
CONFORMACION DE REDES PARA PROGRAMACION DE SEMAFOROS

Irene Baeza y Mónica Zucker
Consortio INTRAT-CITRA

Andrés Villaseca
Universidad Católica de Chile

Manuel Albornoz
Unidad Operativa de Control de Tránsito

Jaime Gibson
Universidad de Chile

RESUMEN

El problema general dentro del cual se enmarca el presente trabajo es el de ordenar, en el espacio y en el tiempo, la operación de un conjunto de semáforos.

Cuando hay proximidad entre semáforos, su funcionamiento periódico introduce regularidades en la circulación, con lo cual se forman pelotones de vehículos; por esto, la coordinación entre semáforos puede ser sumamente beneficiosa en términos de disminuir significativamente las demoras y detenciones. Sin embargo, para lograr este beneficio, además de la proximidad de los semáforos (variable espacial), debe darse que tengan una periodización común (variable temporal) y ciclo compatible (homogeneidad operacional). Es decir, la contigüidad espacial es sólo una condición necesaria pero no suficiente para que un conjunto de semáforos opere en forma óptima en red.

Lo que ocurre en realidad es que la definición de los límites de una red, su ciclo y su periodización, constituyen un problema simultáneo. El reconocimiento de este hecho introduce la posibilidad de que a distintas horas del día, las agrupaciones de semáforos a ser coordinados, sean diferentes.

Recientemente en el marco de la ejecución del proyecto denominado "Construcción de un Sistema de Control del Área de Tráfico para la Ciudad de Santiago (SCAT)" se ha elaborado una metodología para abordar el problema considerando su solución por etapas, teniendo en cuenta criterios espaciales, temporales, operacionales y también de políticas de gestión de tránsito para la conformación de redes.

En este trabajo se presenta la metodología y se comentan resultados de su aplicación en Santiago.

1. INTRODUCCION

Usualmente la definición de redes de semáforos no ha sido enfocada desde una perspectiva de control de tráfico centralizado ni ha incorporado aspectos de variabilidad temporal y operacional. Lo que normalmente se ha hecho es, primero, definir redes sólo por consideraciones de tipo espacial y luego, dada esa estructura rígida en el tiempo, se ha definido la periodización y la programación para cada período. Con este enfoque se puede incurrir en altos costos al tener intersecciones operando, forzadas por el grupo, con un ciclo muy lejano a su óptimo, en períodos que no le son propios; si bien es cierto que para conformar redes en pos de la coordinación es necesario permitir que los semáforos no operen exactamente con su ciclo óptimo y que sus períodos no sean exactamente los que les corresponden individualmente, este alejamiento de los valores óptimos debe ser controlado.

Este trabajo presenta una perspectiva amplia que define una red como un conjunto de intersecciones conexas que operan con ciclo común, durante un mismo período de tiempo.

En este sentido, la agrupación de semáforos en redes depende de los siguientes factores:

- a) ubicación espacial
- b) periodización, determinada fundamentalmente por los patrones de demanda
- c) ciclos óptimos de operación individual de cada intersección, determinados fundamentalmente por los niveles de demanda

Dada la gran cantidad de datos que se requeriría para la solución rigurosa de este problema simultáneo, la gran complejidad de su planteamiento matemático y la inexistencia de teoría que pudiera resolverlo, se ha optado por diseñar un método secuencial que a pesar de ser aproximado, es capaz de captar la interdependencia entre las variables espaciales, temporales y operacionales.

El método considera las siguientes tres etapas:

ETAPA 1: Subdivisión espacial: en esta etapa se generan grupos de intersecciones semaforizadas aisladas espacialmente, con distinto grado de dependencia de las variables temporales y operacionales.

ETAPA 2: Periodización: en esta etapa se definen los períodos y la agrupación de intersecciones en cada uno de ellos.

ETAPA 3: Programación: en esta etapa se conforman definitivamente las redes de semáforos que operan con un ciclo común durante un cierto período de tiempo.

En la primera etapa se acota el problema a aquellos grupos en que realmente hay dependencia entre las variables espaciales y temporales. En efecto, en la práctica el problema de la interdependencia de las tres variables no se da de la misma forma; de hecho, de acuerdo a criterios espaciales o de políticas de gestión de tránsito, se pueden definir grupos donde su definición espacial es constante en el tiempo.



