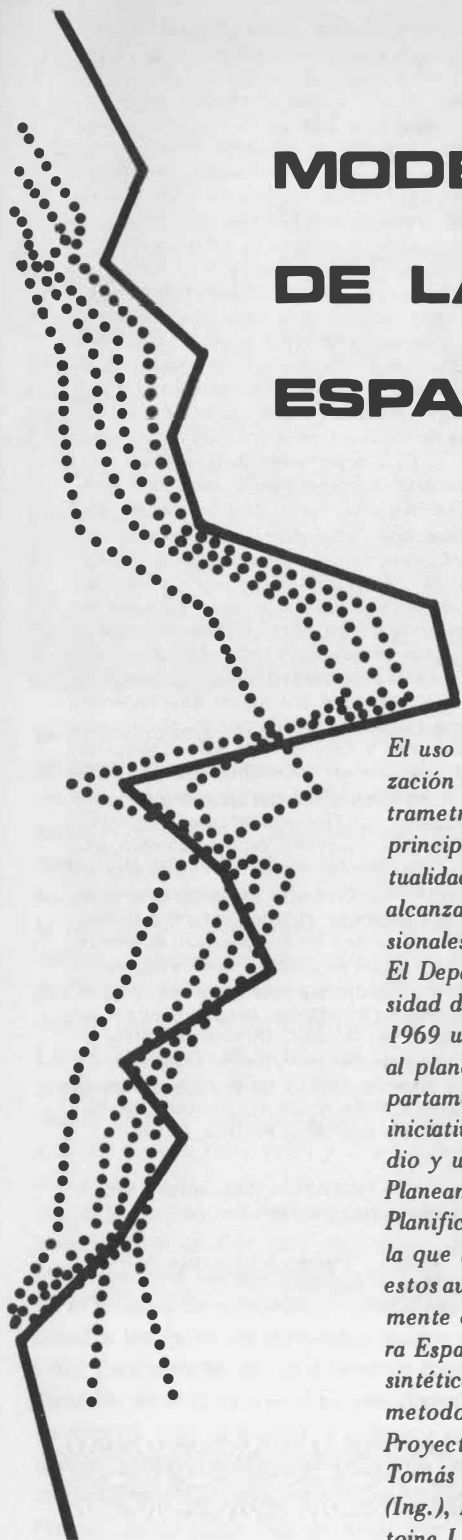


# MODELOS MATEMATICOS DE LA ESTRUCTURA ESPACIAL DE SANTIAGO



*El uso de modelos matemáticos para la descripción y predicción de la organización espacial de las actividades humanas, particularmente en el ámbito intrametropolitano, es un desarrollo científico relativamente reciente, generado, principalmente, en algunos países de Europa y en Estados Unidos. En la actualidad los estudios y acciones en relación a modelos metropolitanos están alcanzando algún grado de difusión en los medios académicos y técnico-profesionales de los países latinoamericanos.*

*El Departamento de Estudios y Planificación Urbano-Regionales de la Universidad de Chile, obedeciendo a su interés por estas materias, ofreció en el año 1969 un curso de carácter informativo sobre Modelos Matemáticos aplicados al planeamiento urbano, dictado por el profesor Marcial Echeñique, del Departamento de Arquitectura de la Universidad de Cambridge. A partir de esta iniciativa comienza a difundirse en nuestro medio la preocupación por el estudio y utilización de estos recursos científicos en relación a los problemas del Planeamiento urbano. Hoy en día, es ya una entidad como la Dirección de Planificación del Desarrollo Urbano del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, la que incorpora en su acción oficial el desarrollo de tareas que se apoyan en estos avances científicos y metodológicos. En efecto, esta entidad tiene actualmente en desarrollo un proyecto sobre "Modelos Matemáticos de la Estructura Espacial de Santiago", del cual se proporciona a continuación una versión sintética y resumida de las principales etapas, en particular las relativas a la metodología de aplicación al Plan Regulador Intercomunal. Participan en este Proyecto: Marcial Echeñique T. (Dr. Arqto.), Marianela Quintana G. (Arqto.), Tomás de la Barra M. (Arqto.), Jorge Guendelman R. (Ing.), Paolo Brizzi B. (Ing.), Nelda Poblete B. (Arqto.), José Miguel Pascual (Eg. Ing.), Ivonne Antoine I. (Eg. Arqto.) y Lucía Pezoa (Eg. Arqto.).*

