

1783  
2000

**LOCALIZACIÓN DE PROYECTOS INTERCONECTADOS, CON BASE EN  
CRITERIOS DE MÍNIMO COSTO AMBIENTAL**

**CLARA INÉS VILLEGAS PALACIO**

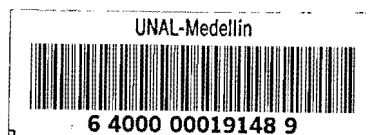
Trabajo de grado elaborado como requisito  
parcial para optar al título de especialista en  
Gestión Ambiental, con énfasis en proyectos  
energéticos.

Asesor: Enrique Angel Sanint. I.C. M.Sc.

Director: Ricardo Smith Quintero. I.C. M.Sc. PhD.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
POSGRADO EN GESTIÓN AMBIENTAL  
SEDE MEDELLÍN

2000



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



Sede Medellín

DEPARTAMENTO DE BIBLIOTECA

## TABLA DE CONTENIDO

### INTRODUCCIÓN

<b>1. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO .....</b>	<b>3</b>
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1. PROYECTOS DE DESARROLLO Y SU RELACIÓN CON EL AMBIENTE .....	5
2.1.1. Grados de aptitud para localización de proyectos en una zona .....	6
2.1.2. Etapas de desarrollo de los proyectos en la fase de planeación y estudios .....	8
2.2. SELECCIÓN DE SITIOS PARA INSTALACIÓN DE TURBOGASES Y CICLOS COMBINADOS .....	9
2.2.1. Descripción general .....	9
2.2.2. Metodología general .....	10
2.2.3. Herramientas utilizadas .....	13
2.3. MÉTODOS CUANTITATIVOS APLICABLES .....	15
2.3.1. Programación lineal .....	15
2.3.2. Ruta del menor costo acumulado .....	19
<b>3. PLANTEAMIENTO DE LOS MODELOS .....</b>	<b>23</b>
3.1. SUPERFICIE DE CRITICIDAD CONSTANTE, SIN RESTRICCIONES .....	25
3.1.1. Análisis utilizando cálculo .....	25
3.1.2. Análisis basado en programación lineal .....	36
3.2. SUPERFICIE DE CRITICIDAD CONSTANTE, CON RESTRICCIONES .....	39
3.3. SUPERFICIE DE CRITICIDAD VARIABLE, SIN RESTRICCIÓN .....	43
3.3.1. Construcción de superficie de costos acumulados de conexión alrededor de un punto .....	43
3.4. SUPERFICIE DE CRITICIDAD VARIABLE, CON RESTRICCIÓN .....	49
<b>4. ALGORITMO PARA ANÁLISIS DE SITUACIONES CON SUPERFICIE DE CRITICIDAD VARIABLE, Y PROGRAMA AMBIENTAL.PRO .....</b>	<b>51</b>
4.1. ASPECTOS GENERALES DEL ALGORITMO .....	51
4.2. ESQUEMA DEL ALGORITMO .....	54
4.3. PROGRAMA AMBIENTAL.PRO .....	58
4.4. INSTALACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA AMBIENTAL.PRO .....	59
4.4.1. Como instalar ambiental.pro? .....	59
4.4.2. Como crear los archivos de datos de entrada para el programa ambiental.pro? .....	60
4.4.3. Cómo se ejecuta el programa ambiental.pro y qué opciones tiene? .....	62
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>66</b>
5.1. SUPERFICIE DE CRITICIDAD VARIABLE, SIN RESTRICCIONES .....	66
5.2. SUPERFICIE DE CRITICIDAD VARIABLE, CON RESTRICCIONES .....	71