En segundo término, se realiza la etapa de periodización, la cual depende de los patrones de demanda de las intersecciones críticas representativas de un grupo. Con este enfoque se minimiza la cantidad de datos que es necesario recabar.

Por último, se llega a la etapa final con el problema suficientemente resuelto de tal forma que se saben exactamente los períodos en que es necesario tomar datos de flujo para cada intersección, de forma tal de definir la conformación definitiva de redes y calcular su programación óptima en cada período.

En el **capítulo 2** se explican los criterios que permiten, en una primera aproximación, realizar una subdivisión espacial que genera una tipificación de grupos de semáforos. El **capítulo 3** presenta el procedimiento utilizado para introducir la variable temporal en los tipos de grupos cuya definición espacial y temporal son dependientes entre sí. En el **capítulo 4** se explica cómo introducir la variabilidad operacional, cuyo resultado es la conformación final de las redes para la programación de semáforos. Finalmente, en el **capítulo 5** se presentan algunos de los resultados obtenidos al aplicar la metodología a la Ciudad de Santiago, en el marco del Proyecto SCAT, (CONSORCIO INTRAT-CITRA, 1995).

2. SUBDIVISION ESPACIAL

La primera etapa de la metodología propuesta constituye la realización de una subdivisión espacial que genera distintos tipos de grupos de semáforos, con diferentes grados de dependencia de las variables temporales y operacionales.

Considerando criterios de espacialidad, que tienen relación con la forma de llegadas de los flujos a cada acceso de una intersección, se define la frontera del grupo. Es así como dependiendo de la varianza de la velocidad de operación de ciertos ejes o áreas, pueden definirse distintas agrupaciones de semáforos.

La aplicación del criterio de espacialidad a un área de intersecciones semaforizadas genera **semáforos aislados, grupos de semáforos conexos aislados (nucleares) y grupos conexos sin límites distinguibles en su interior (básicos).**

Además, en esta etapa se introducen criterios de políticas de gestión de tránsito, considerando que puede existir el interés de asegurar una buena coordinación en algún eje o área en especial porque se sabe que presentan condiciones de homogeneidad espacial y operacional semejantes y por la alta jerarquía del eje o área en relación a las intersecciones de su entorno. De este modo surgen los **grupos prioritarios.**

En la **Figura N°1** se muestra un esquema de la etapa de subdivisión espacial del procedimiento elaborado para la conformación de redes para programación de semáforos.

A continuación se define cada grupo y se explicita el grado de dependencia entre las variables espacio-tiempo-operación.



2.1 GRUPOS NUCLEARES

Cuando todas las intersecciones pertenecientes a los grupos conexos aislados presentan patrones de demanda similares, se definen como **grupos nucleares**. En este tipo de grupos, la variable espacial y la temporal están fijas; sólo la operacional podría modificarlos; es decir, este grupo tiene sus límites claramente definidos y su periodización es única, la cual estará determinada por la de su o sus intersecciones críticas.

Aún cuando para estos tipos de grupos esté resuelto el problema de la definición de períodos, queda por resolver su conformación definitiva en función de la variable operacional (ciclo de operación) en la etapa de programación.

Como ejemplo de este tipo se puede citar el grupo de semáforos de Puente Alto que está formado por 8 intersecciones semaforizadas contiguas que poseen patrones de demanda similares entre sí. Los semáforos frontera de este grupo están alejados de otros por una distancia mayor de 1000m.

2.2 GRUPOS BASICOS

Los grupos básicos están conformados por un conjunto denso y numeroso de semáforos, en los que no es posible definir límites de subdivisiones con claridad y se observan distintos patrones de demanda en su interior.

A diferencia de los grupos nucleares, su conformación espacial es dependiente de la periodización, incluso su conformación puede ser distinta para distintos períodos.

Finalmente, al igual que en los grupos anteriores, en la etapa de búsqueda de ciclo óptimo su conformación espacial en cada período puede ser modificada con el fin de agrupar intersecciones con ciclos óptimos similares.

