

PLANEAMIENTO DE INVERSIONES EN ELECTRIFICACION RURAL

José F. Manjarrés
Ricardo A. Smith
Darío Valencia R.

Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos.
Facultad de Minas, Universidad Nacional
de Colombia. Medellín

RESUMEN

La tarea de seleccionar entre un gran número de proyectos de inversión, aquel grupo de proyectos que produzca la máxima utilidad social, es un problema demasiado complejo como para que los planificadores del desarrollo regional intenten resolverlo sin la ayuda de procedimientos formales de análisis.

Esta situación ha llevado a que los entes decisorios presten una mayor atención a la utilización de métodos cuantitativos como instrumentos de ayuda al proceso de decisión, en espera de que los resultados obtenidos con la aplicación de tales métodos permita el aceptar o rechazar proyectos, señalando prioridades de inversión, sobre la base de indicadores que revelen las contribuciones de éstos a los objetivos sociales y económicos.

El objetivo general que se persigue con el presente trabajo, es el de implementar un modelo de optimización, con base en la Programación Entera Mixta, aplicado a la región del Oriente Antioqueño, de manera que se convierta en una metodología de análisis que contribuya a la toma de decisiones más racionales para la asignación de recursos económicos, en los programas de inversión que la Corporación Autónoma Regional Río Negro - Nare (CORNARE) desee adelantar en el área de su jurisdicción. En primera instancia la atención del trabajo se centra principalmente en las inversiones identificadas por la Corporación en el sector de Electrificación Rural. En la aplicación de la metodología propuesta se hace uso de criterios multiobjetivos para la comparación de programas de inversión alternativos, y así ilustrar al responsable de la decisión sobre las consecuencias que tendrá ésta en los diversos objetivos considerados dentro del análisis.

Con la implementación de la metodología propuesta se espera que la Corporación pueda manejar la información de que dispone, para formular diversas estrategias de inversión y, con base en algún indicador que señale los impactos de los proyectos a nivel municipal y regional, tome las decisiones adecuadas acordes con sus deseos y prioridades, al tiempo que considere las aspiraciones propias de cada municipio.

1. INTRODUCCION

- El ejercicio planificador puede definirse como el acto de prever, calcular y decidir, dentro de un plazo aceptable, el curso de acciones a seguir para alcanzar los objetivos propuestos como meta, con el menor costo social y haciendo uso eficiente de los escasos recursos disponibles.

La anterior definición es particularmente adecuada cuando la actividad planificadora busca el desarrollo armónico e integrado de una región específica, pues los problemas de la planeación regional del desarrollo requieren, por lo general, soluciones multisectoriales que a su vez exigen un enfoque interdisciplinario integrado. Este carácter multisectorial hace que el ejercicio planificador sea un proceso complejo, dada la diversidad de objetivos que se persigue (maximizar el ingreso regional, aumentar la calidad de vida, mejorar la integración regional, etc.), por la cantidad de proyectos que, en grupo o individualmente, pueden contribuir a la consecución de las metas propuestas, y por la presencia de varios sectores con objetivos diferentes, en ocasiones conflictivos, que compiten por la asignación de los recursos económicos escasos, y cuyos intereses es necesario armonizar.

En nuestro país, por la falta de herramientas de análisis adecuadas, las decisiones acerca de la asignación de recursos para obras de infraestructura se toman, la mayoría de las veces, con el "criterio" de dirigir las inversiones hacia aquellas zonas que ejerzan mayor presión política. Esta situación lleva consigo una ineficiente asignación de tales recursos, de manera que actualmente se están agotando recursos que serán necesarios posteriormente, sin que los beneficios de los actuales niveles de inversiones logren toda la cobertura que podrían haber alcanzado, si al momento de decidir se hubiese contado con mecanismos formales de análisis, que guiaran las decisiones.

Se hace obvia, entonces, la necesidad existente de dotar a los entes decisores de herramientas de análisis que les permitan convertir la información existente en información relevante para los propósitos que se persiguen con su función planificadora, y que les permitan formular y evaluar programas y proyectos de desarrollo, así como estudiar el impacto que tales proyectos

tendrá sobre la región. Estos modelos también ayudarán a los encargados de tomar decisiones a aceptar o rechazar proyectos y/o grupos de proyectos, sobre la base de indicadores que revelen las contribuciones de estos al desarrollo regional.

2. APLICACION A UN CASO REAL: ELECTRIFICACION DE LA REGION ORIENTE DE ANTIOQUIA

2.1. Planteamiento del problema

La planificación de la zona del Oriente Antioqueño corre a cargo de la Corporación Autónoma Regional Río Negro - Nare "CORNARE", la cual fue creada por la ley 60 de 1983 como establecimiento público descentralizado del orden nacional, adscrito al Departamento Nacional de Planeación.

El principal componente del patrimonio de la Corporación corresponde a los recursos establecidos en el artículo 11 de la Ley 60 de 1983, los cuales provienen de las transferencias hechas a CORNARE de las partidas previstas en el artículo 12 de la Ley 56 de 1981, por parte de las entidades propietarias de plantas generadoras de energía ubicadas en el área de su jurisdicción; en este caso, Empresas Públicas de Medellín e Interconexión Eléctrica S.A. Dichas partidas equivalen al 4% de las ventas brutas de energía en bloque. Otros recursos financieros provienen de las regalías pagadas por las empresas que realizan el aprovechamiento de los recursos renovables y no renovables en la región.