### *Introducción y Objetivos Específicos.*

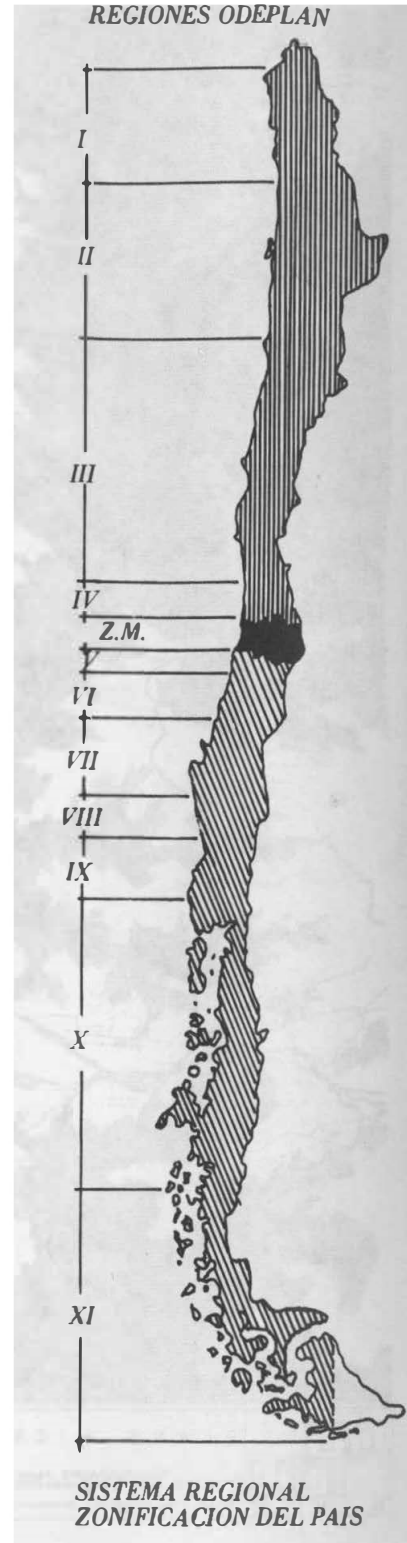
El trabajo que a continuación se expone, forma parte de un conjunto de acciones emprendidas por la Dirección de Planificación del Desarrollo Urbano, tendientes a reactualizar el Plan Intercomunal de Santiago. Dado el carácter intersectorial de este proyecto algunas instituciones están participando en su elaboración, especialmente el MOPT a través de su Dirección de Planeamiento y Urbanismo. Paralelamente, en virtud del aporte académico que representa, ha atraído el interés de la Universidad de Chile a través del Departamento de Estudios y Planificación Urbano-Regionales (DEPUR) y de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT). La Dirección de Planificación del Desarrollo Urbano ha señalado la necesidad concreta de reactualizar el Plan Intercomunal después de 10 años de aplicación. Esta tarea plantea un desafío técnico y metodológico. La creciente complejidad que adquieren nuestras ciudades mayores hace necesaria la elaboración de técnicas de análisis y evaluación que permitan fundamentar las políticas asumidas a través de métodos estructurantes y no mediante el estudio de cada uno de los componentes urbanos en forma aislada. De esta manera se estimó que la técnica de modelos matemáticos podía ser un elemento de apoyo importante, encarando la acción desde un punto de vista que se ha llamado "Urbanismo Experimental".

