dacey, se procede, en la segunda sección, a identificar la mejor manera de establecer la *jerarquía* de la red de ciudades de México, de acuerdo con el propósito establecido en las premisas centrales de este trabajo (véanse Capítulo 2 y la introducción de este capítulo). Se probaron tres variables acordes con estos propósitos: *i.* población (de 2005); *ii.* valor agregado de la producción (correspondiente a 2003), y *iii.* población ocupada (en 2003). Para realizar los experimentos se utiliza una muestra de 86 ciudades del conjunto total de ciudades del país identificadas por el Consejo Nacional de Población (Conapo, 2010a) (Cuadro 3.1; Figura 3.1). Estas 86 ciudades se seleccionaron porque se cuenta con un *índice de competitividad*

¹ Un ejemplo reciente para México es el trabajo de Nava, 2009. Una revisión del estupendo estudio de Nava se puede ver Garrocho, 2011.

desarrollado por el Instituto Mexicano para la Competitividad (Imco, 2010) que ha sido analizado satisfactoriamente por el Conapo, y que se pone a prueba como *indicador de atractividad de flujos* en la sección 3.

Cuadro 3.1
Muestra de las 86 ciudades del total de los asentamientos urbanos del país identificados por el Conapo, 2010

<i>Núm.</i>	<i>Ciudad</i>	<i>Núm.</i>	<i>Ciudad</i>
1	ZM de Aguascalientes	44	ZM de Cuautla
2	Ensenada	45	ZM de Cuernavaca
3	ZM de Mexicali	46	ZM de Tepic
4	ZM de Tijuana	47	ZM de Monterrey
5	La Paz	48	ZM de Oaxaca
6	Los Cabos	49	ZM Salina Cruz (Tehuantepec)
7	Campeche	50	Tuxtepec
8	Ciudad del Carmen	51	ZM de Puebla-Tlaxcala
9	Ciudad Acuña	52	ZM de Tehuacán
10	ZM de Monclova-Frontera	53	ZM de Querétaro
11	ZM de Piedras Negras	54	San Juan del Río
12	ZM de Saltillo	55	Chetumal
13	ZM de La Laguna	56	ZM de Cancún
14	ZM de Colima-Villa de Álvarez	57	ZM de Rioverde-Ciudad Fernández
15	Manzanillo	58	ZM de San Luis Potosí-Soleidad de Graciano Sánchez
16	ZM de Tecomán	59	Los Mochis
17	San Cristóbal de las Casas	60	Culiacán Rosales
18	Tapachula de Córdova y Ordóñez	61	Mazatlán
19	ZM de Tuxtla Gutiérrez	62	Ciudad Obregón
20	ZM de Chihuahua	63	ZM de Guaymas
21	Delicias	64	Hermosillo
22	ZM de Juárez	65	Navójoa
23	ZM del Valle de México	66	Heroica Nogales
24	Victoria de Durango	67	Cárdenas
25	Celaya	68	Comalcalco
26	Guanajuato	69	Huimanguillo
27	Irapuato	70	Macuspana
28	ZM de León	71	ZM de Villahermosa

Continúa Cuadro 3.1...

Núm.	Ciudad	Núm.	Ciudad
29	Salamanca	72	ZM de Matamoros
30	ZM de San Francisco del Rincón	73	ZM de Nuevo Laredo
31	ZM de Acapulco	74	ZM de Reynosa-Río Bravo
32	Zihuatanejo	75	ZM de Tampico
33	ZM de Pachuca	76	Ciudad Victoria
34	ZM de Tula	77	ZM de Tlaxcala-Apizaco
35	ZM de Tulancingo	78	ZM de Coatzacoalcos
36	ZM de Guadalajara	79	ZM de Córdoba
37	ZM de Ocotlán	80	ZM de Xalapa
38	ZM de Puerto Vallarta	81	ZM de Minatitlán
39	ZM de Toluca	82	ZM de Orizaba
40	ZM de Morelia	83	ZM de Poza Rica
41	ZM de La Piedad-Pénjamo	84	ZM de Veracruz
42	Uruapan	85	ZM de Mérida
43	ZM de Zamora-Jacona	86	ZM de Zacatecas-Guadalupe

Justamente en la sección 3 se analizan los componentes centrales del modelo de interacción espacial utilizado en este trabajo y se toman decisiones en cuanto a su *formulación operativa*: la atraktividad de los destinos (indicadores *simples* y *compuestos*), la *población* consumidora que se puede mover desde sus orígenes, los *costos de transporte* (medidos en distancia por carretera, tiempo y costo de recorrido por carretera, y como distancia lineal) y el *parámetro de la fricción de la distancia*.

Establecidas operativamente las estimaciones de los componentes del modelo de interacción espacial se procede, en la sección 4, a realizar los *experimentos necesarios* para identificar la manera más adecuada de *instrumentar la metodología* y el *modelo*. Se explican los procedimientos seguidos y se exponen transparentemente los razonamientos que apoyan cada una de las decisiones metodológicas y operativas, con el fin de facilitar su *discusión, análisis* y eventual *mejora*.

Luego, en la sección 5, se aplica de manera *integral* la metodología para definir la red de ciudades de México a la muestra de 86 ciudades. El resultado fue exitoso y permitió identificar la estructura funcional de la red, su nodo central, sus ciudades subnodales, y las ciudades vinculadas en los niveles nacional y subnacional. Estos resultados ofrecen *bases sólidas* para definir, en el próximo

capítulo, la estructura funcional de la red de ciudades de México, considerando el total de los asentamientos urbanos identificados por el Conapo: 358 ciudades.

Finalmente, se presentan las conclusiones del capítulo, que serán la base metodológica para identificar, en el Capítulo 4 de este estudio, la red de ciudades de México considerando las 358 ciudades del territorio nacional identificadas por el Conapo.

3.1. Método general para definir la estructura funcional de las redes de ciudades

En 1961, Nyusten y Dacey publicaron uno de los artículos que más han influido el análisis de las redes de ciudades. A pesar de estar por cumplir 50 años, este artículo sigue siendo multicitado y es una guía para quienes intentan identificar la estructura funcional de redes de ciudades a partir de flujos de bienes, personas o comunicaciones, por ejemplo. En esta sección se sintetiza su método, que será *base de los apartados empíricos* que se presentan más adelante, así como en el Capítulo 4, donde se consideran los 358 asentamientos urbanos del país.

Lo que hace el método de Nyusten y Dacey es cuantificar el *grado de asociación* entre pares de ciudades pertenecientes a una red, de tal manera que sea posible identificar las *asociaciones interurbanas más importantes*. Estas asociaciones entre pares de ciudades pueden ser *directas* (las que ocurren directamente entre dos ciudades, sin ciudades *intermediarias*) o *indirectas* (las que ocurren entre dos ciudades a través de una o más ciudades *intermediarias* de la red).

Muchas de las asociaciones interurbanas son de tipo *indirecto*. Por ejemplo, las oficinas matrices de diversas empresas pueden estar en ciudades de un cierto rango, mientras que las plantas operativas se localizan en una o varias ciudades a cientos o miles de kilómetros de distancia, en ciudades de menor rango. Por eso, cuando se evalúa el tejido de las interacciones urbanas resulta evidente que se requiere un método que considere *simultáneamente* tanto las asociaciones *directas* como las *indirectas*, porque ambas definen las redes de asentamientos a diversas escalas espaciales.

Así, la magnitud de las asociaciones *directas e indirectas* se mide mediante un índice derivado de la *teoría de grafos* que sintetiza la *intensidad total* de las asociaciones entre asentamientos. Este índice cuantifica el grado de asociación entre ciudades y ofrece una base cuantitativa para agrupar redes y subredes de ciudades. Las redes y subredes de ciudades resultantes son equivalentes a

regiones funcionales (llamadas también *regiones nodales*). Cuando cada ciudad en una cierta región de estudio es asignada a una red o subred de ciudades, es posible especificar el rango de cada una y valorar las relaciones funcionales de la *jerarquía* de asentamientos.

3.1.1. La singularidad de los indicadores de interacciones urbanas

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, las ciudades pueden ser conceptualizadas como *núcleos que aglomeran espacialmente actividades y población*, que se *distribuyen* y se *asocian* en el territorio. Las asociaciones entre ciudades pueden ser de muy diversos tipos, por lo que se consideran *multidimensionales*. Por lo tanto, si se utiliza un solo indicador de asociación funcional, digamos llamadas telefónicas, la agrupación de las ciudades que se puede derivar será, simplemente, una *red de centros e interrelaciones telefónicas*. Esto significa que el indicador que se utilice para medir las interacciones urbanas sólo representará redes y subredes de ciudades *asociadas a ese indicador*. Por eso se ha mencionado que es fundamental establecer claramente, primero, el propósito de definir redes y subredes de ciudades, para seleccionar luego el indicador de interacción más apropiado.

3.1.2. La región funcional (o nodal)

Las regiones funcionales se definen a partir de la evaluación de los contactos entre asentamientos, donde cada uno es asignado a una *red de ciudades* con la que mantiene sus interacciones más importantes. Usualmente, se trata de un conjunto de ciudades más o menos cercanas entre sí, donde una de ellas polariza la mayoría de los flujos. A esta ciudad se le puede llamar *ciudad nodal* si es la más importante del área de estudio, o *subnodal* si es la más importante de una subregión. La agregación de estas ciudades altamente interrelacionadas conforma lo que se llama una *región funcional (o nodal)*. Las *asociaciones más intensas* son el *elemento crítico* que define la estructura funcional de las regiones nodales.

La región funcional puede ser reducida a una *red abstracta* de líneas y puntos: los puntos representan las ciudades y las líneas, las relaciones funcionales interurbanas. Aunque existe una miríada de líneas en una red de ciudades, subyace una *estructura básica* representada por las *asociaciones más intensas*,

que definen la constelación o red de ciudades (es decir: *regiones funcionales*). Tanto las interacciones urbanas *directas* como las *indirectas* son relevantes en la definición de la estructura funcional de las redes urbanas.

Resumiendo: la región funcional se define sobre la base del *flujo más intenso* que emite o recibe cada asentamiento en el entorno de una *ciudad nodal* o *subnodal*, y se delimita mediante la agregación de estos asentamientos. Estas *constelaciones* de ciudades establecen la organización funcional de las redes y subredes de ciudades en el territorio, así como el papel que juega cada una en el funcionamiento interrelacionado del conjunto de asentamientos. La intensidad y la dirección de las interacciones urbanas dependen de las dimensiones y las funciones que desempeña cada una de ellas.²

Aplicación geográfica de la teoría de grafos

La teoría de grafos es una *representación matemática de interrelaciones*. Si se especifican ciertas propiedades de las relaciones entre *ciudades* y se acepta la abstracción de *puntos* (ciudades) y *líneas* (relaciones) de la teoría de grafos, se pueden derivar algunos teoremas para analizar los flujos interurbanos. Primero, se consideran las ciudades de una región de estudio como un conjunto de puntos, y las líneas que unen pares de puntos, como un cierto flujo entre esos puntos que representan ciudades. El conjunto finito de puntos y líneas, en el que cada línea conecta *exactamente* dos puntos, es un grafo lineal de las relaciones que establecen los flujos.