La destinación de tales recursos se aplicará en primer término, y en forma preferencial, a los objetivos estipulados en el mencionado artículo 12, como son:

- Reforestación y protección de los recursos naturales en la respectiva hoya hidrográfica, y más específicamente en las zonas directamente afectadas por las obras hidroeléctricas.
- Programas de electrificación rural, con prioridad en las zonas determinadas en el objetivo anterior.

En el presente trabajo, la atención se centra principalmente en las inversiones identificadas por la Corporación en el Sector Electrificación Rural, en cumplimiento de las aplicaciones estipuladas en la mencionada ley 56. Los recursos económicos de que se dispone para atender los requerimientos de inversión en programas de electrificación rural, si bien son significativos, resultan insuficientes para la implementación de todos los proyectos, razón por la cual es necesario optimizar la asignación de este recurso escaso, con el fin de obtener el mayor "beneficio" posible.

2.2. Información disponible

Con el propósito de conocer el estado de la dotación del servicio de energía eléctrica en los municipios y veredas de la región, y para determinar las necesidades de inversión que se requerían para una cobertura adecuada en la prestación del servicio, CORNARE contrató con varias firmas consultoras los estudios necesarios para, con base en los resultados obtenidos, formular los planes de inversión correspondientes de acuerdo con las proyecciones presupuestales de la Corporación.

Como resultado de estos estudios (SEDIC, 1986; INTEGRAL, 1986; MEJIA VILLEGAS, 1986; CANOGU, 1986), se identificaron un total de 956 proyectos con los cuales se esperaba satisfacer los requerimientos del servicio, a nivel rural, en el

momento de realizar los estudios. Cada proyecto contiene información referente a su ubicación (señalada por el nombre de la vereda y municipio al que corresponde), número de viviendas que se ven favorecidas por la implementación del proyecto, y costo del mismo.

La información disponible representa el nivel de inversiones necesario para satisfacer completamente las demandas del servicio en el momento del estudio, sin considerar cuál sería la variación de tales demandas con el desarrollo demográfico (que es dinámico en la escala espacio-temporal) propio de cada municipio. El supuesto básico es que una vez construida la infraestructura necesaria para los proyectos identificados, el sistema sería capaz de soportar los requerimientos de carga que le significarían la adición de nuevos usuarios, a medida que estos se presentaran.

De los proyectos identificados, hasta el momento la Corporación ha adelantado la construcción de 124 de los mismos. El “criterio” que ha primado para la escogencia de los proyectos a implementar, es el de dirigir las inversiones hacia los municipios prioritarios (Guatapé, Peñol, San Carlos y San Rafael), construyendo tantos proyectos como sea posible de acuerdo con las limitaciones presupuestales existentes cada año; los escasos proyectos implementados en municipios diferentes a los anteriores, fueron escogidos principalmente por razones políticas.

Es evidente que una estrategia de este tipo, en la que no está definida claramente una meta global para la región, puede conducir a agotar recursos económicos en proyectos que, si bien están dirigidos a los municipios que por ley deben ser prioritarios, no son los más “favorables” en cuanto a su impacto en la región. Por otra parte, si se siguiera con esta estrategia, una vez

que se cubriera el 100% de los municipios prioritarios, ¿con cuál criterio se seguiría para la implementación de nuevos proyectos?, y, ¿cómo se tendría la seguridad que esos proyectos escogidos son los más favorables a nivel regional?

Este, precisamente, es el propósito de la metodología que se presenta en los acápites subsiguientes, y con la cual se espera que la Corporación pueda manejar la información de que dispone, para formular diversas estrategias de inversión y, con base en algún evaluador que indique los impactos de los proyectos a nivel regional y municipal, tome decisiones adecuadas acordes con sus deseos y prioridades, al tiempo que consideren las aspiraciones de cada municipio.

Para la aplicación de la metodología propuesta al problema específico, se ha tomado como horizonte de planificación un lapso de cinco años, correspondiente al período 1990-1994. La escogencia de este período de tiempo, que puede parecer demasiado corto, estuvo motivado, entre otras razones, por el hecho de que dada la dinámica propia de la región, los proyectos de electrificación deben evaluarse permanentemente, a fin de verificar si los diseños actuales son apropiados o si, por el contrario, deben ser rediseñados para tener en cuenta flujos migratorios que hayan aumentado o disminuido las poblaciones veredales.

Otro aspecto que influyó en la escogencia del período, es que sólo se tienen proyecciones presupuestales confiables para los próximos cinco años, ya que los ingresos futuros vienen determinados por la entrada en operación de otros proyectos hidroeléctricos en el país; además, existe cierta incertidumbre respecto a si los costos calculados para los proyectos reflejan adecuadamente los costos reales y, por otra parte, a un plazo mayor que el establecido es muy difícil prever cual será la variación futura de

tales costos, pues muchos de sus componentes son de origen extranjero y están sujetos a las disposiciones arancelarias futuras.

3. OBJETIVOS CONSIDERADOS EN EL ANALISIS

La toma de decisiones sobre inversiones en el sector público, y particularmente aquellas que están relacionadas con la implementación de obras de infraestructura social, se presenta como un problema de planeamiento en el que las inversiones escogidas deben buscar el cumplimiento de determinados objetivos previamente establecidos, bien a través de un proceso político de decisión, o bien determinados por una normatividad legal que obliga al cumplimiento de aquellos.