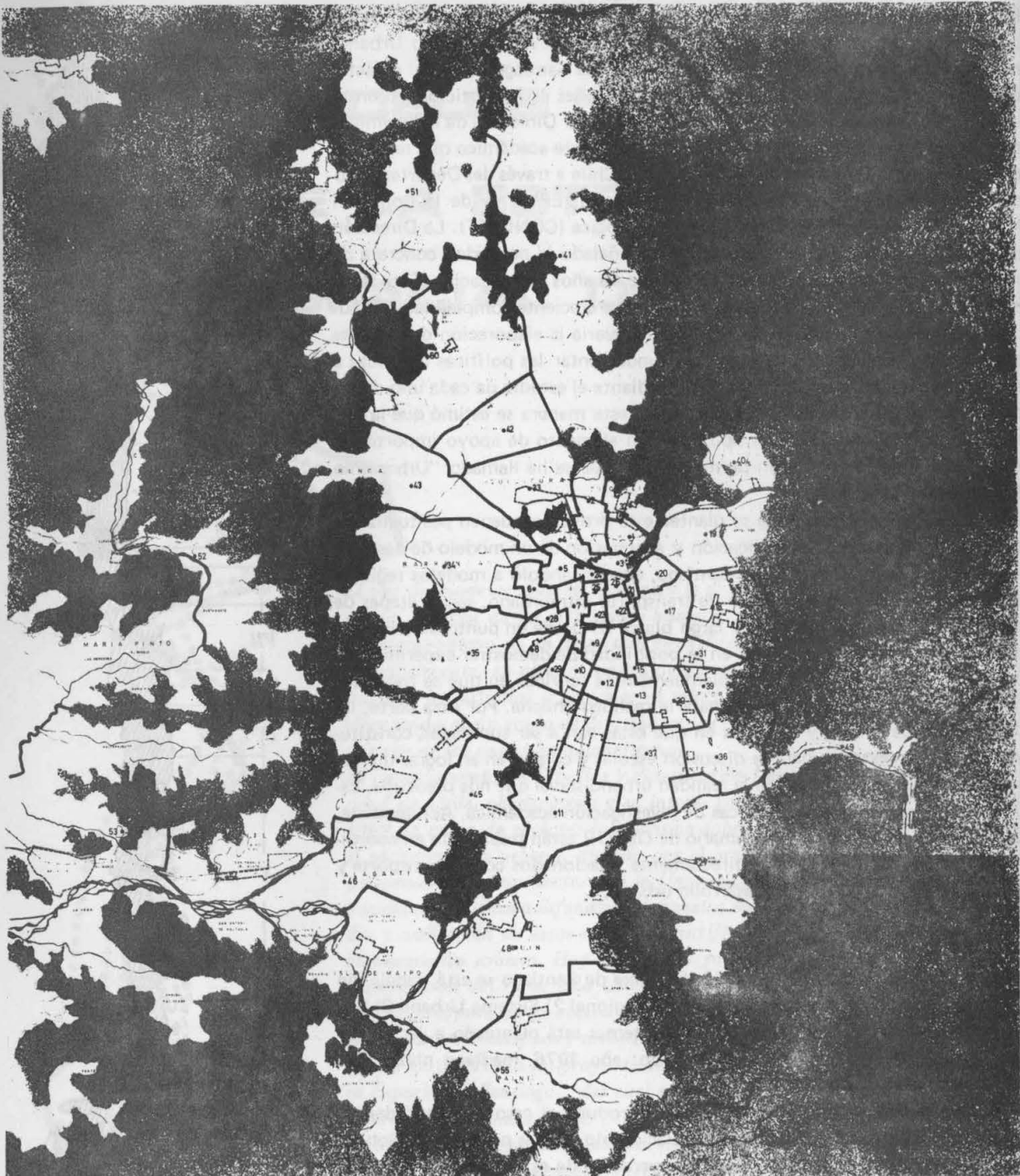
Los objetivos específicos que se plantea este proyecto pueden puntualizarse de la siguiente manera: a) Aplicación y adecuación de un modelo de desarrollo urbano a la micro-región de Santiago, encadenándolo a modelos regionales (demográfico y de empleo) y de transporte intraurbano, según etapas de planificación a corto, mediano y largo plazo. b) Desde un punto de vista académico, el interés está centrado en la posibilidad de demostrar experimentalmente la validez general de los planteamientos teóricos en que se basan los modelos utilizados especialmente para la realidad chilena. Por otra parte, las diferencias que surjan, y la forma en que éstas van a ser superadas, constituyen un campo extenso para la discusión escolar y colaboran en lograr un mejor conocimiento científico de la realidad urbano-social que nos preocupa. Esto permite trazar líneas específicas de investigación académica. Actualmente, por ejemplo, 11 alumnos de seminario de DEPUR están trabajando en coordinación con el tema, 4 de ellos directamente relacionados con el transporte y el resto en el tema general de desarrollo urbano.

### *Descripción General del Proyecto.*

Para los efectos de analizar la realidad urbana de Santiago se está trabajando con 3 sistemas fundamentales: a) Sistema Regional 2) Sistema Urbano 3) Sistema de Transporte. Cada uno de estos sistemas está planteado a varios plazos: plazo inicial: año 1972, corto plazo: año 1976, mediano plazo: año 1982, largo plazo: año 2.000.