### CONCLUSIONES

### RECOMENDACIONES

### BIBLIOGRAFÍA

## **LISTA DE FIGURAS**

- Figura 1. Relación proyecto ambiente – Concepción “ambiente infinito”
- Figura 2. Relación proyecto ambiente – Nueva concepción
- Figura 3. Esquema general. Metodología para selección de sitio. ISAGEN
- Figura 4. Metodología para la selección de sitio.
- Figura 5. Convexidad de conjuntos
- Figura 6. Proyecto interconectado
- Figura 7. Coordenadas de las redes de infraestructura
- Figura 8. Ejemplo
- Figura 9. Ejemplo: Región de soluciones factibles
- Figura 10. Superficie de criticidad constante, con restricciones
- Figura 11. Cruce no permitido de restricción
- Figura 12. Rutas alternativas
- Figura 13. Ejemplo. Rutas alternativas
- Figura 14. Superficie de costos acumulados alrededor del punto (o)
- Figura 15. Corte de superficie de costos acumulados
- Figura 16. Puntos de conexión sobre la red 1
- Figura 17. Ruta de mínimo costo acumulado de conexión
- Figura 18. Superficie de criticidad variable, con restricción.
- Figura 19. Coordenadas mínimas y máximas de las redes
- Figura 20. Ejemplo. Punto dentro del área
- Figura 21. Ejemplo. Figura dentro del área
- Figura 22. Celdas sobre las redes
- Figura 23. Esquema general del algoritmo
- Figura 24. Puntos dentro de la red
- Figura 25. Puntos sobre la red
- Figura 26. Mínimo costo de conexión y rutas.
- Figura 27. Ejemplo. Coordenadas de las redes.
- Figura 28. Ejemplo. Punto óptimo de localización del núcleo del proyecto.
- Figura 29. Ejemplo. Punto óptimo de localización del núcleo del proyecto interconectado.

## AGRADECIMIENTOS

A Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P, por hacer posible la realización de mis estudios de postgrado en Gestión Ambiental con énfasis en proyectos energéticos.

Al Ingeniero Enrique Ángel Sanint, por su invaluable asesoría, su orientación, su paciencia y su confianza.

Al Ingeniero John Freddy Mejía, por sus indispensables aportes en el lenguaje IDL para el desarrollo del presente trabajo.

A mis papás y a mis hermanos por su incondicional presencia siempre.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la problemática ambiental se ha constituido como un factor determinante dentro de los elementos de decisión en el proceso de desarrollo de los proyectos. La gestión ambiental surge entonces como una alternativa conciliadora entre los proyectos de desarrollo y los impactos causados por los mismos, y el medio ambiente; dicha gestión se basa en un conjunto de criterios que la guían de manera sólida, dentro de los cuales se encuentra la optimalidad.

Al realizar cualquier actividad propia de la gestión ambiental, ésta debe llevarse a cabo teniendo en cuenta que “diseñar es optimizar” y por tanto el esfuerzo de conceptualización o de cálculo debe llevarse hasta el punto donde no solamente se proponga una solución, sino que ésta debe ser óptima desde la óptica de algún criterio<sup>1</sup>.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un análisis, que permita que la selección de sitio para la localización de un proyecto interconectado sea óptima desde el punto de vista ambiental; dicha optimización se hace a través de la minimización de los costos tanto de localización del núcleo del proyecto, como de la conexión del mismo a las redes de infraestructura existentes o proyectadas. El análisis se desarrolla para cuatro situaciones posibles:

- ✓ Superficie de criticidad constante, sin restricciones
- ✓ Superficie de criticidad constante, con restricciones
- ✓ Superficie de criticidad variable, sin restricciones
- ✓ Superficie de criticidad variable, con restricciones

El desarrollo del presente trabajo se enmarca en el contenido de cinco capítulos distribuidos de la siguiente manera:

- ✓ Capítulo uno: Planteamiento metodológico en el cual se pretende presentar una idea general de la secuencia analítica que se sigue a lo largo del texto y el papel que cada uno de los elementos expuestos representa en el resultado final.
- ✓ Capítulo dos: Revisión bibliográfica en la cual se hace referencia a las herramientas necesarias para la realización del trabajo: proyectos de desarrollo y su relación con el ambiente, metodología para la selección de sitio desarrollada por ISAGEN y métodos cuantitativos aplicables como programación lineal y ruta de mínimo costo de viaje.
- ✓ Capítulo tres: Planteamiento de los modelos de análisis para las diferentes situaciones que pueden presentarse, haciendo uso de los diferentes métodos cuantitativos descritos en el capítulo dos.
- ✓ Capítulo cuatro: Formulación y descripción del algoritmo y programa desarrollados para el análisis de las situaciones en las que se presenta una superficie de criticidad constante, con y sin restricciones
- ✓ Capítulo cinco: Análisis de resultados, en el cual se presenta un ejemplo utilizando el programa desarrollado, de cada una de las dos situaciones mencionadas en el capítulo cuatro.