En el problema de interés, se pueden distinguir cuatro objetivos que se desea satisfacer con la implementación de programas de inversión social. Estos objetivos son: eficiencia económica en la asignación de recursos; equidad en las coberturas municipales; tratamiento preferencial a los municipios prioritarios; y asegurar presencia política en todos los municipios de la zona. La significación de cada uno de estos objetivos, para el problema específico, se comenta en los párrafos subsiguientes.

3.1. Objetivo de eficiencia

En términos generales, puede decirse que cualquier decisión sobre inversiones debe llevar, explícita o implícitamente, a una eficiente utilización de los recursos disponibles. Al cumplimiento de este objetivo no escapan los programas de infraestructura social, y con él se busca que los desembolsos presupuestales que se hagan favorezcan al mayor número posible de personas dentro de la región.

En el problema que se está tratando, con este objetivo se persigue el maximizar la relación beneficio-costo asociada con cada grupo de proyectos, en donde los beneficios vendrían representados por la cantidad de nuevos usuarios que se atienden con cada grupo particular de proyectos. Es un objetivo regional, pues lo que se desea es conseguir el máximo incremento posible en los niveles de cobertura regional (máximo número de nuevas viviendas atendidas), que pueda obtenerse con los recursos financieros previstos para cada año considerado.

3.2. Objetivo de equidad

Con este objetivo se desea conseguir un nivel mínimo de cobertura en todos los municipios de la región, de manera que se disminuyan las diferencias existentes actualmente en cuanto a coberturas municipales, las cuales varían entre un 8.1% (Alejandría) y 93.2% (La Ceja). Se busca ser más equitativo en cuanto a la asignación de recursos por municipio, para que en un momento dado todos los municipios del área se encuentren nivelados por encima de cierto nivel mínimo deseado, y posible, de cobertura.

Este objetivo surge porque la consideración única del objetivo de eficiencia, puede agrandar aún más las diferencias en coberturas municipales. En efecto, se dirigirían las inversiones hacia los proyectos más económicos, que generalmente se encuentran en los municipios mejor electrificados, abandonando los municipios peor dotados del servicio, ya que la infraestructura que se necesita aumenta el costo de los proyectos en estos últimos municipios. Obviamente, al tratar de satisfacer este objetivo deberá sacrificarse parte de lo logrado en el objetivo de eficiencia.

3.3. Objetivo de prioridad

La ley 56 de 1981 estipula, en su artículo 12, que los recursos financieros de que se disponga deben dirigirse de manera prioritaria, y en forma preferencial, hacia aquellos municipios que se ven directamente afectados por la construcción de los embalses. Para satisfacer esta restricción legal, el decisor podría fijarse metas mínimas deseadas en estos municipios, e inclusive podría desear llegar a un cubrimiento del 100% en todos ellos al final del horizonte de planificación.

En el cumplimiento de estas metas, será necesario desviar recursos financieros que bien podrían servir para la implementación de proyectos más favorables bajo la óptica regional, o para conseguir ciertos niveles de equidad regional.

3.4 Objetivo de presencia política en la zona

Con este objetivo se persigue representar el deseo del decisor de mantener una presencia activa en todos los municipios que conforman el área bajo estudio, mediante la construcción de al menos un proyecto por municipio, y por año de inversiones.

Este objetivo se hace necesario debido a que la representación del problema tal como ha sido considerada hasta ahora, con los objetivos de eficiencia, equidad, y prioridad, no asegura que los recursos presupuestales se dirijan hacia todos los municipios de la zona. Con él se busca lograr incrementos permanentes en las coberturas de todos y cada uno de los municipios.

4. REPRESENTACION MATEMATICA DEL PROBLEMA

El modelo matemático que se describe a continuación, ha sido

formulado como uno de programación entera cero-uno, en el cual se han utilizado las variables binarias para representar la implementación o no de los diferentes proyectos factibles de ser construidos.

4.1. Función objetivo

Como criterio evaluador para medir los "beneficios" resultantes de la realización de los proyectos, se propone una Función Objetivo representada por la Maximización del Número de Viviendas Atendidas. Es decir, se propone llevar el servicio al mayor número de personas, en la forma más barata posible, cumpliendo con restricciones físicas, presupuestales, y otras.

La Función Objetivo podría, entonces, expresarse como:

$$\text{MAX } \left[\begin{array}{c} + \\ - \end{array} \right. Z = \sum_{t=0}^T \left(\sum_{k=1}^{956} I_{k,t} * \text{NUVIV}_k \right) \left. \begin{array}{c} + \\ - \end{array} \right] \quad (1)$$

donde:

- $I_{k,t}$ = Variable binaria (1,0) que indica la decisión de implementar o no el proyecto k, al inicio del período t.
- NUVIV_k = Número de viviendas que se benefician con el proyecto k.
- T = Fin del horizonte de planeamiento.

La Función Objetivo así planteada no incluye ninguna consideración de equidad regional (que en el presente estudio representa un objetivo social), pues la herramienta de optimización escoge-

ría aquellos proyectos más “económicos”, independientemente del municipio donde estén ubicados. Si se tiene en cuenta que los proyectos más económicos generalmente se localizan en los municipios que cuentan con la infraestructura apropiada, y que estos a su vez son los que presentan una mayor cobertura, es claro que la optimización daría como resultado la orientación de las inversiones hacia las zonas mejor electrificadas, en detrimento de las zonas más “abandonadas”, lo cual es contradictorio con el objetivo de equidad regional que se persigue.

Lo anterior lleva a buscar la forma de incluir el objetivo social dentro de la formulación del problema, lo cual se puede conseguir imponiendo coberturas deseadas en los municipios, como restricciones; esta consideración se explicará en más detalle posteriormente.