1) *El Sistema Regional* tiene por objeto introducir el caso analizado dentro del contexto nacional y, por lo tanto, relacionarlo con las políticas de Gobierno para los distintos sectores. Para la operación de este sistema a través de modelos se ha dividido al país en tres zonas: Zona Norte (regiones I al IV de ODEPLAN), Zona Metropolitana y Zona Sur (regiones V al XI de ODEPLAN). A base de esta subdivisión espacial se trabajan 2 submodelos demográfico y de empleo.





PLANO MICRO-REGIONAL

PROYECTO **MODELOS MATEMÁTICOS DE STR. ESPACIAL DE SANTIAGO**  
 DIRECCIÓN DE PLANIFICACIÓN DEL DESARROLLO URBANO (MINVU) - DEPARTAMENTO DE PLANIFICACIÓN Y ESTUDIOS URBANOS REGIONALES (FAU) DE CHILE - COMISIÓN NACIONAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA - DIRECCIÓN DE PLANEAMIENTO Y URBANISMO (DPAU)-1972



*El Submodelo demográfico* se basa en el cuadro de referencia de A. Rogers (1968), que combina las tasas de natalidad y defunción de cada una de las zonas con una matriz de migraciones, obteniendo como producto final la población residencial en cada período de tiempo.

*El submodelo de empleo*, consta de dos partes: empleo básico y empleo de servicio. El empleo básico es calculado para cada zona y en cada período de tiempo, de acuerdo a determinadas funciones. Supone comportamientos diferenciados para el empleo agrícola, el minero y el industrial, estableciéndose las evidentes interrelaciones que se producen entre ellos. El empleo de servicio está concebido como una función del empleo básico, considerándose un proceso complementario de distribución entre las zonas.

2) *El Modelo de Desarrollo Urbano* está restringido a la Microregión de Santiago. El Sistema Urbano se considera subdividido en 3: a) el sistema espacial, b) el sistema sectorial y c) el sistema físico.

*El sistema espacial* comprende todo el territorio de la ciudad, entendida como un elemento inmerso en la región. El espacio urbano se entenderá subdividido en un número determinado de celdas, representadas por un punto o centro de gravedad. *El sistema sectorial* incluye los sectores de actividad que se desarrollan en la ciudad. Dentro de este sistema se distinguen 2 tipos de actividades: i) de permanencia, localizadas en un determinado punto en el espacio (empleo básico, residencia y servicios); ii) de movilidad o flujos, que comprende todas aquellas actividades que se realizan entre 2 puntos: un origen y un destino (viajes al trabajo, viajes al servicio, etc.).

*El sistema físico* corresponde a la expresión física del sistema sectorial. Así, las actividades de permanencia generan determinados espacios adaptados o "locales". El conjunto de estos locales se denomina *stock físico*. Las actividades de movilidad generan los espacios cauce (calles, vías, infraestructura, etc.). En función de las consideraciones anteriores se formulan cuatro submodelos de distribución: de empleo básico, del stock físico, residencial y de empleo de servicio.