3.1.3. Algunas características de los grafos lineales

Las *redes de líneas* son la única información que contienen los grafos lineales. La longitud de los flujos (las *líneas*), que son elementos centrales de la cartografía, no están definidos en el grafo. La mayor parte de la teoría de grafos se relaciona con este tipo de grafos, que simplemente indican si una relación (un *flujo*) *existe o no* entre un determinado par de puntos. Las conexiones, sin embargo, podrían contener información sobre su *intensidad* si se le asigna un valor a cada línea (a cada *flujo*). Si el grafo sólo muestra *si existe o no* relación entre pares de puntos se dice que es *binario*, y si las relaciones entre pares de puntos son iguales en ambos sentidos, se dice que el grafo es *simétrico*.

² Incluso a escala global; véase, por ejemplo: Esparza y Krmenc, 2000.

Las relaciones entre pares de puntos pueden ser *directas* si el flujo que sale de una ciudad "a" llega directamente a una ciudad "b", o pueden ser *indirectas* si el flujo que sale de "a" pasa por las ciudades "c", "d" y "e" antes de llegar finalmente a la ciudad "b". Las ciudades involucradas en el trayecto del flujo (tanto la emisora "a" y la receptora "b", como las ciudades intermediarias: "c", "d" y "e") forman lo que se llama una *secuencia*. Los grafos que muestran la *orientación* de los flujos (de la ciudad "a" a la ciudad "b", por ejemplo) se llaman *grafos direccionados* o *diagramas*. Un punto se califica como *adyacente* a otro punto si se le conecta con una línea (flujo), y el *grado* de un punto se refiere al número de puntos a los cuales es *adyacente*.

3.1.4. Notación de matrices

Para cada grafo lineal existe una *matriz adyacente* que describe completamente el grafo, y viceversa. Cada punto del grafo se representa en la matriz en la celda donde cruzan cada renglón y cada columna (como estamos hablando de flujos, esta matriz tendría la forma de una *matriz origen-destino*). Así, el elemento x_{ij} de la matriz adyacente toma el valor de la línea (del flujo) que va del punto o ciudad de origen "i" al punto o ciudad de destino "j". Si no existe flujo (línea) entre "i" y "j", el valor de x_{ij} es igual a cero.

Los elementos de la diagonal de la *matriz adyacente* (x_{ii}) representan la relación de cada punto consigo mismo. Esta relación puede o no estar definida. Cuando no está definida, todos los elementos de la diagonal de la matriz se igualan, *por convención*, a cero o a un valor que tienda a cero (porque en ocasiones el cero absoluto complica algunas operaciones matriciales).³

3.1.5. Propiedades de las relaciones nodales entre ciudades

La teoría de grafos sugiere que en la miríada de relaciones que existen entre ciudades, la red de los *flujos nodales* (los de mayor *intensidad*) perfila la *estructura funcional* de las redes de ciudades. La idea de *flujo nodal* entre pares de ciudades puede definirse de varias maneras: como el flujo *de llegada* o *de salida*, o como la *suma de ambos* flujos, dependiendo de los propósitos de cada estudio. En el caso de las redes de ciudades resultan de particular importancia

³ Esto se hace operativo en los modelos de interacción espacial mediante la matriz de los costos de transporte entre las ciudades. A los costos de transporte de cada ciudad consigo misma se les asigna un valor que tienda a infinito, para eliminar los flujos entre las ciudades consigo mismas.

tanto los flujos de salida como los flujos de llegada a cada ciudad, porque ofrecen información estratégica que permite apoyar las decisiones de inversiones públicas y privadas, en términos de su escala y localización (espacial, sectorial y temporal) y de otros temas de planeación de ciudades y regiones que resultan altamente relevantes para los sectores público y privado.

Los flujos nodales se pueden identificar fácilmente mediante la inspección visual de la matriz adyacente: será el elemento x_{ij} que registre el máximo valor en cada renglón (asumiendo que la matriz tiene las ciudades de origen en la columna del extremo izquierdo, y las ciudades de destino en el renglón superior, tal como una matriz origen-destino). Una vez que se identifican los flujos nodales de cada ciudad de origen, corresponde agrupar las ciudades en torno a un asentamiento nodal. El problema radica en reconocer estos asentamientos nodales. Para lograrlo, se recurre a tres propiedades fundamentales de los flujos nodales:

- i. *Propiedad de independencia.* Esta propiedad establece que una ciudad es independiente (o nodal) si su flujo mayor lo dirige a una ciudad de menor importancia o tamaño. Por lo tanto, para identificar ciudades independientes se requiere una medida del tamaño o importancia de las ciudades. El tamaño se puede asignar a las ciudades de manera externa a la matriz de interacciones; por ejemplo: utilizando información de población, valor agregado de la producción o población ocupada; o internamente a la matriz de interacciones: por el volumen de flujos que cada ciudad recibe o envía, o por la suma de ambos.
- ii. *Propiedad de transitividad.* Esta propiedad implica que si una ciudad "a" se vincula a la ciudad "b" y ésta se vincula a la ciudad "c", entonces la ciudad "a" está vinculada también a la ciudad "c".
- iii. *Propiedad acíclica.* Esta propiedad establece que ninguna ciudad puede estar vinculada a las ciudades que se vinculan con ella.

3.1.6. Dos teoremas

Los flujos nodales perfilan la estructura nodal o funcional de la región, representan las asociaciones funcionales de las ciudades en esa región y definen la jerarquía urbana (si se utilizan los flujos como indicador de la importancia de cada ciudad).

Dos teoremas facilitan analizar los grafos lineales:

- i. Las *redes* de ciudades pueden dividirse en *subredes*; es decir, en conjuntos interrelacionados de ciudades que pertenecen a un conjunto mayor de asentamientos.
- ii. Cada subred tiene *una y única ciudad nodal* que articula la subred de asentamientos.

3.1.7. Asociaciones indirectas

Hasta el momento, lo que se ha presentado se refiere a las *asociaciones directas* entre ciudades. Estas asociaciones directas son las que se utilizan normalmente en México en los estudios que se apoyan en la metodología de Nyusten y Dacey para analizar redes a *diversas escalas espaciales* (Conapo, 1991; Nava, 2009). Sin embargo, las *asociaciones indirectas* pueden tener una notable influencia en la determinación de las *asociaciones funcionales*, por lo que deben ser consideradas. Se acepta que las *asociaciones directas* tienen la importancia mayor, pero las *relaciones indirectas* no deben, simplemente, dejarse de lado como si no existieran. Las asociaciones indirectas en una red de ciudades pueden ser calculadas mediante la manipulación matemática de la *matriz adyacente*, con el fin de ajustar con mayor precisión la *estructura funcional* de las redes y las subredes de ciudades.

3.1.8. Calculando asociaciones indirectas con la matriz adyacente

El primer paso para estimar la influencia de las asociaciones indirectas consiste en *ajustar los valores de la matriz adyacente*, de tal manera que las asociaciones directas sean sólo una *proporción* del total de las asociaciones de la ciudad nodal de toda la red (que es la ciudad de mayor tamaño o importancia). Esto se hace *calculando los totales de las columnas de la matriz adyacente* ($\sum x_{ij}$) y dividiendo cada elemento x_{ij} entre esta sumatoria, de tal manera que el total máximo de las columnas (el correspondiente a la *ciudad nodal* del sistema) sea igual a 1.0.

Si la matriz adyacente es Y , la expansión exponencial de Y tiene interpretaciones interesantes y muy útiles para estimar las *interacciones directas e indirectas* entre ciudades. La siguiente ecuación permite calcularlas:

$$B = Y + Y^2 + Y^3 + \dots + Y^n$$

En la matriz resultante B , cada componente b_{ij} representa el total de los flujos directos e indirectos de la ciudad "i" a la ciudad "j". Debe entenderse que la matriz B (derivada de la sumatoria de las expansiones potenciales de Y) *no ofrece la seguridad* de que ésa sea efectivamente la suma de los *contactos directos e indirectos* entre cada par de ciudades "i" y "j", ni que sea la *mejor* manera de estimarlas. No obstante, sí es una medida de *oportunidad de contactos indirectos* entre ciudades y es más *sólida* (tanto conceptual como técnicamente) y precisa que la *matriz simple* (Y), que considera solamente las *asociaciones directas* interurbanas.

La elección del exponente para expandir la matriz Y depende de la precisión que se quiera lograr. Nyusten y Dacey (1961), por ejemplo, expandieron Y hasta lograr valores de b_{ij} de ocho decimales.⁴ La estructura funcional de la matriz B se identifica a partir de los *flujos nodales*, de la misma manera como se explicó anteriormente para la matriz Y (de *contactos directos*).

Hasta donde sabemos, ésta es la primera ocasión que se utiliza la *expansión exponencial* de la matriz Y para estimar *flujos directos e indirectos* interurbanos en México con el fin de apoyar la identificación de la *estructura funcional* de la red nacional de ciudades.⁵

3.2. Jerarquía urbana: elemento central para definir la estructura funcional de las redes de ciudades

Como quedó claro en la revisión de la metodología de Nyusten y Dacey, el primer problema que es necesario resolver para avanzar en la identificación de la estructura funcional de una red de ciudades es establecer la *jerarquía de las ciudades* que la integran. La jerarquía de las ciudades puede hacerse *externamente* a la matriz adyacente utilizando datos demográficos o económicos, por ejemplo, o *internamente* a la matriz si se utiliza la información sobre los flujos interurbanos.

En este apartado comparamos las jerarquías resultantes de utilizar tres *indicadores externos* a la matriz adyacente (porque esta matriz se calculará posteriormente, hacia el final del capítulo): uno *demográfico* (población total) y dos de corte *económico* (población ocupada y valor agregado de la producción). Los tres indicadores son altamente relevantes para la generación de

⁴ b_{ij} representa cada casilla de la matriz B .

⁵ Véase una interesante extensión a la teoría de grafos aplicada al análisis urbano en Irvin y Hughes, 1972.

interacciones urbanas. El primero es el más utilizado en los análisis de redes de ciudades (desde los trabajos clásicos de Reilly de 1931, que generaron los primeros *modelos gravitacionales*). Los indicadores de corte económico (al igual que el de población) son también muy importantes porque se sabe que en México a mayor población ocupada y valor agregado (y también a mayor población total) corresponde una mayor *atractividad de consumidores* de una ciudad, lo que favorecerá el surgimiento de contactos interurbanos (Garrocho, 1990, 1992a, 1995, 1996). La idea es *experimentar* para identificar la variable o las variables más apropiadas para definir la jerarquía en la muestra total de 358 ciudades, cuando se aplique la metodología al conjunto nacional de ciudades en el Capítulo 4.