Un ejemplo de este tipo de grupo es el sector de Providencia y Ñuñoa limitado por los ejes Carlos Antúnez-A.Vespucio (exclusive)-S.Bolívar-Tobalaba y Av. Italia, que tiene un total de 130 intersecciones semaforizadas.

2.3 GRUPOS PRIORITARIOS

Estos grupos están compuestos por un conjunto de nodos no necesariamente aislados desde el punto de vista espacial, pero cuya operación como red independiente interesa mantener por un criterio de política de gestión de tránsito, es decir, constituyen un grupo por decisión exógena, lo cual hace que sean rígidos; esta rigidez se manifiesta en los tres puntos siguientes:



- tienen periodización única
- la etapa de búsqueda de ciclo no debiera modificar su estructura
- otros grupos adyacentes podrían eventualmente unirse en algún período común a un grupo prioritario si poseen ciclo de operación compatible, imponiendo que la programación del grupo prioritario no se altere para facilitar la unión entre ellos.

Un ejemplo de esto es el grupo Alameda, formado por el tramo del Eje Alameda Libertador Bernardo O'Higgins entre las calles Santa Rosa y Ecuador. Si bien es cierto que este grupo está inserto en una zona de alta densidad de semáforos, es tal la diferencia en su jerarquía, que es conveniente priorizarla.

2.4 GRUPOS RESIDUALES

Finalmente, luego de definir algunos grupos como prioritarios, pueden generarse los **grupos residuales**, que son aquellos rodeados por grupos nucleares o prioritarios. Estos grupos tienen periodización única, en la etapa de búsqueda de ciclo pueden modificarse en cada período y podrían eventualmente ser unidos a otros adyacentes en algún período común si poseen ciclo de operación compatible.

Un ejemplo de este grupo es el sector sur de Ñuñoa conformado por los semáforos ubicados al sur de Av. Grecia (que es un grupo prioritario) y conformado por los ejes Pedro de Valdivia, J. Pedro Alessandri, E. Fernández y Marathon; está constituido por 26 semáforos.

3. PERIODIZACION

Para los grupos cuya definición espacial es constante en todos los períodos (nucleares, prioritarios y residuales) la obtención de su periodización se realiza de acuerdo a la metodología definida por Hadjes y Gibson (1990) que se encuentra implementada en el programa computacional PERQT y las últimas metodologías definidas por Gibson (1995) en relación al tratamiento de intersecciones semaforizadas en períodos punta.

Para los grupos básicos, en cambio, donde su conformación espacial está ligada con la periodización, se aplica un procedimiento estructurado, que se describe a continuación y que cuenta con las siguientes cinco etapas:

- | | |
|-----------------|--|
| ETAPA 1: | Definición de subgrupos nucleares |
| ETAPA 2: | Periodización individual de cada subgrupo |
| ETAPA 3: | Redefinición del grupo básico |
| ETAPA 4: | Periodización global |
| ETAPA 5: | Visión global de la periodización |

3.1 ETAPA 1: Definición de subgrupos nucleares

Dentro de cada grupo básico, se define en su interior subgrupos de los cuales no cabe duda que deben operar en red por la proximidad de sus semáforos y la homogeneidad de su operación. Teóricamente, cualquier combinación de nodos conexos en el interior del grupo básico sería posible y debiera analizarse. Sin embargo, en la práctica, el conocimiento del área de estudio y la intención de - por ejemplo- privilegiar un sentido de tránsito en algunos períodos, permitirá definir un número razonable de subgrupos, cada uno de ellos indivisible en la etapa de periodización. Estos pasan a constituir **subgrupos nucleares** al interior de un grupo básico.

3.2 ETAPA 2: Periodización individual de cada subgrupo

Se elige en cada subgrupo las intersecciones críticas representativas de su comportamiento global y se periodiza cada una utilizando la metodología definida por Hadjes y Gibson (1989) y las últimas metodologías definidas por Gibson (1995).

3.3 ETAPA 3: Redefinición del grupo básico

Con la información de la periodización de cada subgrupo nuclear y superponiéndole las características propias de la zona en estudio, es posible separar del grupo básico aquellos subgrupos que tendrán periodización única, para seguir trabajando sólo con el grupo de semáforos en que aún hay duda de cómo se ordenará en el tiempo y el espacio.