4.2. Restricciones estructurales

Este tipo de restricciones tiene que ver con la configuración física del sistema y, básicamente, se refiere a las restricciones de no duplicidad y a las restricciones de contingencia.

Las restricciones de no duplicidad, también llamadas de inversión, aseguran que cada alternativa se construirá a lo sumo una vez a lo largo del período de planificación; este tipo de restricciones se representa de la siguiente manera:

$$\sum_{t=0}^T I_{k,t} \leq 1, \text{ para todo } k = 1, \dots, 956 \quad (2)$$

Las restricciones de contingencia, o de condicionalidad, son utilizadas para indicar que la construcción de un proyecto,

cuando sea el caso, está condicionada a la implementación previa de otro proyecto; estas restricciones se representan de la siguiente manera:

$$I_{k,t} \leq \sum_{t=0}^{t'} I_{j,t} \quad (3)$$

para k condicionado a la construcción previa de j.

4.3. Restricciones presupuestales

Las restricciones presupuestales consisten en un límite anual en la disponibilidad de fondos para la construcción de nuevos proyectos. En esencia, estas restricciones dicen que para un año determinado las inversiones no pueden exceder $PRESUP_t$ pesos; este tipo de restricciones se representan de la forma:

$$\sum_{K=1}^{956} I_{k,t} * COSTO_{k,t} \leq PRESUP_t, \text{ para todo } t \quad (4)$$

donde:

$PRESUP_t$ = Proyección presupuestal de CORNARE, para el año t.

$COSTO_{k,t}$ = Costo de implementar el proyecto k al inicio del período t.

Para la aplicación del modelo matemático propuesto, tanto los costos de los proyectos, que están en pesos de Diciembre de 1986, como las proyecciones presupuestales, que están en pesos

corrientes de cada año, fueron llevados a pesos de Enero de 1990, utilizando para ello una tasa de actualización del 26%. Este valor de la tasa de actualización se escogió de acuerdo con información suministrada por funcionarios de la Oficina de Proyectos Prioritarios de CORNARE; representa adecuadamente la variación que han tenido los costos de los proyectos de electrificación durante el período 1986-1989.

4.4. Restricciones de equidad en la cobertura

Tal como se anotó anteriormente, el decisor puede estar interesado en obtener ciertas coberturas mínimas en determinados municipios; esta situación, que se relaciona con un objetivo social de equidad en la realización de inversiones, puede ser fácilmente tenida en cuenta mediante su inclusión en el problema de optimización bajo la forma de restricciones adicionales al problema.

La cobertura se define como la relación entre el número de viviendas que cuentan con el servicio, dividido por el número total de viviendas en el municipio. La contribución que cada proyecto hace al aumento de la cobertura en el municipio respectivo, puede definirse como:

$$\text{CONTRI}_{k,t} = I_{k,t} * \text{CARENO} * (\text{NUVIV}_k / \text{NUVIVI}) \quad (5)$$

donde:

$\text{CONTRI}_{k,t}$ = Contribución del proyecto k al incremento en la cobertura del servicio en el municipio i, en el período t.

CARENO = Porcentaje de no cubrimiento del servicio en el municipio i, al inicio del período de planificación.

NUVIV_k = Número de viviendas del municipio i que se benefician con la implementación del proyecto k.

NUVIVI = Número de viviendas del municipio i que carecen del servicio de energía (es igual a la sumatoria de los NUVIV_k de los proyectos que pertenecen a ese municipio).

Teniendo en cuenta lo anterior, las restricciones de cobertura para cada municipio $i = 1, \dots, 26$, pueden escribirse de la siguiente manera:

$$\text{COBERO}_{i,t-1} + \sum_{K \in i} I_{k,t} * (\text{CONTRI}_k) \geq \text{COBDES}_{i,t} \quad (6)$$

donde:

$\text{COBERO}_{i,t-1}$ = Cobertura del servicio en el municipio i, al inicio del período considerado.

$\text{COBDES}_{i,t}$ = Cobertura deseada para el municipio i, al final del período considerado.

$k \in i$ = Significa que la sumatoria se toma sólo sobre aquellos proyectos que pertenecen al municipio i-ésimo.

4.5. Restricciones de municipios prioritarios

Tal como se mencionó en el acápite anterior, la ley estipula que la Corporación dirija sus inversiones de manera prioritaria hacia aquellos municipios que se ven directamente afectados por la construcción de los embalses. Para cumplir con esta obligación legal, el decisor podría estar interesado en que cada año se

satisficiera una parte proporcional de la cobertura faltante en estos municipios, de manera que al finalizar el período de planificación considerado, se llegara a un cubrimiento del 100% en la prestación del servicio en estos municipios.

Esta consideración podría representarse matemáticamente, de la siguiente forma:

$$\sum_{k \in I} I_{k,t} * (CONTRI_{k,t}) \geq DCOB_1 \quad (7)$$

para todo t, y para I = Peñol, San Carlos, San Rafael, Guatapé.

donde:

$DCOB_1$ = Representa el incremento gradual que debe obtenerse en la cobertura del servicio, en los municipios prioritarios, a fin de lograr un 100% de cobertura al final del período de análisis.