3.2.1. Jerarquía de ciudades según su población total en 2005

Los datos de la población total de la muestra de 86 ciudades que integran el estudio del Imco (2010) fueron proporcionados por el Conapo. De acuerdo con esta información, las primeras 15 ciudades de la jerarquía (todas mayores de 800 mil habitantes) concentran 41.9 millones de personas, equivalentes a 65.4% del total de la población de las ciudades consideradas en el estudio del Imco (Cuadro 3.1). La ciudad con mayor población en el país es la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), cuya población equivale a la población conjunta de las siguientes 10 ciudades en la jerarquía (que suman 19.3 millones de habitantes), y registra un *índice de primacía* de 1.42, que significa que la primera ciudad en la jerarquía es 42% mayor que la suma de la población de las siguientes cinco ciudades.⁶

3.2.2. Jerarquía de ciudades según su población ocupada en 2003

La población ocupada de las primeras 15 ciudades de la jerarquía suma 7.9 millones de personas (Cuadro 3.2), que representan 68.3% del total de la población ocupada en las 86 ciudades de la muestra utilizada. Este dato muestra una concentración de la población ocupada en las primeras 15 ciudades de la jerarquía ligeramente mayor que la que registró la población total (65.4%), lo

⁶ El *índice de primacía* se calcula dividiendo el dato correspondiente a la primera ciudad de la jerarquía entre la suma de los datos correspondientes a las *tres o cinco* ciudades que le siguen. En este caso se dividió la *población* de la ZMVM entre la *suma de las poblaciones* de las *cinco* ciudades siguientes: ZM de Guadalajara, ZM de Monterrey, ZM de Puebla-Tlaxcala, ZM de Toluca y ZM de Tijuana.

Cuadro 3.1
Ciudades Imco: jerarquía urbana según población, 2005

<i>Ciudad</i>	<i>Pob. 2005</i>	<i>Rango</i>
ZM del Valle de México	19,239,910	1
ZM de Guadalajara	4,095,853	2
ZM de Monterrey	3,738,077	3
ZM de Puebla-Tlaxcala	2,470,206	4
ZM de Toluca	1,633,052	5
ZM de Tijuana	1,575,026	6
ZM de León	1,425,210	7
ZM de Juárez	1,313,338	8
ZM de La Laguna	1,110,890	9
ZM de San Luis Potosí-Soledad de G.C.	857,753	10
ZM de Querétaro	950,828	11
ZM de Mérida	897,740	12
ZM de Mexicali	855,962	13
ZM de Aguascalientes	834,498	14
ZM de Tampico	803,196	15
Total	41,901,539	

Fuente: Imco, 2010.

que se refleja en el *índice de primacía*, que adquiere un valor menor al registrado en la jerarquía según la población total: 1.31.

Resulta aún más interesante notar los *cambios* que ocurren en la jerarquía de ciudades si se utiliza la *población ocupada* en lugar de la *población total*. Destacan los siguientes: *sólo cuatro ciudades mantienen el lugar* que tenían en la jerarquía definida con la población total: la ZMVM (lugar 1), la ZM de Puebla-Tlaxcala (lugar 4), la ZM de Tijuana (lugar 6) y la ZM de León (lugar 7). *Todas las demás (11 de las primeras 15 ciudades) cambiaron su lugar* en la jerarquía; *cinco hacia arriba*: ZM de Monterrey (pasó del lugar 3 al 2), ZM de Juárez (del 8 al 5), ZM de La Laguna (del 9 al 8), ZM de Mérida (del 12 al 10) y la ZM de Aguascalientes (del 14 al 13); *seis hacia abajo*: la ZM de Guadalajara (del lugar 2 al 3), la ZM de Toluca (del 5 al 9), la ZM de San Luis Potosí (del 10 al 11), la ZM de Querétaro (del 11 al 12), la ZM de Mexicali (del 13 al 16) y la ZM de Tampico (del 15 al 20); y *aparecen* dos nuevas ciudades entre las primeras 15 de la jerarquía cuando se utiliza *población ocupada*: la ZM de Chihuahua, que pasó

Cuadro 3.2
Ciudades Imco: jerarquía urbana según población ocupada, 2003

<i>Ciudad</i>	<i>Población ocupada 2003</i>	<i>Rango</i>
ZM del Valle de México	3,504,488	1
ZM de Monterrey	832,850	2
ZM de Guadalajara	802,583	3
ZM de Puebla-Tlaxcala	392,514	4
ZM de Juárez	332,853	5
ZM de Tijuana	317,830	6
ZM de León	268,540	7
ZM de La Laguna	237,861	8
ZM de Toluca	221,942	9
11ZM de Mérida	183,020	10
ZM de San Luis Potosí-Soledad de G.S.	176,268	11
ZM de Querétaro	175,815	12
ZM de Aguascalientes	164,864	13
ZM de Chihuahua	164,820	14
ZM de Reynosa-Río Bravo	145,734	15
Total	7,921,982	

Fuente: Imco, 2010.

del lugar 18 en la jerarquía de población al lugar 14, y la ZM de Reynosa-Río Bravo, que pasó del lugar 24 al 15.

Cabe recordar que no es propósito de este apartado indagar en las causas y las implicaciones de estos cambios en la jerarquía, según qué indicador se utilice, sino identificar la intensidad de estos cambios para generar argumentos que permitan seleccionar de manera razonada el indicador o los indicadores que se utilizarán para definir en el Capítulo 4 la jerarquía del conjunto urbano nacional.

La conclusión hasta el momento es clara: la jerarquía de ciudades registra cambios importantes cuando se utilizan indicadores diferentes, aun si estos indicadores registran *coeficientes de correlación* (de *Pearson*) muy importantes entre sí, como es el caso de la población total y la población ocupada. El coeficiente de correlación (R^2) entre estas dos variables es de 0.995, lo que indica que se requiere una manera distinta a la del coeficiente de correlación de *Pearson* para medir la similitud entre las jerarquías. Esto se puede lograr con los métodos de *correlación de rangos* de *Spearman* y de *Kendall*.

3.2.3. Jerarquía de ciudades según el valor agregado de la producción en 2003

Cuando se utiliza el indicador de valor agregado de la producción, la jerarquía de ciudades sigue siendo encabezada por la ZMVM. El valor agregado de la ciudad de mayor importancia en el país equivale al de las siguientes 12 ciudades en la jerarquía y su índice de primacía es de 1.48. Es decir, este indicador muestra una concentración mayor que la población total y la población ocupada en las ciudades de mayor nivel en la jerarquía (Cuadro 3.3). No obstante, al ampliar la perspectiva a las primeras 15 ciudades de la jerarquía, se observa una concentración de 64.8% del valor agregado total, lo que es ligeramente menor a la concentración de la población (65.4%) y de la población ocupada (68.3%).

Cuadro 3.3
Ciudades Imco: jerarquía urbana según valor agregado de la producción, 2003^a

<i>Ciudad</i>	<i>Valor agregado 2003</i>	<i>Rango</i>
ZM del Valle de México	166,588,226	1
ZM de Monterrey	44,095,468	2
ZM de Guadalajara	27,549,979	3
ZM de Puebla-Tlaxcala	16,332,230	4
ZM de Juárez	12,631,331	5
ZM de Toluca	11,581,164	6
ZM de León	11,261,512	7
ZM de Tijuana	9,728,044	8
ZM de Reynosa-Río Bravo	9,029,819	9
ZM de Querétaro	7,777,417	10
ZM de Saltillo	7,553,647	11
ZM de La Laguna	7,549,445	12
ZM de San Luis Potosí-Soledad de G.S.	6,624,062	13
ZM de Aguascalientes	6,020,829	14
ZM de Morelia	5,679,858	15
Total	350,003,032	

^a Se excluyeron de este cuadro Ciudad del Carmen y Comalcalco, porque sus datos de valor agregado derivados de la producción petrolera distorsionan la imagen económica del conjunto de ciudades.

Respecto a los cambios de *lugar en la jerarquía* de las primeras 15 ciudades, son muy interesantes. En comparación con la *población total*, de las 15 ciudades se mantienen 12 de ellas, tres *desaparecen* de la jerarquía (Mérida, Mexicali y Tampico, que bajan a los lugares 29, 27 y 28 respectivamente) y se *insertan* tres nuevas ciudades: la ZM de Reynosa-Río Bravo (que salta del lugar 24 al 9), la ZM de Saltillo (que pasa del lugar 20 al 11) y la ZM de Morelia (que estaba en el lugar 26 en términos de población y pasó al 15 por su valor agregado de la producción). Del resto, cinco ciudades bajaron entre uno, dos y tres lugares: en el primer caso están las ZM de Guadalajara y Toluca; en el segundo caso está la ZM de Tijuana, y en el tercer caso, las ZM de La Laguna y San Luis Potosí. Finalmente, sólo tres ciudades mantuvieron su misma posición en la jerarquía: la ZMVM (lugar 1), la de Puebla-Tlaxcala (lugar 4) y la de León (lugar 7). Es decir, si bien respecto a la jerarquía de población, la jerarquía de valor agregado registra cambios de posición en 12 ciudades y sólo tres mantienen su posición, los cambios de posición no son muy acentuados en la mayoría de las ciudades (salvo en los tres casos mencionados de las ZM de Reynosa-Río Bravo, Saltillo y Morelia).

Al comparar las jerarquías de ciudades según su valor agregado y población ocupada, se observa que los cambios de posición de las ciudades son notorios, pero un poco menos intensos que los que se registraron entre las jerarquías de población total y población ocupada: seis de las 15 ciudades no cambian de posición (incluyendo las primeras cinco que se mantienen constantes en sus posiciones); tres ciudades logran mejores posiciones respecto a la jerarquía de valor agregado (la ZM de Toluca del lugar 5 al 6; la ZM de Reynosa-Río Bravo del 15 al 9, y la ZM de Querétaro del 12 al 10), y cuatro ciudades registran descensos en sus posiciones (la ZM de Tijuana baja del lugar 6 en la jerarquía por personal ocupado al 8 en la de valor agregado; la ZM de La Laguna baja del lugar 8 al 12; la ZM de San Luis Potosí baja del 11 al 13, y la ZM de Aguascalientes baja del lugar 13 al 14). Además, dos ciudades *desaparecen* del listado de las primeras 15 ciudades de la jerarquía urbana: Mérida (que ocupaba el lugar 10 en términos de población ocupada, baja al lugar 29 en la jerarquía por valor agregado) y Chihuahua (que ocupaba el lugar 14, baja hasta el lugar 21). Llama la atención que aun cuando se comparan dos jerarquías *derivadas de variables económicas* (como población ocupada y valor agregado), se registran cambios de posiciones importantes. Esto es más notable dado que el coeficiente de correlación de *Pearson* (R^2) entre estas dos variables es de 0.87, lo que confir-

ma que se requiere de un *método diferente* para estimar las similitudes entre jerarquías urbanas definidas con variables distintas.

3.2.4. Comparación de las jerarquías de ciudades con los métodos de correlación de rangos de Spearman y de Kendall

Población total vs población ocupada

El coeficiente de correlación de *Spearman* entre *población total* y *población ocupada* registra una valor de 0.955, que es ligeramente más bajo que la correlación de *Pearson*, que es de 0.995 (ambas correlaciones se interpretan igual y sus valores van de -1.0 a +1.0). Los dos coeficientes de correlación son significativos a un nivel de confianza de 0.01. Esto significa que sí existen cambios de posiciones entre las ciudades en las dos jerarquías (una definida con población total y la otra con población ocupada), pero que son, a nivel agregado, poco importantes como para marcar una disimilitud notable (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4
Coefficientes de correlación de rangos de Spearman

	<i>Población total 2005</i>	<i>Población ocupada 2003</i>	<i>Valor agregado de la producción, 2003</i>
Población total, 2005	N.A.	0.955	0.752
Población ocupada, 2003	0.955	N.A.	0.813
Valor agregado de la producción, 2003	0.752	0.813	N.A.