3.4 ETAPA 4: Periodización global

El subgrupo apartado tendrá periodización única y se calcula utilizando la metodología definida por Hadjes y Gibson (1989) y las últimas metodologías definidas por Gibson (1995).

Al grupo básico restante, se le aplica el procedimiento que se describe a continuación.

Primero se periodiza en forma conjunta, utilizando todas las intersecciones críticas elegidas dentro de cada subgrupo, considerando las metodologías anteriormente referidas.

Dado que el programa computacional PERQT admite a lo más cinco intersecciones por corrida, si el número de intersecciones críticas totales es mayor, se eligen las cinco más representativas del conjunto.

Luego, se comparan los períodos obtenidos para el grupo con los períodos individuales. De esta comparación surgen dos alternativas:



- a) que los períodos obtenidos del conjunto sean similares en cantidad y tengan extensiones semejantes a los resultantes de la periodización individual.

En este caso se comparan los ciclos asociados a los tramos del grado de saturación obtenido para las intersecciones críticas de cada subgrupo. Si los subgrupos aceptan un ciclo compatible en todos los períodos, la combinación bajo análisis pasará a conformar un grupo con la periodización única dada por PERQT para el conjunto.

- b) que existan sólo algunos períodos con extensiones similares, tanto en la periodización individual como en la del conjunto.

En este caso se procede a realizar un análisis de los grados de saturación de las intersecciones críticas para determinar si éstas aceptan la implementación de un tiempo de ciclo común. Bajo estas condiciones se constituirán grupos cuya conformación será variable con la periodización.

Cabe señalar que lo más probable es que los puntos de cambio de esos períodos en los subgrupos, no coincidan exactamente. Para definir un horario de cambio del período único obtenido para la combinación de los subgrupos, se define como período de análisis el dado por la periodización del conjunto.

3.5 ETAPA 5: Visión global de las periodizaciones

Antes de comenzar con la etapa de programación, es necesario efectuar una revisión global de las periodizaciones obtenidas para evitar que algún área quede dividida por periodización en alguna hora del día y que en realidad las diferencias de los períodos respectivos sean muy menores.

La idea de esta mirada general es permitir uniones de grupos que producto de la aplicación del procedimiento hayan resultado con períodos parecidos; esto es posible en particular para algún grupo prioritario o residual con alguno básico contiguo ya que en las etapas anteriores no se analizaron conjuntamente.

Lo que se pretende es abrir la posibilidad de obtener una buena coordinación entre los arcos que unen estos grupos, siempre y cuando en la etapa de programación acepten un ciclo común de operación.

En la **Figura N°2** se muestra un esquema de la etapa de periodización para los grupos básicos del procedimiento elaborado para la conformación de redes para programación de semáforos.

4. PROGRAMACION

Una vez que se cuenta con las regiones espacio-tiempo definidas y revisadas, comienza la etapa de búsqueda de ciclo y determinación de programaciones para cada una ellas en cada período.

La importancia de esta etapa final es que, por primera vez, se trabaja con datos de todas las intersecciones y no sólo con algunas representativas.

En la etapa de búsqueda de ciclo óptimo, dependiendo de los ciclos individuales sugeridos para cada nodo por período, podrán tomarse decisiones como:

- mantener la configuración del grupo
- subdividirlo por incompatibilidad de ciclos.

Estas decisiones podrán diferir entre períodos y llevarán a regiones espacio-tiempo-operación distintas. La metodología utilizada para la determinación de ciclos óptimos de un conjunto de intersecciones es la propuesta por Barrientos, Fernández y Gibson (1989).

Una vez que se ha constituido la conformación definitiva de redes, se determina la programación óptima utilizando TRANSYT. Los repartos son determinados por equisaturación y los desfases son optimizados con las subrutinas del modelo.

Para la optimización de desfases podrán usarse recursos tales como: uso de ponderadores positivos para privilegiar algún sentido de tránsito, uso de ponderadores nulos para arcos de transporte público donde la interferencia de paraderos es importante, optimización por etapas para privilegiar algún eje de importancia, etc.

El resultado final de esta etapa será un mapa de redes que podrá variar entre períodos.

En la **Figura N°3** se muestra un esquema de la etapa de programación del procedimiento elaborado para la conformación de redes para programación de semáforos.