4.6. Restricciones de presencia política

Dentro de esta categoría cae el tipo de restricciones que obliga al decisor a hacer presencia en todos los municipios, mediante la realización de inversiones. Estas restricciones surgen porque la formulación del problema, tal como se ha planteado hasta el momento, no necesariamente obliga a implementar proyectos en todos los municipios considerados, y el decisor puede estar interesado en que se construya al menos un proyecto en cada municipio. La representación matemática de este tipo de restricciones es la siguiente:

$$\sum_{k \in i} I_{k,t} \geq 1, \text{ para todo } i \text{ y para todo } t \quad (8)$$

Aquí, nuevamente la sumatoria se toma sólo sobre los proyectos que pertenecen al municipio i-ésimo.

5. METODOLOGIA PARA LA TOMA DE DECISIONES

El tratamiento utilizado para la resolución de este problema de múltiples objetivos, corresponde a lo que en la literatura técnica se conoce como método de las restricciones. La filosofía de este método consiste en determinar los valores de las variables de decisión que maximizan el valor de un objetivo, presentado de manera explícita dentro de la función de objetivos, mientras que los objetivos restantes, presentados en la formulación a manera de restricciones, se mantienen por encima de metas mínimas deseadas para cada uno de ellos.

En el problema que se está tratando, el objetivo de eficiencia económica, representado por la maximización del número de viviendas atendidas, es el que se encuentra explícitamente dentro de la función objetivo a ser maximizada, mientras que los otros objetivos, representados por un nivel mínimo de cobertura en todos los municipios, el deseo de obtener el 100% de cobertura en los municipios prioritarios, y el deseo de implementar al menos un proyecto por año en cada municipio, aparecen en la formulación como restricciones impuestas al problema de optimización.

Al resolver el problema de optimización planteado y variar los niveles mínimos de logro en las restricciones que representan los otros objetivos, se genera un conjunto de puntos que se encuen-

tran sobre la llamada superficie de transformación (en realidad, una hipersuperficie en un espacio de cuatro dimensiones, cada una de las cuales corresponde a un objetivo), soluciones factibles no dominadas. El decisor puede iniciar la exploración de esta curva para que, de acuerdo con su estructura de preferencias y con las tasas de intercambio entre objetivos, escoja para su implementación aquel programa de inversiones que le brinde mayor utilidad. En todos los casos, ese programa maximizará la eficiencia con sujeción al cumplimiento de metas en los restantes objetivos.

La información que suministra la superficie de soluciones no dominadas, o superficie de transformación, permitirá un gran nivel de interacción con las personas que tienen a su cargo las decisiones políticas, pues podrá ponerse de presente el comportamiento de alternativas dominantes en términos de los diversos objetivos, señalando lo que se gana o pierde en cada uno de estos objetivos al pasar de una alternativa a otra, y así sucesivamente.

6. RESULTADOS DEL MODELO MATEMATICO PROPUESTO

A fin de ilustrar el potencial de utilización de la metodología propuesta, como herramienta que permite manejar la información disponible planteando diversas estrategias de inversión a fin de alcanzar ciertas metas preestablecidas, y poder analizar qué tanto se alejan del óptimo en eficiencia, en el presente estudio se resolvieron dos formulaciones diferentes, las cuales se supone representan dos enfoques posibles del decisor.

Una primera formulación consiste exclusivamente en la maximización del número de viviendas atendidas, como función objeti-

vo, sujeta a las restricciones físicas del sistema y a las restricciones presupuestales, sin ninguna consideración adicional respecto a coberturas mínimas, o equidad regional o presencia política.

La segunda formulación viene representada por la misma función objetivo anterior, pero además de las restricciones previas incluye como restricciones ciertos niveles mínimos de cobertura deseada en los municipios, un deseo de cobertura de 100% en los municipios denominados prioritarios, y una restricción adicional que asegure la presencia política del decisor, representada por el deseo de que se construya al menos un proyecto en cada uno de los municipios. Los niveles mínimos de cobertura deseada en todos los municipios del área fueron 30% para el primer año, 35% para el segundo año, y se siguió con incrementos anuales del 5%, para terminar al final del período de planificación con una cobertura mínima del 50% en todos los municipios de la región. Para los municipios prioritarios, los incrementos de cobertura deseados para cada año eran proporcionales a lo que en este momento les falta para alcanzar una cobertura del 100%.

Los resultados se presentan en forma de tablas, y en ellos se indica, para cada año considerado, cuales deben ser los proyectos de electrificación rural que deben implementarse para satisfacer los deseos del decisor, en cuanto a impactos de sus decisiones a nivel regional y municipal. La información que proporcionan estos resultados da una lista de proyectos que aparecen cada año, indicando a qué vereda y a qué municipio corresponde cada proyecto, cuántos usuarios se benefician con su implementación, y cuáles son los incrementos en las coberturas regional y municipales que se obtienen con la implementación del conjunto de proyectos seleccionado en cada año. Los resultados obtenidos para cada una de las formulaciones se aprecian en forma resumida en la Tabla No. 1.