Finalmente se presenta un capítulo de conclusiones.

---

<sup>1</sup> Angel S. E, Carmona, S.I. y Villegas L.C. Gestión Ambiental en Proyectos de Desarrollo. Una propuesta desde los Proyectos energéticos. Fondo FEN, Santafé de Bogotá, 1996

## 1. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se da una descripción de orden metodológico que aclara tanto la secuencia analítica que se sigue a lo largo del texto, como el papel que cada uno de los elementos representa en el resultado final.

Este trabajo apunta básicamente a desarrollar un análisis que constituya una herramienta para facilitar la toma de decisiones acerca de la localización de un proyecto interconectado<sup>2</sup>, haciendo uso de métodos cuantitativos como programación lineal y método de mínimo costo de viaje, dicho análisis se planteará con base en criterios de mínimo costo ambiental.

Para lograr el objetivo anteriormente mencionado, se realiza una revisión bibliográfica de los temas que proporcionan un soporte teórico para el desarrollo del análisis.

Inicialmente se exponen algunos elementos generales acerca de los proyectos de desarrollo y su relación con el ambiente, para a partir de dicha relación, introducir conceptos que serán utilizados durante el desarrollo del trabajo, tales como restricciones ambientales y grado de criticidad.

Una vez planteado lo anterior, se hace una descripción de las diferentes etapas por las cuales atraviesa un proyecto durante las fases de planeación y estudios, y las actividades que en ellas se desarrollan en el área ambiental; como una guía para establecer en cuál de dichas etapas pueden realizarse análisis como el que se pretende desarrollar en el presente trabajo.

Seguidamente, se describe la metodología utilizada en el estudio realizado para la Selección y recomendación de sitios adecuados para la instalación de turbogases y ciclos combinados<sup>3</sup>. El desarrollo del presente trabajo complementará tal metodología en una de sus fases. Los turbogases

---

<sup>2</sup> un proyecto que para su desarrollo necesite conexión con infraestructura preexistente o proyectada –para tres redes de conexión–, por ejemplo subestaciones o centrales térmicas a gas.

<sup>3</sup> El gas natural puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica ya sea produciendo vapor en una caldera para mover una turbina de vapor - generador, o como combustible principal en una turbina de gas que mueve un generador. Cuando se quema el gas en la turbina a gas, y los gases de exhosto se utilizan para producir vapor en una caldera de recuperación y mover una turbina a vapor, se denomina ciclo combinado.

y ciclos combinados se consideran como proyectos interconectados ya que necesitan conexión con infraestructura eléctrica, infraestructura vial , red de gasoductos y fuentes de agua.

Posteriormente, se exponen conceptos básicos de algunos métodos cuantitativos como programación lineal y ruta del menor costo acumulado, que serán utilizados en el desarrollo del análisis para la selección del sitio que implique un mínimo costo ambiental de implantación y conexión de un proyecto interconectado.

Una vez revisada la bibliografía, y conocidos los conceptos básicos que permitan realizar el trabajo, se plantean los modelos de análisis para las cuatro situaciones a estudiar dentro del área de estudio:

- ✓ Área de localización del proyecto con superficie de criticidad constante, y sin restricciones
- ✓ Área de localización del proyecto con superficie de criticidad constante, y con restricciones
- ✓ Área de localización del proyecto con superficie de criticidad variable, y sin restricciones
- ✓ Área de localización del proyecto con superficie de criticidad variable, y con restricciones

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos, y algunas conclusiones y recomendaciones obtenidas a través del desarrollo del presente trabajo.



## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

En el presente capítulo se presentan una serie de conceptos básicos referentes a los proyectos de desarrollo y su relación con el ambiente, así como nociones acerca de las diferentes etapas de desarrollo de los mismos en las fases de planeación y estudios. Tales conceptos se presentan como una guía para establecer en cuáles de dichas etapas es factible y útil desarrollar análisis como el que se pretende desarrollar en el presente trabajo.

Igualmente, se presentan los fundamentos teóricos de algunos métodos cuantitativos utilizados en el planteamiento de los modelos de análisis, para las diferentes situaciones a estudiar.

### **2.1. PROYECTOS DE DESARROLLO Y SU RELACIÓN CON EL AMBIENTE<sup>4</sup>**

Las obras que se realizan para garantizar el equipamiento social general, y los proyectos de inclusión e implementación de procesos de transformación de las regiones, tales como grandes explotaciones mineras, centrales de generación eléctrica, líneas de transmisión o distribución eléctrica, explotación y transporte de energéticos fósiles, infraestructura vial y de transporte, apertura de fronteras agrícolas, proyectos industriales y agroindustriales, etc., constituyen proyectos de desarrollo:

Para la planeación, ejecución y puesta en marcha de un proyecto de desarrollo, se requiere aplicar una serie de acciones sobre el medio natural y social, que son las que de manera inmediata ocasionan el impacto ambiental, entendido este como la transformación que se produce en el medio ambiente como resultado de dichas acciones.

Los estudios para el establecimiento de cualquier proyecto de desarrollo, partían de la base de que su relación con el medio circundante no alteraría este último, lo que se puede expresar gráficamente de la siguiente manera:

---

<sup>4</sup> Angel S. E, Carmona, S.I. y Villegas L.C. Gestión Ambiental en Proyectos de Desarrollo. Una propuesta desde los Proyectos energéticos. Fondo FEN, Santafé de Bogotá, 1996

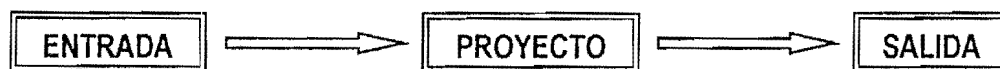


Figura 1. Relación proyecto ambiente – Concepción “ambiente infinito”

Esta concepción refleja que el proyecto es un sistema, pero que el ambiente no lo es; en este caso, el ambiente es capaz de absorber cualquier tipo de salidas, es decir, de efectos que el proyecto pueda producir, y ninguna de ellas tiene repercusión sobre lo que son las entradas futuras para el proyecto; esta concepción se denomina “ambiente infinito”. Los hechos fueron mostrando que esta concepción es errónea y que en su lugar es necesario pensar en un ambiente que interactúa permanentemente con el proyecto.

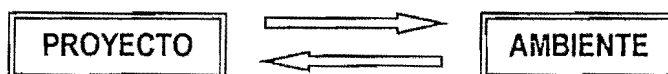


Figura 2. Relación proyecto ambiente – Nueva concepción

Dado que el ambiente no es infinito, y dependiendo de las características ambientales de la zona donde se va a localizar el proyecto, de su grado de intervención, y por tanto de su fragilidad ante el desarrollo de los mismos, ésta puede tener dentro de sí áreas aptas para la ubicación de proyectos y áreas con niveles de complejidad progresivos llamados criticidades, y áreas restringidas para su localización.

### 2.1.1. Grados de aptitud para localización de proyectos en una zona

A continuación se muestra una definición de los términos relacionados con tales grados de aptitud para la localización de proyectos de desarrollo, que serán tenidos en cuenta en el planteamiento de los modelos de análisis para las diferentes situaciones que se pueden presentar en la zona de estudio.

#### 2.1.1.1. Restricción ambiental<sup>5</sup>

Una restricción ambiental, es una limitación total impuesta para la realización de un proyecto sobre un área geográfica determinada en razón de las características ambientales de la misma. Esta limitación se define en función de la legislación específica, de la extrema fragilidad del ambiente, de la amenaza grave del ambiente al proyecto, de los altos costos que impone la complejidad técnica o tecnológica que requiere la implantación del proyecto y de la incompatibilidad con otros proyectos de infraestructura. Las restricciones hacen inviables los proyectos independientemente de la gestión ambiental que se desarrolle.