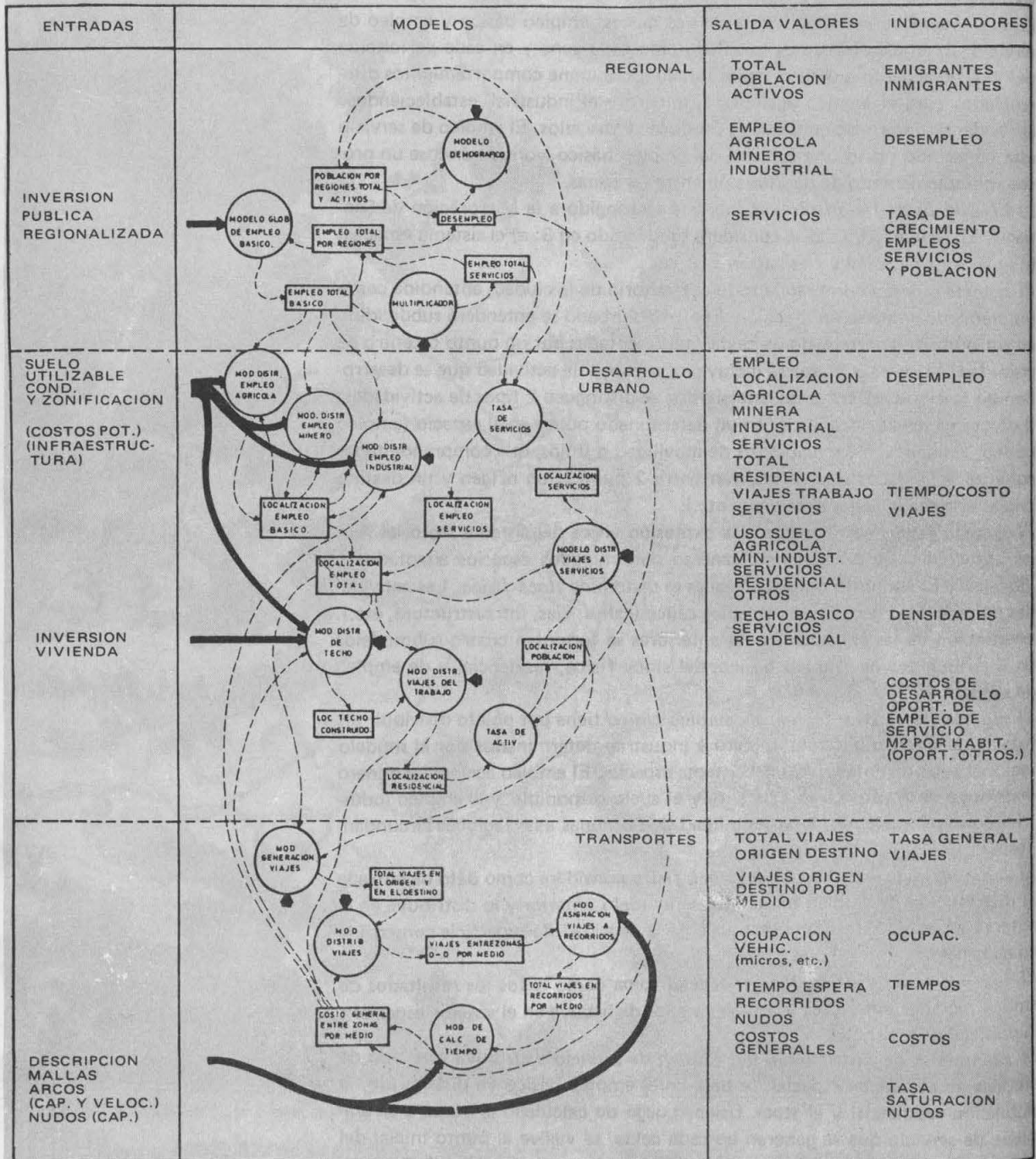
*El submodelo de distribución de empleo básico* tiene por objeto distribuir los totales de empleo agrícola, minero e industrial determinados por el modelo regional a las distintas zonas del sistema espacial. El empleo agrícola y minero distribuye de acuerdo a lo existente y al suelo disponible, y el empleo industrial considera, además, la accesibilidad de las zonas a las regiones circundantes.

*El submodelo de distribución del stock físico* considera como dato de entrada la distribución de empleo básico del submodelo anterior y lo distribuye en el sistema espacial. Este submodelo calcula la cantidad de superficie construida en cada celda.

*El submodelo de distribución residencial* toma como datos los resultados de ambos modelos anteriores y a base de ellos distribuye en el sistema espacial a la población residencial.

*El submodelo de distribución del empleo de servicio* distribuye este tipo de empleo en el sistema espacial, se basa en el empleo básico ya distribuido, la población residencial y el stock físico. Luego de calculado el número de empleos de servicio que se generan en cada celda, se vuelve al punto inicial del submodelo de empleo básico en donde son sumados, iniciándose así un proce-

# estructura general del modelo



so iterativo gracias a la característica convergente de este, el proceso se detiene luego de un número razonable de vueltas.

3) *El Modelo de Transporte*. El interés fundamental de este modelo es similar, en cada celda, el número de orígenes y destinos y la distribución de los viajes entre pares de celdas. Esto implica la construcción de una matriz de viajes cuyo elemento típico representa el número de viajes con origen en cada celda  $i$ , con destino en una celda  $j$  y por medio de  $k$  de transporte. El procedimiento de cálculo para construir esta matriz sigue cuatro etapas fundamentales encadenadas entre sí y encadenadas, a su vez, con el modelo de desarrollo urbano. Las cuatro etapas son: a) generación de viajes, b) distribución de viajes, c) asignación de viajes, y, d) cálculo de costo generalizado.