**TABLA 1
RESUMEN RESULTADOS OBTENIDOS**

1.a. MAXIMIZAR EL NUMERO DE VIVIENDAS

Año	Número de viviendas	Presupuesto Gastado	Costo unitario
1	2768	1.168'338.432.00	422.087.59
2	2371	1.172'996.096.00	494.726.31
3	2252	1.160'864.256.00	515.481.47
4	2116	1.108'054.128.00	523.655.07
5	2006	1.104'138.624.00	550.418.00

**1b. CONSIDERANDO DETERMINADOS NIVELES DE COBERTURA
Y PRESENCIA POLITICA**

Año	Número de viviendas	Presupuesto Gastado	Costo unitario
1	2232	1.162'927.872.00	521.025.03
2	2132	1.170'176.128.00	548.863.12
3	2014	1.172'557.440.00	582.203.31
4	1814	1.110'495.360.00	612.180.44
5	1593	1.110'544.128.00	697.140.06

Adicionalmente, y con el propósito de ilustrar el procedimiento de comparación entre acciones alternativas de inversión, se presentan las curvas de transformación para los objetivos Eficiencia - Equidad, y Eficiencia - Prioridad, obtenidas al realizar corridas del modelo matemático para un año. Estas curvas se presentan en las figuras 1 y 2, respectivamente. Cada una de estas curvas es la proyección sobre el plano respectivo (plano eficiencia-equidad en el primer caso) de una especie de “filo” o “divisoria de aguas”, en esa imaginaria topografía que define la curva de transformación. Los resultados que permitieron construir las curvas de transformación aparecen en la Tabla 2.

De los resultados presentados en la Tabla 1. se aprecia claramente cómo la formulación propuesta lleva implícita la eficiencia económica, la que en este caso puede tomarse como el costo unitario de los proyectos. En efecto, para los dos casos considerados, el algoritmo de optimización escoge para implementar aquel grupo de proyectos más “baratos”; a medida que se pasa de un año a otro, el costo unitario de los proyectos va aumentando, pues a fin de aumentar el valor de la función, comienzan a entrar proyectos que requieren de cierta infraestructura previa, lo cual incrementa el costo unitario de los proyectos directamente relacionados con ella, y en general de todos los proyectos escogidos para ese año.

Asimismo, se observa cómo la eficiencia económica va disminuyendo a medida que se adicionan restricciones a la formulación original de sólo considerar la maximización del número de viviendas. Comparando los resultados obtenidos para el primer año, se aprecia una diferencia aproximada de 500 viviendas atendidas, y un incremento de \$100000.00 en los costos unitarios; esta diferencia se debe, principalmente, a la restricción impuesta de cobertura mínima deseada del 30% para este primer

año, ya que esto obliga a sacrificar proyectos más favorables desde el punto de vista de cobertura regional, a fin de conseguir ciertos niveles mínimos para cada uno de los municipios. Esta tendencia se mantiene a lo largo de los cinco años considerados.

Otro aspecto interesante de resaltar, es el hecho de que en algunos años el presupuesto disponible no se agota totalmente. Esto puede deberse a que no exista ningún otro proyecto lo suficientemente barato como para que pueda ser incorporado a la solución, o a que la implementación de un proyecto que incrementaría el valor de la función, requiere la implementación de obras de infraestructura, y los costos sumados excedan el presupuesto disponible; dado que en el presente estudio se ha considerado que las obras de infraestructura por sí solas no llevan el servicio a ninguna vivienda, y por lo tanto no aumentan el valor de la función, el algoritmo de optimización pospondría la implementación de tales obras, aunque con el presupuesto remanente pudiesen escogerse para ese año.

En las curvas de transformación generadas para los pares de objetivos Eficiencia-Equidad y Eficiencia-Prioridad, obtenidas para un año, los puntos que conforman dichas curvas representan soluciones no dominadas, y cada una de tales soluciones representa un plan alternativo de inversiones para el año considerado. Las soluciones no-inferiores halladas permiten conocer cuánto debe sacrificarse de un objetivo para ganar algo en otro. Por ejemplo, al analizar los puntos de la curva de transformación entre los objetivos de Eficiencia y Equidad, se observa que para lograr un nivel mínimo del 40% en la cobertura en cada uno de los municipios de la región, el decisor debería sacrificar tan solo 129 viviendas, del total que podrían implementarse si no se tuviera en cuenta ninguna consideración de equidad; y se aprecia también que con los fondos previstos para ese año no puede

TABLA2
RESULTADOS OBTENIDOS PARA LAS CURVAS DE TRANSFORMACION

2.a OBJETIVOS EFICIENCIA-EQUIDAD

COBDES	Número de Viviendas	Presupuesto Gastado	Costo unitario
8.4	2768	1.168'338.432.00	422.087.59
≥ 10	2744	1.170'354.048.00	426.513.87
≥ 20	2733	1.166'652.160.00	426.876.03
≥ 30	2655	1.166'166.016.00	439.233.91
≥ 40	2639	1.165'183'616.00	441.524.69
≥ 50	No factible		

2b. OBJETIVOS EFICIENCIA-PRIORIDAD

COBDES	Número de Viviendas	Presupuesto Gastado	Costo unitario
72.36	2768	1.168'338.432.00	422.087.59
≥ 75	2647	1.168'132.992.00	441.304.50
≥ 80	2331	1.167'246.592.00	500.749.28
≥ 85	2194	1.166'228.480.00	531.553.56
≥ 90	2062	1.170'366.464.00	567.588.69
≥ 95	1985	1.167'038'464.00	587.928.67