Esta conclusión merece confirmarse con *otro método de correlación de rangos*. En este caso se utiliza el *método de Kendall*. El valor del coeficiente de *Kendall* puede variar de 0.0 a +1.0. Mientras más alto el valor del coeficiente, mayor la correlación entre las jerarquías, y viceversa. La principal diferencia entre el coeficiente de *Spearman* y el de *Kendall* es que el primero le da más peso a las *mayores diferencias* de rango, mientras que el coeficiente de *Kendall* se concentra más en los *cambios* de rango (Burt, Barber y Rigby, 2009; Smith, 1975). El valor del coeficiente de correlación de *Kendall* para las jerarquías de ciudades derivadas de la *población total* y la *población ocupada* es de 0.955, exactamente igual al coeficiente de *Spearman*, lo que confirma que a *nivel agregado*

las diferencias entre ambas jerarquías no son relevantes (Cuadro 3.5). En otras palabras, se puede usar cualquiera de las dos jerarquías de manera indistinta en la metodología para definir la red de ciudades de México.

Población total vs valor agregado

El coeficiente de correlación de *Spearman* para las jerarquías urbanas obtenidas de utilizar las variables *población total* y *valor agregado* es 0.752, lo que indica mayores diferencias que en el caso de las jerarquías entre *población total* y *población ocupada* (que registraron un coeficiente de *Spearman* de 0.955) (Cuadro 3.4). Además, el coeficiente de correlación de *Kendall* registra un valor de 0.939, también menor al que se registró al comparar las jerarquías entre *población total* y *población ocupada* (que fue de 0.955) (Cuadro 3.5). De estos indicadores se puede concluir que las jerarquías siguen siendo similares, aunque con diferencias mayores en el caso de las que utilizan como variables la *población total* y el *valor agregado*.

Cuadro 3.5
Coefficientes de correlación de rangos de Kendall

	<i>Población total, 2005</i>	<i>Población ocupada, 2003</i>	<i>Valor agregado de la producción, 2003</i>
Población total, 2005	N.A.	0.955	0.939
Población ocupada, 2003	0.955	N.A.	0.95
Valor agregado de la producción, 2003	0.939	0.95	N.A.

Población ocupada vs valor agregado

Para este caso, el coeficiente de correlación de *Spearman* tiene un valor de 0.813, que muestra una *mayor similitud* entre las jerarquías derivadas de la *población ocupada* y el *valor agregado* que en el caso de las jerarquías de población total y valor agregado, pero menor al caso de la jerarquía entre población total y población ocupada (Cuadro 3.4). Por su parte, el coeficiente de *Kendall* llega a 0.950, que es muy similar al de la correlación entre las jerarquías de población total y población ocupada (que fue de 0.955) y ligeramente mayor al que se

registró al correlacionar las jerarquías basadas en la población total y el valor agregado (0.939) (Cuadro 3.5).

Las variaciones del coeficiente de correlación de *Spearman* muestran que este indicador es más *sensible* a los cambios de posiciones de las ciudades en las diferentes jerarquías, porque *privilegia y le da más pesos a los cambios mayores en las posiciones de las ciudades*. En cambio, el coeficiente de *Kendall* parece más confiable, en este análisis, porque pone mayor atención a *todos los cambios de posición de las ciudades* en las diferentes jerarquías. De cualquier manera, la conclusión del análisis estadístico es que las jerarquías analizadas son *razonablemente similares entre sí*, por lo que se podría utilizar cualquiera de las tres variables consideradas (*población total, población ocupada o valor agregado*) para definir la jerarquía de ciudades.

3.2.5. Las ventajas de utilizar la población total como variable para definir la jerarquía urbana

Como se observó en el análisis de correlaciones de rango de tipo *Spearman* y *Kendall* para las jerarquías urbanas consideradas en este capítulo: *no existen variaciones totales altamente significativas*. Esto indica, en principio, que se podría utilizar cualquiera de las variables que definieron las jerarquías evaluadas: población total, población ocupada o valor agregado de la producción. Sin embargo, en este trabajo se *prefiere* utilizar el indicador de *población total* por las razones que se exponen a continuación.

En primer lugar, la contabilidad de la población total es mucho *más clara* que la de la población ocupada y que la del valor agregado de la producción. Estas dos últimas variables dependen de ciertos *criterios normativos* del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) no totalmente aceptados. El primero, por ejemplo, depende totalmente de lo que signifique *estar ocupado*, mientras que el segundo asigna *espacialmente* el dato del valor agregado de la producción de una manera que puede distorsionar la imagen económica del conjunto de ciudades del país. Un ejemplo muy claro de esto es Ciudad del Carmen: si se considera sólo el valor agregado de la producción, resulta más importante que las ZM de Monterrey y Guadalajara, debido a su *producción petrolera*, pero no por su *variedad de oferta de bienes y servicios*.

El segundo argumento es tan importante o más que el primero: la población total tiene una relación *directa* con la oferta de bienes y servicios urbanos. Esto lo demuestra *conceptualmente* la teoría de lugar central (TLC) (Christaller,

1966), así como *empíricamente*, para diversos países en desarrollo: Rondinelli y Shabbir (1988), y para México: Garrocho (1990) (Figura 3.2).

Por lo tanto, tomando en cuenta los argumentos anteriores y el principal propósito de develar la estructura funcional de la red de ciudades de México establecido desde el Capítulo 2 de este trabajo ("*apoyar las decisiones de inversiones públicas y privadas, en términos de su escala y localización espacial, sectorial y temporal...*"), lo más apropiado en el contexto de este análisis es considerar la variable *población total* como el indicador más sólido para definir la *jerarquía de ciudades* de México.

Una vez resuelto el problema de *establecer la variable* que se va a utilizar para definir la jerarquía de la red urbana de México, corresponde precisar operativamente los componentes del *modelo de interacción espacial* con el que se van a cuantificar las relaciones entre las ciudades de la red nacional de ciudades.

3.3. Componentes para construir el modelo de interacción espacial

Los componentes de un modelo de interacción espacial como el que se utilizará en este trabajo son los siguientes: *i.* atractividad de los destinos; *ii.* población que se puede mover desde los orígenes (llamada *masa*);⁷ *iii.* costos de transporte, y *iv.* fricción de la distancia. En los apartados siguientes se justifica la manera como se estimarán operativamente cada uno de ellos.

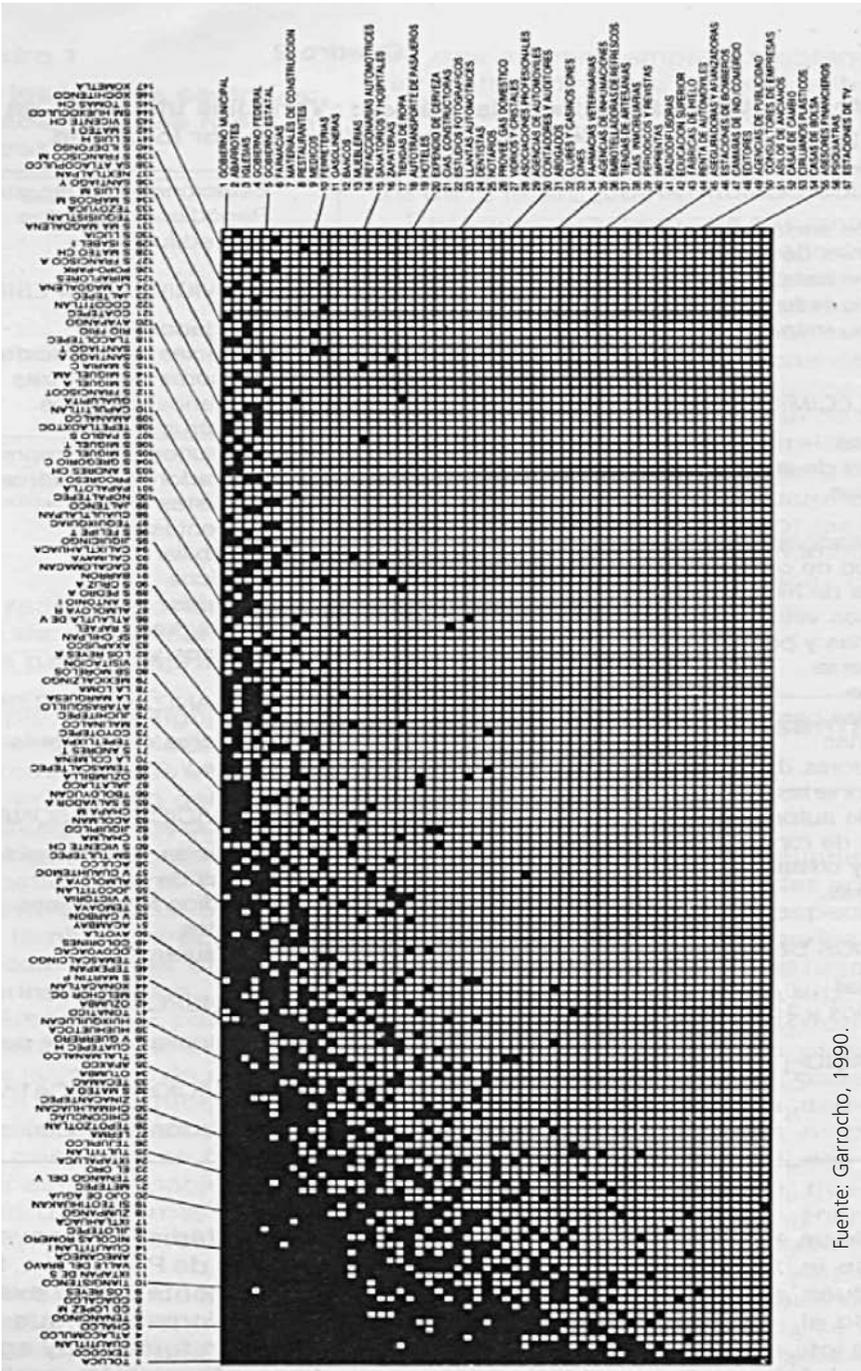
3.3.1. Atractividad de los destinos

Los modelos de interacción espacial se fundamentan en un principio muy sencillo, pero comprobable conceptual y empíricamente (como se explicó en el Capítulo 2): "*La intensidad de los flujos entre ciudades son directamente proporcionales a la atractividad y a la masa de cada una de ellas, e inversamente proporcionales a los costos de transporte que las separan*".

La *atractividad* de los destinos depende de su *oferta de bienes y servicios*, y por tanto está fuertemente vinculada a la *jerarquía* de las redes de ciudades, tal como lo explica la TLC (véase Capítulo 2). De acuerdo con la TLC, los asentamientos ofrecen todos los *bienes y servicios* propios de su nivel en la jerarquía

⁷ Por *masa* se entiende lo que puede viajar de una ciudad a otra: población, llamadas telefónicas y autotransportes, por mencionar algunos ejemplos.