En la etapa de *generación de viajes* se determina el número de orígenes, el número de destinos y el número de viajes totales en la hora de punta. Los datos de entrada utilizados provienen, en su mayoría, del modelo de desarrollo urbano y son empleo básico, población residencial y empleo de servicio, aparte de datos complementarios, como tasa de motorización, etc.

La segunda etapa es la de *distribución de viajes*. En este modelo ya se hace una primera distribución de viajes entre pares de zonas por medios de transporte. Para ello utiliza, entre otros, un cálculo aproximado del costo por cada medio. La construcción de esta matriz es la parte más compleja del modelo de transporte y se realiza a través del método de maximización de la entropía (Wilson, 1970).

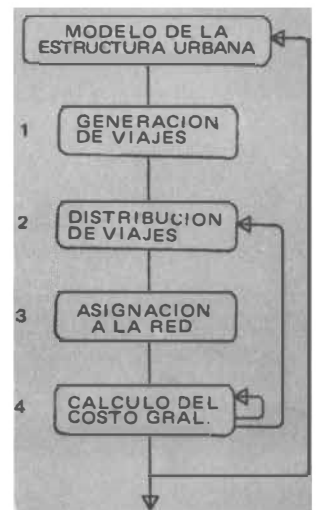
*Asignación de viajes a la red*. Una vez obtenidas las matrices anteriormente señaladas, los viajes deben ser asignados a la red de transporte de la ciudad. Esta se supone compuesta por un conjunto de nudos y arcos, asimilables a los cruces de calles y a las vías que se unen, lo cual se ha determinado empíricamente a través de mediciones en la realidad. Un conjunto de nudos y arcos unidos linealmente conforman un sendero asimilable a un recorrido; cada uno de ellos poseerá una matriz de viajes entre pares de celdas por cada medio de transporte.

Para el cumplimiento de la cuarta etapa, el *cálculo del costo generalizado*, el modelo se basa en las matrices anteriormente descritas y en una serie de datos y funciones, como ser, el tiempo de recorrido, el tiempo en los nudos, el tiempo de espera, el viaje a pie en el origen y en el destino, la frecuencia del recorrido, etc. El costo generalizado que aquí se calcule deberá entrar nuevamente en la distribución de viajes, reemplazándose por el costo aproximado, con lo cual se repite nuevamente la secuencia en otro proceso iterativo.

#### *Estado de avance actual del proyecto.*

Se proporciona, a continuación una síntesis del estado actual de avance de la investigación.

Para el Modelo regional se encuentra totalmente recopilada la información requerida, se han realizado los programas de computación los cuales se encuentran funcionando. Asimismo se han realizado los calibrados necesarios. Los resultados obtenidos han sido comprobados y se puede llegar a la conclusión que el modelo simula bien la realidad histórica existente, explicando los distintos fenómenos de concentración de las inversiones y del empleo y los flujos migratorios. Especial interés demuestran los resultados de la generación regio-



nal de empleos a base de determinados montos de inversión. Los cálculos se hicieron a partir de 1930 y las proyecciones hasta el año 2.000.

A nivel del modelo de desarrollo urbano también se encuentra información recopilada. Los programas de computación están funcionando con excepción del modelo de distribución del empleo básico. Una vez construido este sub-modelo será necesario calibrar el modelo en general. Sin embargo, se cuenta como una experiencia anterior en que se calibró el modelo de desarrollo urbano, obteniéndose una correlación con la realidad ( $R^2$ ) de 86,62.

La información básica que se utiliza para el *modelo de transporte* corresponde a la encuesta de origen y destino que realizó el MOPT en 1971. Los datos pertinentes han sido compatibilizados con el censo de población y vivienda. La formulación de los programas de computación se encuentra realizada en un 50 o/o. Para comprobar el funcionamiento de lo ya realizado, se hizo una prueba piloto agregando las 60 zonas a 5 (Norte, Poniente, Sur, Oriente y Centro). El siguiente cuadro ilustra el comportamiento obtenido:

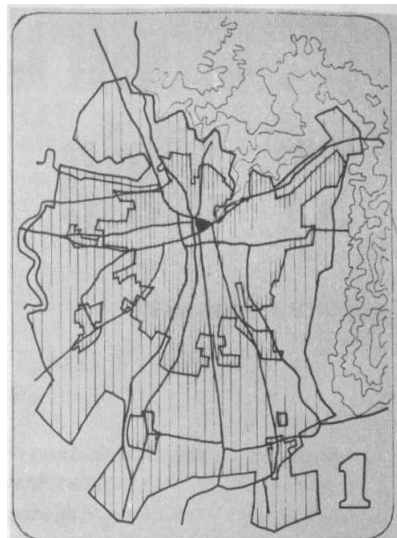
Zona origen	Destinos Centro			
	Locomoción pública		Locomoción privada	
	Encuesta 1971	Modelo	Encuesta 1971	Modelo
Zona Norte	35.744	32.901	1.855	1.736
Poniente	48.806	47.492	4.208	3.875
Sur	84.077	83.288	11.366	11.714
Oriente	58.494	49.156	37.570	30.967
Centro	74.662	61.417	7.399	5.243

### *Trabajo Futuro y Plan de Simulaciones.*

La segunda etapa de este trabajo, aparte de las ampliaciones y desagregaciones ya señaladas, es su utilización según un determinado plan de simulaciones. Desde este punto de vista pueden señalarse dos tipos fundamentales de uso: 1) *Continuo*, en que el modelo es utilizado para guiar la labor de planificación del desarrollo urbano, simulando toda clase de acciones que a diario se toman. Esto significa "monitorear" todas ellas, día a día, año a año y ver cuál es la tendencia en el desarrollo y como responde el sistema a elementos de control. Esto implica tener el modelo constantemente actualizado y alimentado con información fresca. 2) *Impacto*, en que el modelo es utilizado para probar los efectos que ciertas políticas generales pueden tener en la ciudad. Esta forma de uso es especialmente adecuada para apoyar la formulación de planes estratégicos de desarrollo, sobretudo a mediano y largo plazo. Idealmente ambas formas deben ser utilizadas. Sin embargo, para los efectos del plan de reactualización del Intercomunal de Santiago es necesario hacer énfasis en el uso del modelo para probar grandes esquemas estructurales alternativos; una vez decidida una de estas alternativas a base de una política general y de la medición a través de indicadores adecuados, se podría detallar más profundamente el análisis.

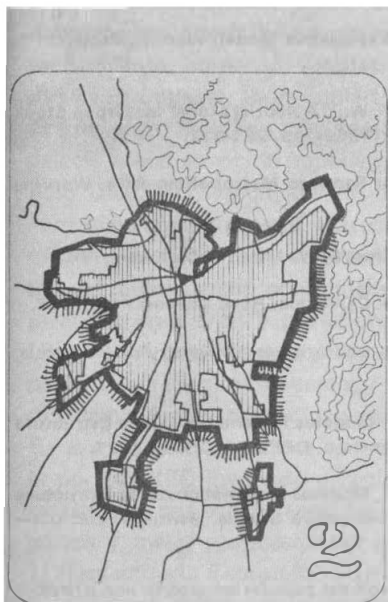
Por otra parte, se están estudiando tres alternativas fundamentales, suficiente-

mente diferenciadas como para poder medir sus efectos: 1) *Tendencia histórica*. Esta alternativa supone que la tendencia histórica se mantiene sin cambios; la concentración a nivel nacional en Santiago continúa así como la expansión del área urbana en forma de mancha de aceite y la acentuación del actual sistema radial de transporte. 2) *Congelación* de los procesos migratorios centrípetos, de tal forma que sólo se acepte el crecimiento vegetativo de Santiago, congelando los terrenos periféricos y aumentando la densidad del área urbana actual. Esto implica una máxima inversión fuera de la zona metropolitana y la elaboración de fuertes mecanismos de control. 3) *Expansión controlada*. Alternativa mediante la cual se acepta el éxito relativo de una política de desconcentración y el crecimiento es orientado de una determinada forma, para esto se han elaborado dos posibilidades fundamentales: a) a través de núcleos de desarrollo, orientando el crecimiento del empleo y de la población en los diversos centros poblados de la microregión que rodean el actual área urbana, aprovechando parte de sus estructuras existentes y readequando la red de transportes; y, b) a través de corredores de desarrollo, en torno a los cuales se orienta el crecimiento del empleo y la población generando una trama lineal a partir del actual área metropolitana, localizando concentraciones de servicio en los lugares en donde actualmente existen centros poblados.