5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados de la aplicación de la metodología en Santiago, en el marco del Proyecto SCAT.

Cabe destacar que la aplicación aún no se encuentra terminada, ya que la etapa de programación está aún en desarrollo por parte del CONSORCIO INTRAT-CITRA.

Sin perjuicio de lo anterior interesa destacar que el desarrollo de la etapa de subdivisión espacial ha agrupado las 1144 intersecciones semaforizadas de la ciudad de Santiago en: 35 semáforos aislados, 31 grupos nucleares que contienen 225 intersecciones semaforizadas (7 en promedio por cada



grupo), 3 grupos prioritarios que contienen 55 intersecciones semaforizadas (18 en promedio por cada grupo), 5 grupos residuales que contienen 68 intersecciones semaforizadas (14 en promedio por cada grupo) y 9 grupos básicos que contienen un total de 761 intersecciones semaforizadas (85 en promedio por grupo). Es así como se tiene que al menos dos tercios del total de intersecciones semaforizadas están sujetos a la interrelación de las variables espaciales, temporales y operacionales para definir su agrupación. Esto confirma la gran importancia de lo planteado en este trabajo.

Por otro lado, al observar las periodizaciones obtenidas para los distintos grupos de semáforos, se nota que no sólo varían en términos de número de períodos, sino que los períodos punta difieren tanto en duración como en ubicación a lo largo del día. Por ejemplo: se tienen períodos punta mañana que van desde las 7:00 hasta las 9:30, con duraciones variables de una, dos y hasta dos horas y media.

Con respecto a la aplicación de la etapa de periodización en los grupos básicos, los resultados van desde que todos los subgrupos nucleares operen juntos en todos los períodos, hasta la situación inversa en que se dividen en todos los subgrupos, en todos los períodos, pasando por la agrupación de subgrupos en algunos períodos y en otro no. Como ejemplo de este último caso, se tiene el grupo básico que contiene los siguientes 7 subgrupos: Independencia (1), Recoleta (2), Centro de Santiago al poniente (3) y oriente (4) de Ahumada y José María Caro-Bellavista (5), Vivaceta (6) y Brasil-Cumming(7). En el período punta mañana la conformación de redes es:

Red 1: subgrupo 1
 Red 2: subgrupo 2
 Red 3: subgrupo 3 + subgrupo 4 + subgrupo 5
 Red 4: subgrupo 6
 Red 5: subgrupo 7

En los otros períodos, en cambio, la conformación de redes es:

Red 1: subgrupo 1
 Red 2: subgrupo 2
 Red 3: subgrupo 3 + subgrupo 4
 Red 4: subgrupo 5
 Red 5: subgrupo 6
 Red 6: subgrupo 7

Idéntica situación se da con la aplicación de la etapa de programación, es decir, los grupos pueden tanto dividirse como mantenerse unidos. Por ejemplo, el grupo Vicuña Mackena Sur, que fue definido originalmente como un grupo nuclear y por lo tanto todos sus semáforos tienen periodización común, fue dividido en la etapa de programación quedando en algunos períodos operando en dos redes y en otros formando una red única.



AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido desarrollado en marco de la ejecución del proyecto "Construcción de un Sistema de Control de Área de Tráfico para la Ciudad de Santiago (SCAT)", encargada por la Intendencia Región Metropolitana a las empresas SONDA AUTOMATIZACION LTDA. y AUTER S.A. y cuya supervisión técnica está a cargo de MINTRATEL a través de la Unidad Operativa de Control Tránsito (UOCT), cuyo Director Técnico es el Ing. Sr. Fernando Jofré.

Por último, queremos agradecer a Alejandro Aldea por sus valiosos comentarios en las etapas de discusión y elaboración del método propuesto y al equipo de ingenieros que ha participado en la aplicación del método, conformado por Antonieta Eguía (INTRAT), Paulina Figueroa (UOCT), Claudia Oddó (UOCT), Gabriela Ramos (INTRAT), Claudio Sepúlveda (PUC), Miguel Angel Silva (CITRA), Carolina Simonetti (UOCT), Ernesto Valderrama (CITRA) y Marcelo Vallejos (PUC).