Figura 3.2 Escalograma de actividades, Estado de México, 1990



Fuente: Garrocho, 1990.

urbana, más todos aquellos que ofrecen los asentamientos que están en los niveles inferiores de la jerarquía. Este principio está respaldado sólidamente por claras evidencias empíricas alrededor del mundo (Rondinelli y Shabbir, 1988; y para México: Garrocho, 1990) (Figura 3.2).

El indicador de *población total* es particularmente *útil* cuando se manejan asentamientos pequeños, para los cuales no existe mucha información estadística. Sin embargo, en este trabajo todas las ciudades consideradas cuentan con *información económica básica* que se puede utilizar para definir un mejor *indicador de atractividad*.⁸

Así las cosas, se debe destacar que para este trabajo se dispone del indicador de *población ocupada*, que tiene un sugestivo *componente económico* vinculado *directamente* con la magnitud de la *oferta de bienes y servicios* clave para el desarrollo social, y altamente correlacionado con la *población total* de cada asentamiento. El *coeficiente de correlación* (R^2) entre población ocupada y población total para el conjunto de las 358 ciudades del país definidas por el Conapo en 2010 es de 0.995.

Por lo tanto:

- i. Dado que el tamaño de la *población total* de cada asentamiento se relaciona directamente con su *oferta de bienes y servicios*, y en consecuencia con su *atractividad*.
- ii. La *población total* está *altamente correlacionada* con la *población ocupada* en el conjunto de ciudades bajo análisis, pero además implica un componente económico, *conceptualmente más sólidamente* vinculado a la oferta de bienes y servicios (es decir a la *atractividad*) de cada asentamiento que la *población total*.
- iii. En este trabajo se tomó la decisión de utilizar la variable *población ocupada* para cuantificar *operativamente* la *atractividad* de cada asentamiento. Así: *a mayor población ocupada mayor atractividad de las ciudades, y viceversa*.

3.3.2. Población que se puede mover desde los orígenes

En este trabajo se utiliza la *población total* de los asentamientos, como la *masa* que se puede mover *desde cada ciudad de origen*. Esto se justifica plenamente

⁸ Tanto las 86 ciudades (Imco, 2010) utilizadas para realizar los experimentos que están permitiendo definir la manera de *estimar operativamente* las variables del modelo de interacción espacial que se instrumenta en el Capítulo 4, como las 358 que integran el conjunto urbano nacional definido por el Conapo, que son para las que se corre el modelo de interacción espacial en el mismo Capítulo 4.

si se revisan los objetivos que se buscan alcanzar al definir la red de ciudades de México (véase la sección “Premisas centrales” al principio del Capítulo 2, y la introducción de este capítulo). No hay nada más que añadir en este tema.

3.3.3. Costos de transporte

Los costos de transporte son un tema central de investigación porque es una de las principales estrategias para sintetizar la dimensión espacial del análisis geográfico. Los costos de transporte son extremadamente complejos de estimar con precisión, tal como lo han demostrado Fotheringham, Brunsdon y Charlton (2000), Fujita, Krugman y Venables (1999), Fujita y Thisse (2002), Krugman (1991), Moseley (1979), Pellegrini y Fotheringham (2002), Rushton (1987) y Whitelegg (1982), entre muchos otros.

Se sabe que los *costos de transporte* están relacionados con la *distancia* que se recorre (especialmente si se consideran incomodidades, tiempo, riesgo, entre otras variables). Esto es particularmente acertado para los *recorridos terrestres* (Lloyd y Dicken, 1990; Esparza y Krmeneč, 2000; Garrocho, 1995a; Garrocho, Chávez y Álvarez, 2003). Por esta razón, en numerosos estudios geográficos se utiliza la distancia como un indicador muy aproximado (por eso llamado: indicador *proxy*) de los costos de transporte. Esto hace que sea casi obligatorio probar la distancia como un indicador *proxy* para estimar *operativamente* los costos de transporte.

Ahora bien, por razones de eficiencia, la mayoría de los investigadores que utilizan la distancia como indicador de los costos de transporte terrestres, usan *distancias lineales* entre pares de asentamientos (llamadas también “*distancias a vuelo de pájaro*”) (Fotheringham y O’Kelly, 1989). Esto constituye una *salida metodológica aceptable* a escala nacional o regional, pero no es *deseable* a escala *intraurbana*. Al interior de las ciudades la diferencia entre medir la distancia en *línea recta* o *a lo largo de las vialidades* puede ser crucial en muchos análisis. Esto se ha demostrado para varios países (Lu y Chen, 2006; Okabe y Yamada, 2001; Yamada y Thill, 2004), incluido México (Garrocho y Álvarez, 2010; Garrocho, Álvarez y Chávez, 2011).

Pero este trabajo no es de escala intraurbana, sino de escala nacional y regional. Por lo tanto, es posible utilizar las *distancias lineales* entre pares de ciudades como indicador de los *costos de transporte*. No obstante, se *prueban* tres indicadores de distancia adicionales para *evaluar sus relaciones estadísticas* y apoyar la toma de la decisión acerca de qué indicador de *costos de transporte*

es el más *conveniente* y el *posible* de usar en este trabajo. Estos indicadores son: *distancia* por carretera (medida en kilómetros), *tiempo* de recorrido por carretera (medido en horas y minutos) y *costo* de transporte por carretera (estimado como la suma del costo de la gasolina por kilómetro de un automóvil de cuatro cilindros más el gasto de las casetas existentes en la ruta).⁹

Cabe mencionar que estimar la *distancia lineal* entre pares de ciudades es muy rápido e implica un *costo muy bajo* (en dinero, tiempo, esfuerzo) si se utiliza un sistema de información geográfica. Sin embargo, los costos de transporte medidos como *distancias a través de la red carretera* o como *tiempo* o *costo de recorrido* por la red carretera son muy altos y *complicados* de medir. Especialmente porque se deben identificar los *recorridos mínimos* entre pares de ciudades. Esto parece sencillo si se consideran unas cuantas ciudades, pero resulta altamente complejo si la cantidad de ciudades rebasa un par de decenas, y es una tarea prácticamente imposible de realizar sin apoyo de *software* especializado si el número de ciudades es de varias centenas, como en este trabajo (el conjunto urbano nacional definido por el Conapo es de 358 ciudades: véase Capítulo 4).¹⁰

Correlaciones entre los indicadores de costos de transporte

Los coeficientes de correlación de *Pearson* entre los indicadores de distancia son diferenciados (Cuadro 3.6). El más elevado es entre la distancia medida en *kilómetros* y la distancia medida en *tiempo* de recorrido, que es 0.985, lo que indica que prácticamente es igual utilizar una u otra variable como indicador *proxy* de los costos de transporte. Por su parte, el coeficiente de correlación entre la distancia medida en *kilómetros* y en *costo* (gasolina más casetas) es más bajo: llega sólo a 0.720. La relación entre los indicadores de *costo* de transporte es aún menor cuando se comparan las distancias medidas en *tiempo* y en *costo*

⁹ La distancia por carretera (medida en kilómetros) y el tiempo de recorrido por carretera (medido en horas y minutos) se tomó de la página de Internet de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes: <http://aplicaciones4.sct.gob.mx/sibuac_internet/ControllerUI?action=cmdEscogeRuta>. El costo de la gasolina se estimó considerando que el rendimiento promedio de un automóvil de cuatro cilindros en carretera es de 10 kilómetros por litro y que el precio de la gasolina es el promedio entre la gasolina Premium y la Magna al día 28 de noviembre de 2010. Así: Gasto en gasolina = (distancia recorrida/10) * (precio promedio del litro de gasolina).

¹⁰ El *software* utilizado se desarrolló especialmente para este trabajo en el Laboratorio de Análisis Espacial de El Colegio Mexiquense. En su estado actual, esta versión es *poco amigable* y tiene como antecedente la que se presenta en Garrocho, Chávez y Álvarez, 2003.

(0.646), y los coeficientes más bajos son entre la distancia medida en *línea recta* y las otras tres maneras de medir la distancia (varía de 0.590 a 0.650).

Cuadro 3.6

Matriz de correlación entre los indicadores de costos de transporte^a

	<i>Km</i>	<i>Tiempo</i>	<i>\$</i>	<i>Lineal</i>
Km	N.A.	0.985	0.720	0.65
Tiempo	0.985	N.A.	0.646	0.61
\$	0.720	0.646	N.A.	0.59
Lineal	0.650	0.610	0.590	N.A.

^a. Los indicadores son: distancia medida en kilómetros por carretera (km); distancia medida en tiempo de recorrido por carretera (tiempo); distancia de recorrido por carretera medida en costo (costo de gasolina más casetas), y distancia en línea recta (“a vuelo de pájaro”: lineal).

Los resultados de las correlaciones estadísticas entre los diferentes indicadores *proxy* de *costos de transporte* basados en diferentes medidas de distancia muestran dos cosas relevantes: *i.* los indicadores de *kilómetros* de recorrido por carretera y *tiempo* de recorrido por carretera son prácticamente iguales, por lo que se puede utilizar uno u otro, y *ii.* los demás indicadores muestran coeficientes de correlación menores a 0.750, lo que sugiere que podrían generar *resultados diferenciados* al instrumentarse en un modelo de interacción espacial. Sin embargo, esto es sólo una *hipótesis sujeta a comprobación empírica*, porque en el modelo participan otros elementos que podrían atenuar las diferencias de los flujos interurbanos (el *parámetro de la fricción de la distancia* y los indicadores de *atractividad* y *masa*). Para poner a prueba esta hipótesis, en la sección 3.4 de este capítulo se corre un modelo de interacción espacial decenas de veces utilizando los *cuatro indicadores de distancia* para evaluar las diferencias en los flujos interurbanos que genera cada indicador, esto con el fin de tener una conclusión *más sólida* sobre las implicaciones de utilizar uno u otro.

3.3.4. Parámetro de la fricción de la distancia

El parámetro de la *fricción de la distancia* expresa la *sensibilidad* de los consumidores a los *costos de transporte* y es, de alguna manera, equivalente al concepto de *alcance de un bien* de la TLC, que se analizó en el Capítulo 2. Así, mientras más alto sea el parámetro de la fricción de la distancia, significa que los consumidores son más *sensibles* a los costos de transporte, y viceversa.

Por ejemplo, un parámetro igual a *ceró* significa que los consumidores son *indiferentes* a los costos de transporte (es decir: que les da exactamente lo mismo acudir al asentamiento más cercano o al más lejano), mientras que si el parámetro toma un valor que tienda a *infinito* significará que los consumidores son tan sensibles a los costos de transporte que sólo acudirán al asentamiento más cercano. Esto se explicó en gran detalle en el Capítulo 2 y resulta *crucial* entenderlo correctamente, porque éste es el momento de comenzar a aplicarlo de manera *operativa*.