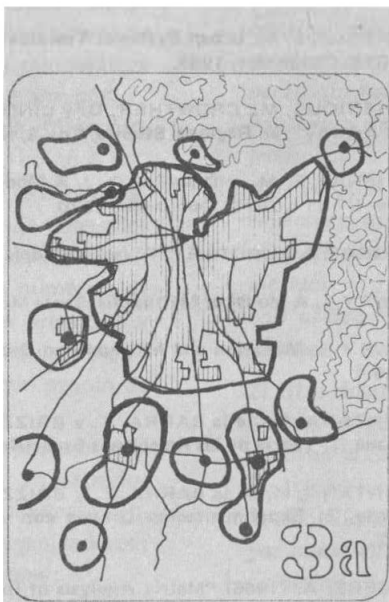


1. TENDENCIA HISTORICA

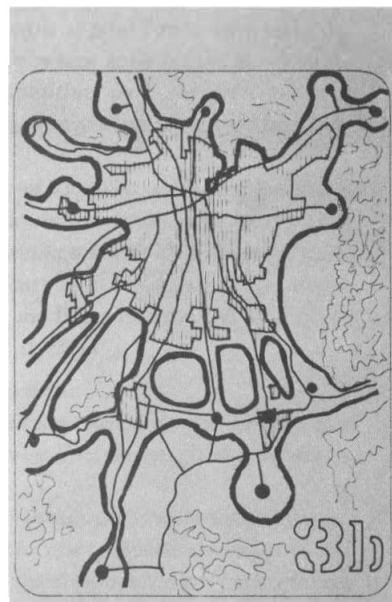
## ALTERNATIVAS GENERALES



2. CONGELACION



3a. EXPANSION EN NUCLEOS



3b. EXPANSION EN CORREDORES



### *Sistema de Evaluación.*

La elaboración de un mecanismo de evaluación es una etapa del trabajo a la cual debe dársele especial énfasis, puesto que en él se verá reflejada en cierta medida la política general de desarrollo urbano que se desea llevar a cabo. Es to conforma un set de indicadores que tendrán que medir los efectos de una determinada alternativa. Ellos son, básicamente:

- 1.- Desempleo. Oportunidad de Empleo, Servicios y Recreación.
- 2.- Relación vivienda-trabajo.
- 3.- Relación vivienda-servicios.
- 4.- Marginalidad (en base a 1, 2 y 3 y otros factores).
- 5.- Densidades y estandares espaciales.
- 6.- Suelo utilizado por residente.
- 7.- Costos de desarrollo por residente.
- 8.- Efectividad del sistema de transporte: Congestión en nudos (saturación) y arcos,
- 9.- Costo general de la política para los individuos.
- 10.- Costo general de la política para el estado y costo social.

Estos indicadores, y otros que pueden sugerirse, se ponderan finalmente para decidir entre las alternativas de desarrollo.

### **BIBLIOGRAFIA**

ECHENIQUE, M. "Modelos: una Discusión", en revista **Planificación N° 7** (1970), pp. 89-98.

ECHENIQUE, M. **Urban Systems: Towards an Explorativa Model**, Working Paper N° 7, LUBFS, Cambridge, 1968.

ECHENIQUE, M., CROWTHER, D. y LINDSAY, W., "A Spatial Model for Urban Stock and Activity", en **Regional Studies**, Vol. 3, N° 3, (1969), pp. 281-312.

ECHENIQUE, M., y DOMEYKO, J. **A Model for Santiago Metropolitan Area**, Working Paper N° 11 LUBFS, Cambridge, 1970.

HAGGET, P. y CHORLEY, R. (eds.) **Models in Geography**. Londres, Methuen, 1967.

LOWRY, I. **A Model of Metropolis**. Santa Mónica, California, Rand Corporation, 1964.

LOWRY, I. **Migration and Metropolitan Growth**. Los Angeles, University of California, 1966.

QUINTANA, M. de la BARRA, T. y BRIZZI, P. **Modelos Matemáticos de la Estructura Urbana, 1: Teoría de las Relaciones Espaciales**. Santiago, DEPUR- DPDU, 1971.

QUINTANA, M. de la BARRA, T. y BRIZZI, P., **Modelos Matemáticos de la Estructura Urbana, 2: Experimentación Urbana con una Estructura Simple**. Santiago, DEPUR- 1972.

ROGERS, A. (1966) "Matrix Analysis of Intra-regional population growth and distribution" en **Regional Science Papers and Proceedings**.

ULLMANN, E. y DACEY. "The minimum requirement approach to take Urban Economic base" en **I.G.U. Symposium**. Lund, University of Lund, 1960.

WILSON, A. **ENTROPY in Urban and Regional Modelling**. Londres, Pion, 1970.