FIGURA 1.
CURVA DE TRANSFORMACION EFICIENCIA - EQUIDAD

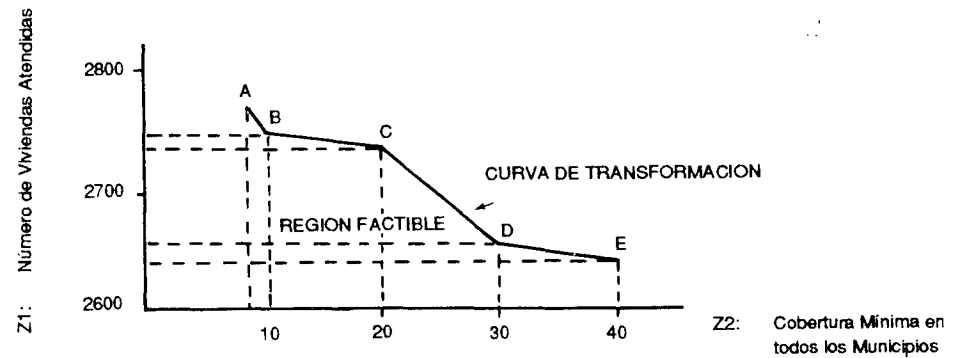
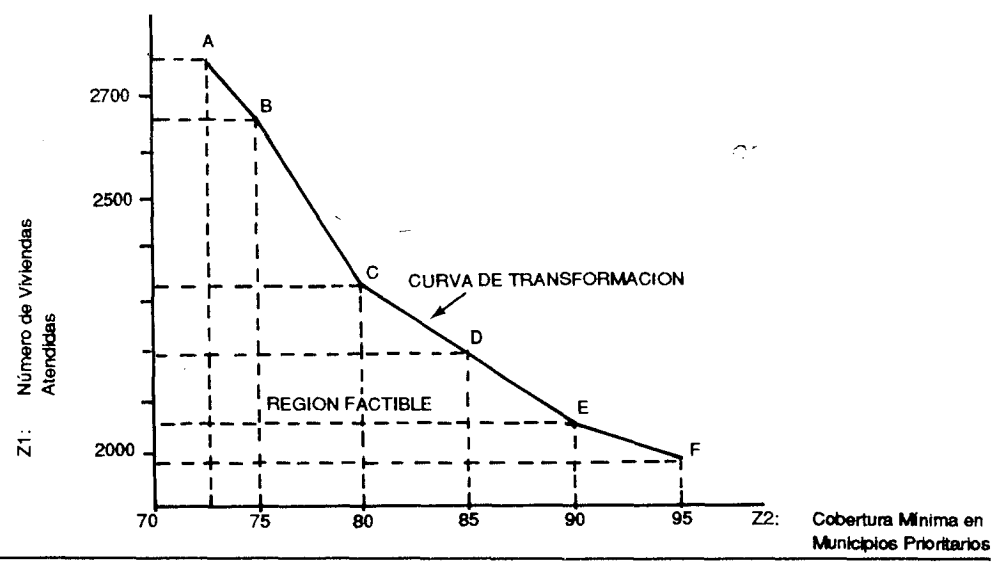


FIGURA 2.
CURVA DE TRANSFORMACION EFICIENCIA - PRIORIDAD



lograrse un nivel mínimo de cobertura del 50%. De igual manera, al analizar la curva de transformación entre los objetivos de Eficiencia y Prioridad, se aprecia que el decisor debería sacrificar un total de 783 viviendas, para lograr que los municipios prioritarios obtengan una cobertura superior o igual al 95%. Es claro que los sacrificios en uno y otro caso son bien distintos.

Obsérvese que los puntos que permitieron construir cada curva de transformación son óptimos en el sentido de Pareto: no se puede ir de un punto a otro sin desmejorar uno de los objetivos.

Para finalizar esta presentación de resultados, es necesario hacer un comentario acerca de las curvas de transformación que se presentan en las figuras 1 y 2 como líneas continuas. Esta representación no corresponde estrictamente a la realidad, pues debido al carácter discreto de los proyectos de inversión, la curva de transformación no está definida como una línea continua, sino que presenta una forma escalonada; lo que se ha hecho en este trabajo es encontrar algunos de los puntos que demarcan las discontinuidades en esa superficie. Por la misma razón, la región factible no está constituida por infinitas combinaciones de alternativas, y en este caso particular es más conveniente hablar de una “nube de puntos” que conforman el espacio de soluciones factibles.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología propuesta, se puede llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones.

La programación matemática muestra su utilidad como una herramienta eficaz de ayuda para las funciones de los planifica-

dores, pues ella permite evaluar explícitamente los proyectos, mostrando la contribución que cada programa alternativo de inversiones hace a los objetivos y metas para los cuales se planifica.

La técnica de las restricciones resulta bastante adecuada para el análisis de proyectos alternativos de inversión, bajo la óptica de objetivos múltiples conflictivos. Esta técnica permite generar toda una gama de cursos de acción alternativos, considerando diversas expectativas en cuanto a los niveles esperados de logros en cada uno de los objetivos considerados; sin embargo, presenta dificultades computacionales cuando el número de objetivos tratados es muy grande.

Asimismo, se destaca la flexibilidad de la metodología propuesta, pues ella puede adaptarse fácilmente para considerar circunstancias cambiantes en cuanto a costos y beneficios reales de los proyectos, así como a cambios previstos e imprevistos en cuanto a las asignaciones presupuestales, y a la identificación de nuevas necesidades y proyectos.

Por otra parte, mediante la utilización de la metodología recomendada, el decisor puede manejar la información disponible planteando diversas estrategias de inversión, y analizar cuáles son las relaciones de intercambio entre los diversos objetivos bajo los cuales se realiza la evaluación; en otras palabras, cuánto se está dispuesto a sacrificar de un objetivo para alcanzar otro.