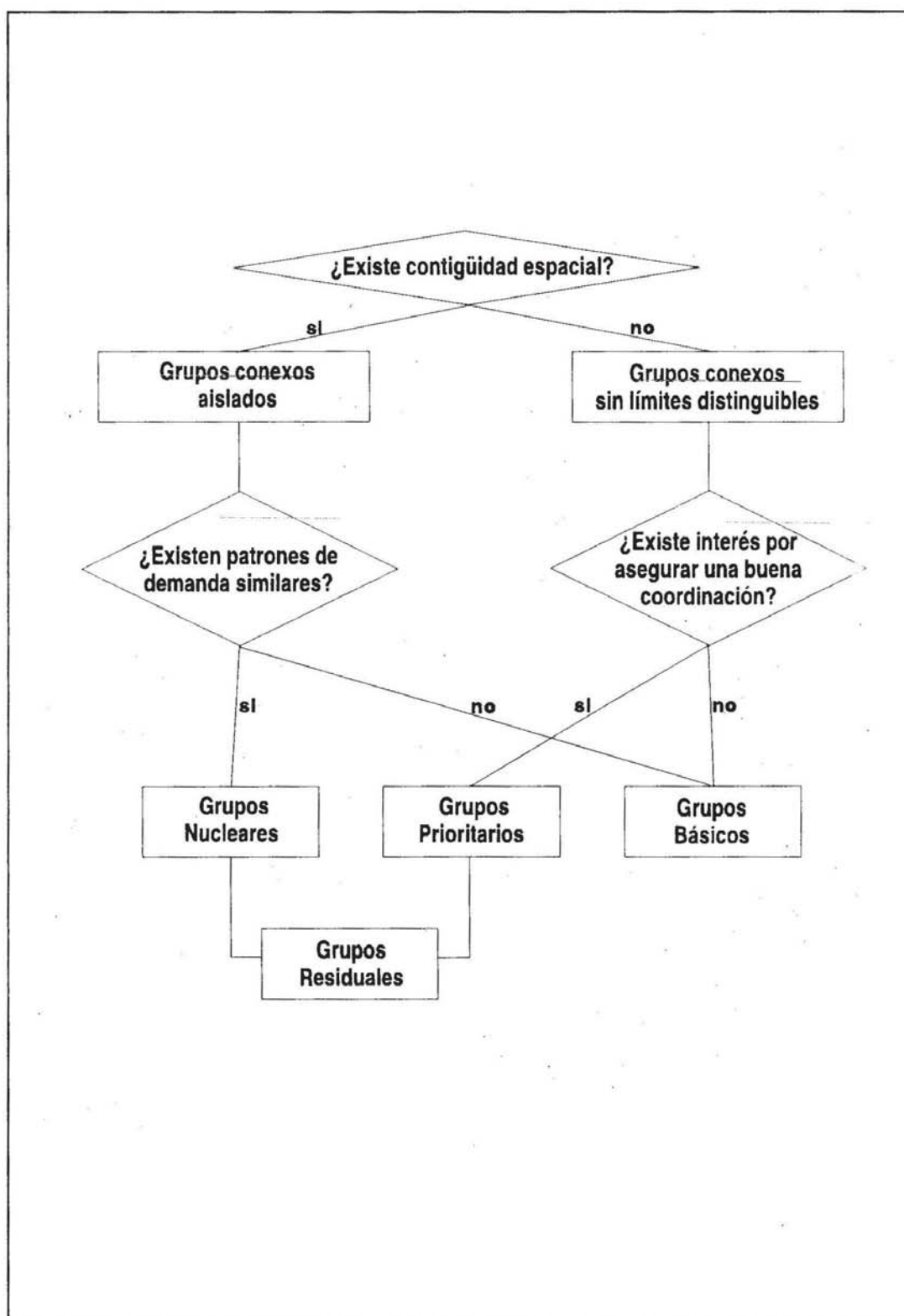
REFERENCIAS

CONSORCIO INTRAT-CITRA (1995). **Informe de Sectorización Funcional**. "Construcción de un Sistema de Control de Área de Tráfico para la Ciudad de Santiago (SCAT)".