Hay dos maneras principales de aplicar el parámetro de la fricción de la distancia en modelos de interacción espacial orientados al análisis de redes de ciudades: *i.* definir un parámetro *para cada* ciudad de origen, y *ii.* definir un parámetro *promedio para toda* la red de ciudades. Se recomienda la primera opción cuando se tiene *información detallada* de los flujos *observados* entre ciudades o regiones (*i.e.*, estados), aunque es más compleja de instrumentar. Un ejemplo para México de la aplicación de este tipo de estrategia se puede ver en el trabajo de Garrocho (1996), que construyó 32 modelos de interacción espacial (uno para cada entidad federativa) *encadenados* y *funcionando simultáneamente*, con el propósito de simular los flujos migratorios interestatales a escala nacional. Los valores de los 32 parámetros de la fricción de la distancia se *calibraron* comparando los flujos migratorios *observados* (registrados en el censo) y los flujos migratorios *calculados* por los 32 modelos *encadenados*, hasta encontrar el *mejor ajuste* (el *mínimo error promedio estándar*) (Garrocho, Chávez y Álvarez, 2003). En este trabajo no es posible aplicar este método porque no se dispone de información detallada acerca de los flujos observados de consumidores (*movilidad por consumo*) entre las ciudades del país.

La segunda opción, definir un *parámetro promedio* para toda la red de ciudades, es la que se utilizó en el estudio del Conapo de 1991. Sin embargo, en ese estudio no se reporta el valor que se utilizó finalmente al instrumentar el modelo *gravitacional simple* con el que se definieron ciertas interacciones entre ciudades.¹¹

Las experiencias que existen en nuestro país de aplicaciones de modelos de interacción espacial al análisis de redes de ciudades no otorgan ninguna pista sobre el valor que puede tomar el parámetro de la fricción de la distancia para

¹¹ Los modelos gravitacionales simples tienen muchas limitaciones conceptuales, por lo que es mucho mejor utilizar modelos de interacción espacial como el que se utiliza en este trabajo. Detalles al respecto se pueden ver en Garrocho, 2005. De cualquier manera, cabe mencionar que los modelos gravitacionales simples se siguen utilizando en la actualidad; véase, por ejemplo: Krings *et al.*, 2009.

este trabajo. Garrocho (1996) utilizó un modelo complejo con *tres parámetros* (uno para los *costos de transporte*, otro para el *indicador de atractividad* y uno más para el indicador de la *masa* que se puede mover entre las ciudades), debido a que contaba con información desagregada y precisa sobre los flujos migratorios interestatales. En ese estudio, los valores de los 32 parámetros de la fricción de la distancia variaron entre -0.49 y -0.99, pero no se pueden tomar como base para el presente trabajo porque aquí sólo se puede utilizar un modelo con *un solo parámetro promedio* de la fricción de la distancia. El estudio del Conapo de 1991 sería más útil para este trabajo, en términos de derivar un valor del parámetro de la fricción de la distancia, porque utiliza también un solo parámetro promedio, pero dos razones impiden tomarlo como antecedente: *i.* el modelo que se utilizó en ese estudio fue *demasiado simple* (un *modelo gravitacional* tipo Reilly, 1931), y *ii.* el estudio no reporta el valor del parámetro promedio que finalmente se utilizó.

Así las cosas, no hay otra alternativa que intentar apoyarse en valores utilizados en estudios internacionales. Por ejemplo, en el estudio migratorio de Shen (1999), los parámetros calibrados para un modelo *gravitacional simple* se localizaron en un rango de -1.10 a -1.24. Lee (2001) calibró un modelo de interacción espacial de flujos migratorios entre 48 estados de la Unión Americana y obtuvo un parámetro global de -0.140, mientras que los valores de los parámetros para cada estado de origen variaron de -0.06 hasta alrededor de -3.0.¹² Otro estudio sobre flujos migratorios en los Estados Unidos reporta un parámetro global de -0.704 (Yongwan, 2007). Por su parte, Graham, Gibbons y Martin (2009) estimaron un parámetro de -1.8 para las actividades terciarias en Inglaterra, pero un metanálisis reciente sobre parámetros de la fricción de la distancia aplicados a modelos de comercio internacional reporta un rango de variación promedio de entre -0.28 y -1.55 (con un valor promedio de -0.9) (Disdier y Head, 2008).

A escala intranacional se han estimado parámetros similares, y a escala intraestatal, en los Estados Unidos, los parámetros van de -0.77 a -0.81 (Wolf, 2000) y de -0.8 a -1.2 (Brown y Anderson, 2002) entre las provincias de Canadá y entre estados de la Unión Americana.

Para viajes al trabajo (*commuting*) en los Estados Unidos, Fotheringham (1981) reporta un rango de valores para los parámetros de la fricción de la distancia que va de -0.5 a -3.0, dependiendo de los propósitos de viaje y del

¹² Lee (2001) no presenta este último valor, pero se puede deducir de algunos valores que presenta a lo largo del artículo y del valor promedio del parámetro que sí reporta.

área de estudio, y Vries *et al.* (2004) estiman para los viajes al trabajo en Dinamarca un parámetro promedio de alrededor de -2.0. También para viajes al trabajo, en el Reino Unido, Coombes y Raybould (2001) reportan un parámetro promedio de -1.5.

Como se puede observar, los valores de los parámetros de la fricción de la distancia no pueden ser directamente comparados entre sí, porque dependen de la *configuración espacial de las redes de ciudades* (la localización de cada ciudad respecto a las demás), del *tipo de flujo* analizado, de la *escala geográfica* de la región de estudio (internacional, nacional, estatal, urbana) y del método utilizado para la *calibración* (Itoh, 1987). En resumen, la literatura ofrece un amplio rango de valores para el parámetro de la fricción de la distancia, pero que dependen en gran medida del contexto en el que fueron estimados. Por lo tanto, no se puede derivar una conclusión sólida acerca de sus valores más apropiados o sobre sus rangos de variación (al respecto, véase Graham, Gibbons y Martin, 2009).

Así, para las corridas experimentales del modelo de interacción espacial que se presentan en la siguiente sección se utilizan tres valores para el parámetro de la fricción de la distancia: -1.0, -2.5 y -5.0, con el fin de analizar las diferencias en los patrones de flujos que resultan de aplicar cada uno de estos valores.

Sin embargo, para el ejercicio con las 358 ciudades definidas por Conapo, el parámetro de la fricción de la distancia será igual a -1.5. Este valor se establece a partir de los valores que reporta Garrocho (1966; recordar que los valores en ese estudio se localizaron entre -0.49 y -0.99), que son los únicos disponibles para nuestro país a escala nacional, aunque el valor utilizado en este estudio se incrementa debido a que: *i.* en este trabajo se consideran flujos de *consumidores* de bienes y servicios, que son más sensibles a los costos de transporte que los flujos de *migración* (que son los que analizan en Garrocho, 1996), y *ii.* en el modelo que se aplicará a las 358 ciudades se utilizará un sólo *parámetro*, (mientras que Garrocho utilizó tres parámetros de manera simultánea).

Se debe reconocer que no existen pruebas de que el valor asignado en este trabajo al parámetro de la fricción de la distancia (igual a -1.5) sea el más adecuado. Es más, de inicio *se debe suponer que no lo es*, pero parece ser un valor razonable para el parámetro. Sin información de campo o contrafactual para estimarlo es lo más que se puede hacer en estos momentos.

3.4. Corridas experimentales para definir operativamente cada componente del modelo de interacción espacial

Se realizaron más de doscientas corridas del modelo de interacción espacial para probar las diferencias y los impactos en la distribución de flujos, de acuerdo con: *i.* 17 indicadores de atractividad; *ii.* cuatro medidas de los costos de transporte (kilómetros, tiempo, costo y distancia lineal), y *iii.* tres parámetros de la fricción de la distancia (-1.0, -2.5 y -5.0; incluso en algunos ejercicios se utilizó un parámetro igual a -50.0 para simular una tendencia del parámetro a infinito). No obstante, en esta sección sólo se presentan las comparaciones de 12 de esas corridas: *i.* las que involucran a la *población ocupada por ciudad*, que *conceptualmente* es uno de los mejores índices de atractividad y que *numéricamente* estuvo disponible para este trabajo (la justificación se presenta en la sección 3.1 de este capítulo); *ii.* las que utilizaron como medida de los costos de transporte la distancia carretera en kilómetros (que tiene una alta correlación con el tiempo de recorrido), y *iii.* las que utilizaron tres valores para el *parámetro de la fricción de la distancia* (-1.0, -2.5 y -5.0), con la finalidad de evaluar la *sensibilidad* del modelo ante cambios en los valores de este parámetro. La justificación de utilizar estos valores *experimentales* se presenta en la sección 3.4 de este capítulo.

Los *índices de atractividad* por ciudad utilizados en los resultados de las corridas experimentales que se presentan fueron:

- i.* *Población ocupada*, que es el indicador más convencional.
- ii.* *Población ocupada multiplicada por el índice de competitividad* del Imco (2010), para intentar incorporar el efecto de la competitividad de cada ciudad, que se pensó que podría ser importante en la atracción de flujos interurbanos.
- iii.* *Población ocupada multiplicada por la percepción de la seguridad* (Imco, 2010), que también se consideró que podría ser un elemento importante para *animar o inhibir* la atracción de flujos de consumidores, especialmente en los tiempos actuales.

3.4.1. Correlación entre los resultados del modelo utilizando cuatro indicadores proxy de costos de transporte

Las correlaciones entre los resultados del modelo cuando se midieron los costos de transporte en unidades *métricas* de recorrido carretero (kilómetros), *tempo-*

rales (tiempos de recorrido carretero), *monetarias* (costo de recorrido carretero) y *lineales* fueron muy diferenciadas. La más alta se registró entre los resultados del modelo cuando se midieron los costos de transporte en *unidades monetarias* y *temporales* (0.977), pero bajó notablemente cuando se correlacionaron los resultados midiendo los costos de transporte en *unidades métricas* y *costo* (0.540) y en *unidades métricas* y *temporales* (0.497). Los coeficientes de correlación son bajos y varían ligeramente cuando se utilizan *distancias lineales* (0.676 con distancias métricas, 0.592 con unidades monetarias, y 0.575 con unidades temporales) (Cuadro 3.7).