De acuerdo con las curvas de transformación mostradas en las Figuras 1 y 2, se tiene que el decisor puede fundamentar su decisión mediante la comparación de las alternativas en términos del número de viviendas que puede atender, considerando diferentes niveles de cobertura mínima municipal, o niveles desea-

dos en la cobertura de los municipios prioritarios. Por ejemplo, si para el decisor lo más importante es conseguir el máximo número de viviendas, independientemente de los niveles de cobertura que obtenga, su decisión sería escoger la alternativa A de las figuras; si, por el contrario, él está interesado en obtener cierto nivel mínimo en coberturas municipales, independientemente de cuantas viviendas tenga que sacrificar, podría escoger una alternativa como la E de la Figura 1, o como la F de la Figura 2.

Trabajando de esta manera, y utilizando la información que suministran las curvas de transformación, se evitaría el seguir escogiendo alternativas de inversión en forma arbitraria, pues el decisor queda en condiciones de presentar sus planes de inversión indicando cuál ha sido el criterio o los criterios utilizados para la generación de alternativas, justificando el por qué la alternativa escogida es la solución más favorable, cuando se han tenido en cuenta consideraciones técnicas, económicas, sociales, políticas, y legales.

Aplicaciones similares de la metodología presentada en este trabajo, pueden extenderse a diversos sectores de la actividad planificadora. En el caso particular de CORNARE, puede hacerse un tratamiento similar a las inversiones que por ley la Corporación debe adelantar en programas de reforestación, y para los cuales

dispone de asignaciones presupuestales de igual magnitud a las previstas para los programas de electrificación rural. Para ello, es necesario que se identifiquen plenamente las áreas que pueden ser objeto de intervención, los tipos de intervención a que pueden ser sometidas, los costos en que se incurrirá por la realización de los programas, qué tipos de beneficios pueden esperarse, cuáles son las zonas prioritarias para ser intervenidas, y en general todas las variables que pueden estar contempladas en este tipo de inversiones.

En un contexto más general, la metodología puede ser aplicada para el planeamiento de inversiones en programas y proyectos de infraestructura social y productiva, tales como abastecimiento de agua, disposición y manejo de aguas residuales, programas de salud, educación y recreación, construcción de vías de acceso, diversificación y comercialización de cultivos, entre otros.

Para una aplicación adecuada de la metodología a los sectores anteriormente mencionados, es necesario un proceso político claro y una planificación seria, que identifiquen los objetivos que se desean alcanzar, y señalen los criterios de ponderación de tales objetivos. Asimismo, se hace muy necesario establecer un permanente intercambio de comunicación entre el grupo que formula y evalúa soluciones, y el grupo encargado de tomar las decisiones.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CANO GU LTDA. "Plan de Electrificación Global del Area de CORNARE: Zona IV". Medellín, 1986.
- CHANG, S.Y.; BRILL, Jr., E.; HOPKINS, L. "Use of Mathematical Models to Generate Alternative Solutions to Water Resources Planning Problems". *Water Resources Research*. 18 (1), 58-64. 1982.
- CODESARROLLO. "Bases del Plan Maestro de Desarrollo para el Area de CORNARE". Medellín, 1985.
- COHON, J; MARKS, D. "Multiobjective Screening Models and Water Resources Investments". *Water Resources Research*. 9 (4), 826-832. 1973.
- ; "A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques". *Water Resources Research*. 11 (2), 208-220. 1975.
- CORNARE. "Compendio de Normas Legales y Disposiciones Básicas". Oficina de Planeación. El Santuario, Antioquia. 1985.
- "Enfoque para la Gestión del Desarrollo Regional". Oficina de Planeación. El Santuario, Antioquia. 1986.
- "El intercambio de Servicios: Alternativa para la Gestión de Proyectos Concertados". Oficina de Planeación. El Santuario, Antioquia. 1986a.
- "Estrategia Institucional y Plan de Acción en el Corto Plazo". Oficina de Planeación. El Santuario, Antioquia. 1987.
- "Síntesis Estadística del Area de CORNARE". Oficina de Planeación. El Santuario, Antioquia. 1987a.
- DASGUPTA, P; SEN, A; MARGLIN, S. "Pautas para la Evaluación de Proyectos". *Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial*, New York. 1972.
- ECHEVERRY, R. "Macrozonificación del Area Jurisdiccional de CORNARE y Planteamientos sobre Estrategias". Medellín, 1986.
- GOICOECHEA, A; HANSEN, A; DUCKSTEIN, L. "Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications". Wiley, New York. 1982.
- INTEGRAL. "Plan de Electrificación Global del Area de CORNARE: Zona I". Medellín, 1986.
- MAJOR, D. "Benefit-Cost Ratios for Projects in Multiple Objectives Investments Programs". *Water Resources Research*. 5 (6), 1174-1178. 1969.
- MANJARRES, J. F. "Aproximación al Planeamiento Regional Utilizando Programación Entera Mixta". Tesis de Grado presentada como requisito parcial para optar al Título de Magister en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. *Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional*. Medellín, 1989.
- MEJIA VILLEGAS LTDA. "Plan de Electrificación Global del Area de CORNARE: Zona II". Medellín, 1986.
- RAO, S.S. "Optimization: Theory and Applications". Wiley Eastern, India. Segunda Edición. 1985.
- ROBLES V., J. "Análisis Multiobjetivo en la Planificación de Recursos Hidráulicos y su Aplicación en una Región de Venezuela". CIDIAT, Mérida (Venezuela). 1980.
- SEDIC LTDA. "Plan de Electrificación Global del Area de CORNARE: Zona III". Medellín, 1986.
- UNIVERSIDAD NACIONAL. "Taller de Impacto Ambiental: Informe Final". *Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos*. Medellín, 1987.