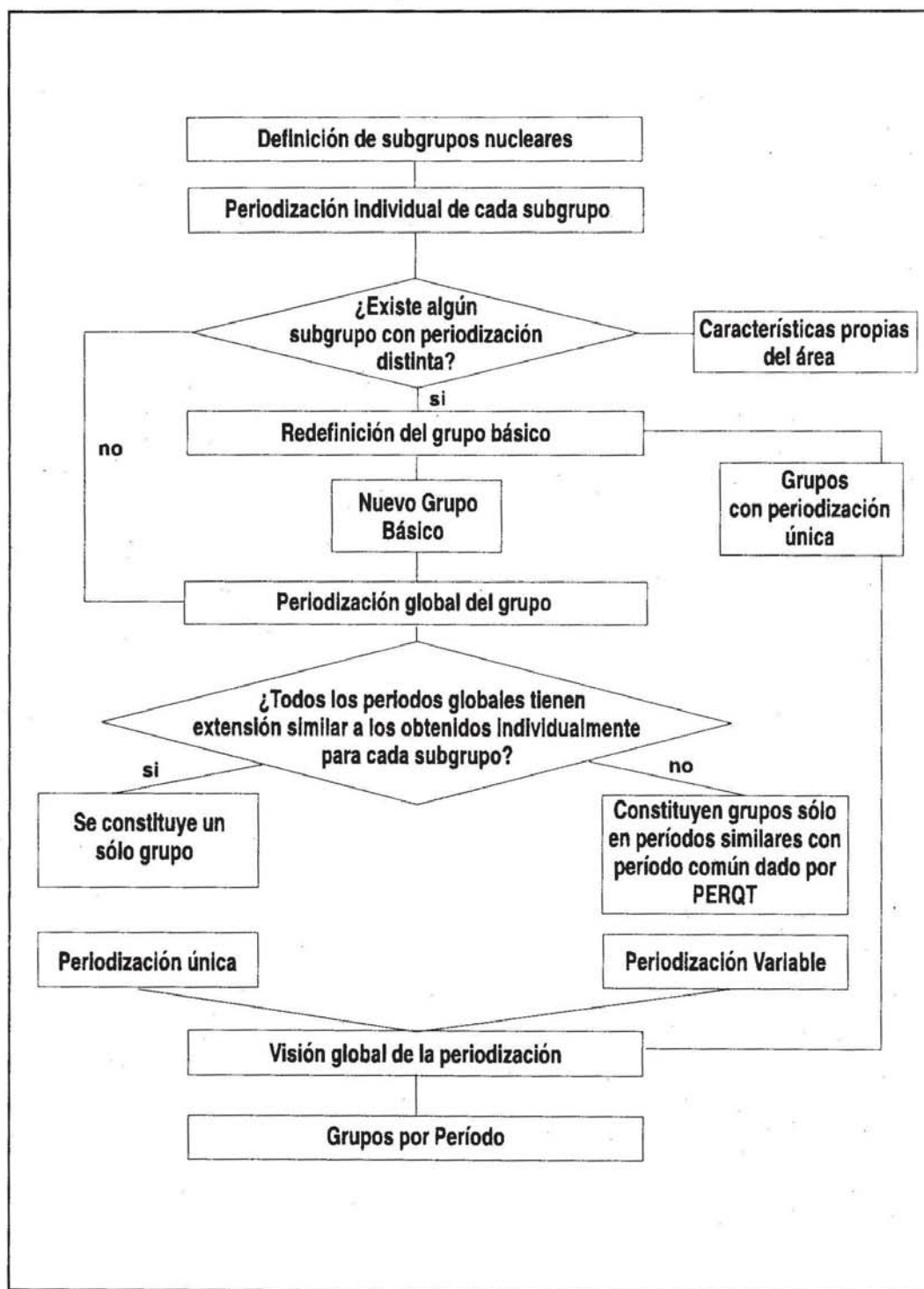
Hadjes, V. y Gibson, J (1990). Tratamiento de la variabilidad temporal del flujo en la evaluación de proyectos de vialidad urbana. **Actas del VI Congreso Panamericano de Transporte**, Colombia.

Gibson, J. (1995). Estimación de demoras en intersecciones semaforizadas en períodos punta. Presentado en el **VII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, Santiago, Chile.

Fernández, D, Barrientos, R y Gibson, J (1989). Metodología para el análisis del tiempo de ciclo óptimo en redes de semáforos. **Actas del IV Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, Valparaíso, Chile.