Sin embargo, lo realmente destacable es que no importa cuál de estos indicadores *proxy* de los costos de transporte se utilice, las asociaciones interurbanas (entre *ciudades nodales* y *ciudades vinculadas*, que son las que se conectan con las *nodales*) no cambiaron en *ningún caso*. Es decir, *la estructura de la red se mantuvo en las corridas experimentales*, lo que cambió fue la intensidad de flujos que se registró en cada celda de la matriz. Se debe recordar que una matriz de 86 por 86 tiene 3 526 celdas con valores diferentes.¹³

Cuadro 3.7
Correlaciones de los resultados del modelo de interacción espacial
al utilizar cuatro indicadores *proxy* de costos de transporte
(fricción de la distancia = 2.5)

	<i>Km</i>	<i>\$</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Lineal</i>
<i>Km</i>	1.000			
<i>\$</i>	0.540	1.000		
<i>Tiempo</i>	0.497	0.977	1.000	
<i>Lineal</i>	0.676	0.592	0.575	1.000

Así las cosas, se decidió utilizar en el análisis empírico del siguiente capítulo, las *distancias lineales* para el conjunto de ciudades definidas por el Conapo (2010a) por las siguientes razones: *i.* no existen resultados de investigación y por lo tanto no se sabe con certeza cuál indicador de costos de transporte a escala nacional

¹³ El cálculo es como sigue:

$$((86 \text{ celdas} \times 86 \text{ celdas}) / 2 \text{ porque en este caso la matriz es simétrica}) - (86 \text{ que son las celdas de la diagonal de la matriz}) = 3\,612 \text{ celdas diferentes.}$$

Para el caso del ejercicio con las 358 ciudades del país definidas por el Conapo se tendrán 63 724 casillas con valores distintos.

y subnacional es el que mejor refleja las *percepciones* de los costos de transporte por parte de los consumidores de México (y de sus diferentes regiones); *ii.* ninguno de los indicadores *proxy* de costos de transporte cambió la *estructura funcional* de la red de ciudades; *iii.* la distancia lineal es mucho *menos costosa* de estimar y requiere *menos tiempo* que las otras alternativas, y *iv.* la distancia lineal es la más utilizada en el *contexto internacional* como indicador *proxy* de los costos de transporte en estudios de escala nacional y subnacional, lo que facilitará, eventualmente, hacer comparaciones.

En conclusión: mientras no se disponga de estudios sobre las percepciones de los costos de transporte de los consumidores y de *software* especializado que permita traducirlo en indicadores métricos, monetarios o temporales con suficiente confianza, lo más seguro, en términos metodológicos, es utilizar *distancias lineales* como indicador *proxy* de los costos de transporte.

3.4.2. La influencia del parámetro de la fricción de la distancia

El parámetro de la fricción de la distancia tiene un impacto muy importante en la distribución de los flujos interurbanos. Como se explicó en el Capítulo 2, mientras más alto el valor del parámetro, mayor será la *sensibilidad* de los consumidores a los costos de transporte y menor su *propensión* a realizar viajes de larga distancia.

Esta situación se observa en el Cuadro 3.8, que presenta los coeficientes de correlación de *Pearson* para los flujos que genera cada corrida del modelo con parámetros de fricción de la distancia *distintos*. Por ejemplo, al comparar el comportamiento de los flujos usando como indicador de atractividad la *población ocupada*, es evidente que mientras más sube el valor del parámetro de la fricción de la distancia, los coeficientes de correlación entre los patrones de flujos bajan: es de 0.770 al comparar los patrones resultantes de aplicar los parámetros 1.0 y 2.5, y se reduce a 0.670 cuando se comparan los resultados de aplicar los parámetros 1.0 y 5.0 (Cuadro 3.8). Lo mismo ocurre cuando se aplican los parámetros 1.0, 2.5, 5.0 y 50.0 (este valor representa una coeficiente que *tiende a infinito*), lo que genera coeficientes de correlación altamente diferenciados (Cuadro 3.9).

3.4.3. Intento de mejora del indicador de atractividad

Confirmado el efecto importante del coeficiente de la fricción de la distancia, corresponde ver si es posible *mejorar* el indicador de atractividad con la infor-

mación disponible. Es decir, si se pueden incorporar otras variables que lo hagan más *útil* en términos de simulación de escenarios, pronósticos y evaluación *ex ante* de políticas públicas y privadas (que es uno de los propósitos centrales en este trabajo al definir la red de ciudades de México).

Cuadro 3.8
Coefficientes de correlaciones de *Pearson* para diferentes patrones de flujos del modelo de interacción espacial^a

	<i>POBOCUP</i> <i>FD = 1.0</i>	<i>POBOCUP</i> <i>FD = 2.5</i>	<i>POBOCUP</i> <i>FD = 5.0</i>
POBOCUP FD = 1.0	N.A.	0.77	0.67
(POBOCUP * COMP) FD = 1.0	0.999	0.999	1.00
(POBOCUP * INSEG) FD = 1.0	0.329	0.450	0.75
(POBOCUP * COMP) FD = 2.5	N.A.	0.999	N.A.
(POBOCUP * INSEG) FD = 2.5	N.A.	0.446	N.A.
(POBOCUP * COMP) FD = 5.0	N.A.	NA	1.00
(POBOCUP * INSEG) FD = 5.0	N.A.	NA	0.75

^a POBOCUP = Población ocupada en 2003; COMP = Índice de competitividad urbana del Imco, 2010; INSEG = Percepción de la seguridad en cada ciudad, Imco (2010); FD = Parámetro de fricción de la distancia; N.A. = No aplica, porque son correlaciones que no se pueden comparar por utilizar coeficientes de fricción de la distancia diferentes, por ser entre indicadores iguales o por repetirse en la matriz.

Cuando se usa como indicador de atractividad la población ocupada multiplicada por el índice de competitividad del Imco (Imco, 2010), los resultados del modelo de interacción espacial no cambian gran cosa. Los coeficientes de correlación resultantes entre los patrones de flujos son muy elevados (cercaos a 1.0), sin importar qué parámetro de fricción de la distancia se utilice (Cuadro 3.7). La razón es que el índice de competitividad del Imco está estandarizado y su rango de variación es reducido. Salvo una ciudad que tiene un índice de 37.02 (Tuxtepec), las demás registran valores de entre 40.5 y 59.1, y 60% de las ciudades tienen índices de entre 40.5 y 59.1. Esto se refleja en su valor promedio, que es 49.7, y su reducida desviación estándar, que es igual a 4.8. Por lo tanto, el índice de competitividad no altera significativamente las diferencias entre la atractividad

de las ciudades. Esto ocurre con cualquier variable que se utilice como indicador de atractividad en conjunto con el indicador de competitividad del Imco, y con cualquier transformación que se le haga al índice de competitividad del Imco (logaritmo base diez, logaritmo base e, valores transformados en *z-scores* y otras).

Cuadro 3.9
Coefficientes de correlaciones de *Pearson* para diferentes patrones de flujos del modelo de interacción espacial utilizando un mismo indicador de atractividad y distintos parámetros de la fricción de la distancia^a

	<i>POBOCUP * SEG</i> FD = 1.0	<i>POBOCUP * SEG</i> FD = 2.5	<i>POBOCUP * SEG</i> FD = 5.0	<i>POBOCUP * SEG</i> FD = 50.0
<i>POBOCUP * SEG</i> FD = 1.0	1.000	0.659	0.241	0.004
<i>POBOCUP * SEG</i> FD = 2.5	N.A.	1.000	0.677	0.106
<i>POBOCUP * SEG</i> FD = 5.0	N.A.	N.A.	1.000	0.538
<i>POBOCUP * SEG</i> FD = 50.0	N.A.	N.A.	N.A.	1.000

^a *POBOCUP * SEG* = Población ocupada en 2003 multiplicada por la percepción de la seguridad en cada ciudad; FD = Parámetro de la fricción de la distancia; N.A. = No aplica para no repetir los valores de los coeficientes de correlación (la matriz es simétrica).

La conclusión es que el índice de competitividad del Imco *no resulta útil* para mejorar el elemento de atractividad del modelo de interacción espacial, porque sus valores son muy similares y no genera resultados diferentes a los que se producen si se utiliza sólo la variable *población ocupada*. En otras palabras: utilizar el índice de competitividad del Imco es *redundante y no añade valor* al modelo de interacción espacial.

Sin embargo, en la construcción de su índice de competitividad, el Imco incorporó una variable que resulta relevante para la construcción del modelo de interacción espacial, dados los propósitos de este trabajo.¹⁴ Esta variable es

¹⁴ Cabe recordar, una vez más, el propósito de este trabajo (véanse Capítulo 2 e inicio de este capítulo): "En este trabajo se asume un propósito de política orientado a apoyar las decisiones de inversiones públicas y privadas, en términos de su escala y localización espacial, sectorial y temporal, de ajustar la distribución espacial de la población de acuerdo con las potencialidades de la red de ciudades, de integrar más eficazmente el territorio y de simular escenarios que permitan evaluar *ex ante* decisiones de política e inversión. Por lo tanto, las interacciones urbanas que *resultan centrales* para este trabajo son las que se *derivan de la movilidad de bienes, servicios y consumidores en el territorio*".

la *percepción* que tiene la población sobre la *seguridad* en su ciudad, que es particularmente importante en estos tiempos. Sin embargo, esta variable recabada por el Imco (2010) registra un rango de variación quizá demasiado alto, y mientras más elevado el valor del indicador mejor es la percepción que tienen los ciudadanos sobre la seguridad de su ciudad. Los valores de la *percepción de la seguridad* van desde un mínimo de 1.0 (Mazatlán) hasta un máximo de 100.0 (para Manzanillo y la zona metropolitana de Tecomán). El promedio de esta variable es 20.4 y su desviación estándar es 51.1 (más de dos veces el valor de la media), lo que refleja el vasto rango de variación de la percepción de la seguridad en las ciudades consideradas en el estudio del Imco.

Cuando se afecta la variable de atractividad urbana (*población ocupada*) por la *percepción de la seguridad*, los resultados del modelo de interacción espacial son diferentes que si se usara *solamente* la variable población ocupada. Los coeficientes de correlación son 0.329, 0.446 y 0.750 cuando se aplican parámetros de fricción de la distancia de 1.0, 2.5 y 5.0 respectivamente (Cuadro 3.8).

Por lo tanto se puede concluir, de manera preliminar, que el indicador de atractividad que resulta de multiplicar la población ocupada por la percepción de la seguridad en cada ciudad *podría* añadir valor al modelo. El problema es que el índice de percepción de seguridad del Imco no parece muy consistente y varía de 1.0 a 100.0, lo que “castiga” demasiado a ciertas ciudades como Mazatlán (que registra el valor mínimo de percepción: igual a 1.0), y provoca que al final algunas ciudades resulten incapaces de atraer flujos de consumidores, lo cual *no es realista*. La lección es que el indicador de atractividad debe construirse con variables sólidas que efectivamente midan la capacidad de atracción de flujos y que sean estimadas en unidades adecuadas.

En este tema, vale referirse a una experiencia para México de un indicador de atractividad multivariado que resultó relativamente exitoso. Garrocho (1996) construye un indicador de *atractividad de flujos migratorios* de la siguiente manera:

W_j = Índice de atractividad migratoria de cada entidad federativa

$$W_j = W_{jo} * W_{js}$$

Donde:

$$W_{jo} = \text{Atractividad migratoria objetiva} = (E_t / E_{(t-1)}) * (S_{ij}) * (\log E_t)$$

Donde:

$E_{(t-1)}$ = Empleo en el estado j en el año $t-1$

E_t = Empleo en el estado j en el año t

S_{ij} = Diferencias entre las remuneraciones medias anuales entre el estado de origen i y el destino j

$S_{ij} = RMA_j / RAM_i$

Donde:

RAM_j = Remuneración media anual en j

RAM_i = Remuneración media anual en i

W_{js} = Atractividad migratoria *subjectiva*. Su valor se define endógenamente en el modelo, de manera iterativa.