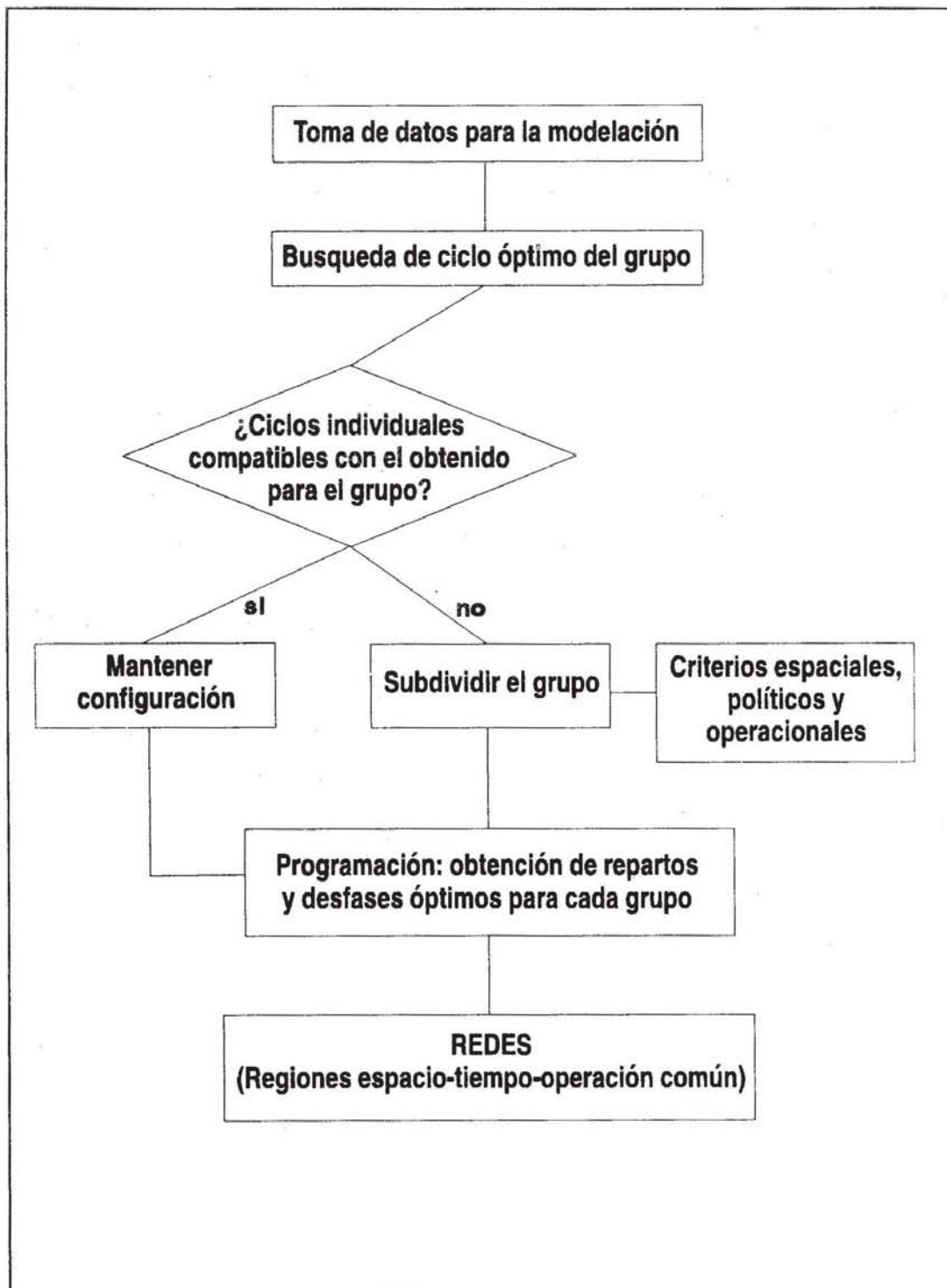
Etapas 1: Subdivisión Espacial
Figura N° 1



Etapa 2: Periodización (Grupo Básico)

Figura N° 2





Etapa 3: Programación
Figura N°3