El diseño de este índice de atractividad (W_j) es interesante porque integra tres elementos diferenciados que son importantes para el análisis migratorio: *i.* el *dinamismo del empleo*: $E_t / E_{(t-1)}$; *ii.* la *calidad del empleo*: S_j , y *iii.* la *magnitud del empleo*: $\log E_t$. La razón de utilizar el logaritmo del empleo total se deriva del supuesto de que la *atractividad* de la magnitud del empleo aumenta menos que proporcionalmente, lo cual se comprobó empíricamente. Sin embargo, la construcción de indicadores de atractividad *multivariados* requiere la disponibilidad de datos de los *flujos observados* para calibrar la construcción del indicador.

En el trabajo que aquí nos ocupa, no se dispone de *flujos observados* de consumidores entre ciudades. Así, lo más adecuado y *seguro* (en términos metodológicos) es utilizar un indicador de atractividad *simple* (*univariado*) que permita monitorear claramente y con *sencillez*, los resultados del modelo de interacción espacial. Debe subrayarse enfáticamente, que en este caso la *sencillez* del índice de atractividad hace *más robusto* el modelo de interacción espacial.

3.5. Aplicación experimental de la metodología de Nyusten y Dacey

En este apartado se aplica en su totalidad (de manera *experimental*) la metodología de Nyusten y Dacey (1961) para definir la red de la muestra de 86 ciudades utilizada en el estudio del Imco (2010). Esto será clave para determinar la red de ciudades del conjunto de 358 ciudades para México definidas por el Conapo

(2010a), que es el *propósito final* de este trabajo. La *matriz adyacente* de las interacciones entre las 86 ciudades se expandió hasta la quinta potencia, de tal manera que todos los totales de las columnas tuvieron 12 o más decimales. Esto es, 50% más decimales que los que obtuvieron Nystuen y Dacey (1961). Con esto se garantiza un nivel de exactitud adecuado para medir las relaciones *directas e indirectas* entre los asentamientos de la red.

Sólo como recordatorio: el *indicador de atractividad* (W_j) fue la población ocupada en cada ciudad; el *indicador de los consumidores* que se podían mover entre las ciudades (O_i) fue la población total; el *indicador proxy de los costos de transporte* (C_{ij}) que se utilizó fue la distancia interurbana por carretera medida en kilómetros, y el parámetro de la fricción de la distancia ($-b$) fue -1.5. Los argumentos que *justifican cada una de estas decisiones* se presentaron en las secciones anteriores de este capítulo.

3.5.1. Resultados

La metodología de Nyusten y Dacey (1961) mostró, *una vez más*, sus bondades prácticas y su solidez conceptual y metodológica, lo que permitió identificar la red de ciudades a escala nacional.

Los resultados *experimentales* son *muy alentadores*: todos los componentes del modelo actuaron en el sentido esperado y la red resultante (incluyendo las *relaciones directas e indirectas*) resultó altamente lógica. Se identificó una ciudad nodal de escala nacional: la ZMVM, y 25 ciudades nodales de escala regional (ciudades *subnodales*) (Cuadro 3.10; Figura 3.2). Las ciudades *vinculadas* a las principales ciudades *nodales* y *subnodales* muestran también un número lógico: 35 se vinculan a la ZMVM; 9 a Guadalajara y 6 a Monterrey (aunque esto depende, en parte, de qué ciudades se consideren en el análisis).

Destacan, además de Guadalajara y Monterrey, algunas ciudades *subnodales* que juegan un papel importante en sus regiones. Por ejemplo: las ZM de Tijuana, León, Mérida, Villahermosa y Hermosillo. Y otras que a pesar de su importancia poblacional, no tienen una gran influencia subnacional debido a su cercanía con la ZMVM: las ZM de Puebla y Toluca.

Deben mencionarse, también, ciudades *subnodales* que han surgido o se han consolidado en los últimos 20 años: la ZM de Juárez (que tiene como ciudad vinculada a la capital del estado: Chihuahua), la ZM de La Laguna (que vincula a Durango), la ZM de Querétaro (que vincula a Celaya, perteneciente al estado de Guanajuato, pero que funcionalmente se asocia más a la ZM de Querétaro),

la ZM de Aguascalientes (que incluye en su zona de influencia a la capital de un estado vecino: la ZM de Zacatecas-Guadalupe), la ZM Reynosa-Río Bravo (que fortalece su vinculación con Matamoros, a pesar de la presencia regional de una ciudad *subnodal* tan importante como Monterrey), Irapuato (que consolida su vinculación con Salamanca) o la ZM de Oaxaca (que registra como ciudad vinculada a Zihuatanejo, que pertenece al estado de Guerrero).

En particular, la ciudad *nodal* ZMVM y las ciudades *subnodales* de La Laguna, Querétaro, Aguascalientes y Oaxaca, muestran que la organización funcional del territorio no entiende de límites político-administrativos arbitrarios, que responden a razones del pasado pero no necesariamente del presente y que, con frecuencia, son imaginarios (Garrocho, 2011).

Cuadro 3.10
Resultados experimentales: red de ciudades de México, 2010
(con la muestra de 86 ciudades del Imco, 2010)

1.0 ZM del Valle de México		
1.01	ZM	Guadalajara
1.02	ZM	Monterrey
1.03	ZM	Puebla
1.04	ZM	Toluca
1.05	ZM	de Tijuana
1.06	ZM	León
1.07	ZM	Juárez
1.08	ZM	La Laguna
1.09	ZM	San Luis Potosí - Soledad de G. S.
1.10	ZM	Querétaro
1.11	ZM	Mérida
1.12	ZM	Tampico
1.13	ZM	Cuernavaca
1.14	ZM	Acapulco
1.15	ZM	Veracruz
1.16	ZM	Morelia
1.17	ZM	Villahermosa
1.18		Hermosillo
1.19		Culiacán Rosales
1.20	ZM	Xalapa
1.21	ZM	Tuxtla Gutiérrez
1.22	ZM	Oaxaca
1.23	ZM	Poza Rica
1.24	ZM	Pachuca
1.25	ZM	Cuatla

Continúa Cuadro 3.10...

	1.26	ZM Orizaba
	1.27	ZM Minatitlán
	1.28	ZM Tehuacán
	1.29	Uruapan
	1.30	ZM Tulancingo
	1.31	Tapachula de Córdova y Ordóñez
	1.32	ZM Tula
<hr/>		
	1.33	ZM Salina Cruz
	1.34	San Juan del Río
	1.35	Tuxtepec
<hr/>		
2.0 ZM de Guadalajara		
	2.1	ZM Tepic
	2.2	Mazatlán
	2.3	ZM Puerto Vallarta
	2.4	ZM Colima-Villa de Álvarez
	2.5	ZM Zamora-Jacona
	2.6	ZM La Piedad-Pénjamo
	2.7	ZM Ocotlán
	2.8	Manzanillo
	2.9	Delicias
<hr/>		
3.0 ZM de Monterrey		
	3.1	ZM Saltillo
	3.2	ZM Reynosa-Río Bravo
	3.3	ZM Nuevo Laredo
	3.4	ZM Monclova-Frontera
	3.5	Ciudad Victoria
	3.6	ZM Piedras Negras
<hr/>		
4.0 ZM de Puebla		
	4.1	ZM Tlaxcala-Apizaco
<hr/>		
5.0 ZM de Tijuana		
	5.1	ZM Mexicali
	5.2	Ensenada
	5.3	La Paz
<hr/>		
6.0 ZM de León		
	6.1	ZM de Aguascalientes
	6.2	Irapuato
	6.3	ZM San Francisco del Rincón
	6.4	Guanajuato
<hr/>		
7.0 ZM de Juárez		
	7.1	ZM Chihuahua
<hr/>		
8.0 ZM de La Laguna		
	8.1	Victoria de Durango
<hr/>		
9.0 ZM de San Luis Potosí-SGS		

Continúa Cuadro 3.10...

	9.1	ZM Rioverde-Ciudad Fernández
10.0 ZM de Querétaro		
	10.1	Celaya
11.0 ZM de Mérida		
	11.1	ZM Cancún
	11.2	Campeche
	11.3	Chetumal
12.0 ZM de Aguascalientes		
	12.1	ZM Zacatecas-Guadalupe
13.0 ZM de Villahermosa		
	13.1	Ciudad del Carmen
	13.2	Cárdenas
	13.3	Comalcalco
	13.4	Macuspana
14.0 Hermosillo		
	14.1	Ciudad Obregón
	14.2	Heroica Nogales
	14.3	ZM Guaymas
15.0 ZM de Reynosa-Río Bravo		
	15.1	ZM Matamoros
16.0 Culiacán Rosales		
	16.1	Los Mochis
17.0 ZM de Tuxtla Gutiérrez		
	17.1	San Cristóbal de las Casas
18.0 ZM de Oaxaca		
	18.1	Zihuatanejo
19.0 ZM de Orizaba		
	19.1	ZM Córdoba
20.0 Irapuato		
	20.1	Salamanca
21.0 ZM de Minatitlán		
	21.0	ZM Coatzacoalcos
22.0 ZM de Colima-Villa de Álvarez		
	22.1	ZM Tecomán
23.0 Ciudad Obregón		
	23.1	Navojoa
24.0 La Paz		
	24.1	Los Cabos
25.0 ZM de Piedras Negras		
	25.1	Ciudad Acuña
26.0 Cárdenas		
	26.1	Huimanguillo

Figura 3.2
Resultados experimentales: red de ciudades de México, 2010
(con la muestra de 86 ciudades del Imco, 2010)



Conclusiones

La importancia de este capítulo radica en que *justifica cada detalle y cada decisión* de la metodología y de la construcción operativa del modelo de interacción espacial, a partir de múltiples *pruebas experimentales*. Se inicia analizando la metodología general (Nyusten y Dacey, 1961) y luego se procede a realizar una disección del modelo de interacción espacial que se utilizará en el siguiente capítulo, analizando *en profundidad* cada uno de sus componentes. Este análisis *exploratorio y experimental* ofrece la seguridad suficiente para aplicar la metodología y el modelo aquí referidos al conjunto de 358 ciudades de México definidas por el Conapo (2010a), para perfilar de manera completa la red nacional de ciudades.

Se puede concluir que el método de Nyusten y Dacey (1961) sigue siendo muy *robusto* en términos conceptuales y metodológicos, y tiene el valor adicional de ser práctico de utilizar. Quizá por esto se reportan más de cincuenta artículos especializados que han utilizado su metodología en los últimos 10 años, y tiene cerca de cinco mil registros en Internet. En la *prueba experimental* que se presentó en este capítulo, la metodología de Nyusten y Dacey volvió a salir avante.

Los componentes del modelo de interacción espacial que se utilizarán para medir de manera completa las interacciones en la red de ciudades del país están claros: el *indicador de atractividad (W_j)* será la *población ocupada* en cada ciudad; el *indicador de los consumidores* que se pueden mover entre las ciudades (O_i) será la *población total*; el *indicador proxy de los costos de transporte (C_{ij})* que se utilizará será la *distancia interurbana lineal medida en kilómetros*, y el parámetro de la fricción de la distancia ($-b$) será -1.5 . Las justificaciones de cada una de estas decisiones se detallaron a lo largo de este capítulo y pueden discutirse y evaluarse de manera transparente.