#### 2.1.1.2. Criticidad ambiental<sup>6</sup>

Se refiere al nivel o grado de dificultad a los que se somete la implantación de un proyecto, en función de la vulnerabilidad del ambiente frente al proyecto, de la amenaza del ambiente al proyecto, de la complejidad de la gestión y de los costos de gestión correspondientes. La criticidad ambiental se determina a partir de la caracterización de los factores ambientales, de los distintos grados de vulnerabilidad propios de los factores ambientales comprometidos en el área potencial de un proyecto, de la complejidad de la gestión que deba adelantarse y de los costos de gestión ambiental asociados a dicha complejidad.

Teniendo en cuenta lo anterior, y partiendo de la base de que tanto el proyecto como el ambiente son sistemas que interactúan constantemente, y que las zonas donde se van a localizar los proyectos tienen diferentes grados o niveles de criticidad, se consideran de gran importancia las acciones que logren minimizar los efectos negativos del proyecto, y potencializar aquellos que reviertan beneficios tangibles desde las diferentes etapas del mismo. A continuación, se muestran

---

<sup>5</sup> ISA. ESTUDIO DE RESTRICCIONES Y POSIBILIDADES AMBIENTALES PARA LOS PROYECTOS DE TRANSMISIÓN. PLAN DE EXPANSIÓN 2001-2010.

<sup>6</sup> Op.cit.

las etapas por las cuales atraviesa un proyecto de desarrollo en las fases de planeación y estudios, antes de ser introducido a una región, ya que es en estas etapas donde se realiza la optimización de proyectos<sup>7</sup>, objetivo del presente trabajo.

### 2.1.2. Etapas de desarrollo de los proyectos en la fase de planeación y estudios<sup>8</sup>

- ✓ Etapa de reconocimiento: En esta etapa se define cómo se conforma el grupo interdisciplinario que estudia los aspectos ambientales del proyecto, y cómo se secuencian en el tiempo las actividades de cada uno de los especialistas que participan en el estudio.
- ✓ Etapa de generación de alternativas: Se busca definir cuáles son las alternativas del proyecto, tanto de localización como tecnológicas, de manera que respete las áreas restrictivas, y minimice el impacto sobre las áreas con criticidad ambiental definida.
- ✓ Etapa de selección de alternativas: Cuál de las alternativas resultantes de la etapa anterior, es la que en su conjunto genera un menor impacto ambiental, suponiendo unas políticas de operación típicas. Tomar decisiones entre alternativas en las que los diversos criterios que intervienen en la formación de la decisión pueden ser expresados en un sistema de medida común puede ser fácil; pero el problema se complica en el momento en que se debe decidir entre proyectos de desarrollo que afectan recursos físicos no negociables, causan deterioro sobre ecosistemas cuyo valor se desconoce y que están implantados en entornos de comunidades con sistemas de valores diferentes al del evaluador. Una solución posible, es fijar juicios de valor, cuantificándolos en un sistema de preferencias expresado como un conjunto de relaciones matemáticas al que se puede llegar por consenso entre los decisores.
- ✓ Etapa de optimización de alternativas: Existe una gran diversidad de técnicas disponibles, y en cada momento del desarrollo de los estudios hay una clase de técnicas que deben utilizarse

---

<sup>7</sup> Proyectos interconectados para este caso

<sup>8</sup> Angel S. E, Carmona, S.I. y Villegas L.C. Gestión Ambiental en Proyectos de Desarrollo. Una propuesta desde los Proyectos energéticos. Fondo FEN, Santafé de Bogotá, 1996

preferencialmente, pues su finalidad coincide con el propósito de esa etapa del estudio, siendo posible la utilización de otras técnicas que desempeñan un papel auxiliar con respecto a la que es central en ese momento. Las técnicas disponibles consisten en procedimientos, expresados como algoritmos matemáticos, provenientes de diferentes análisis, que permiten a través de la representación de un grupo de fenómenos de interés, responder a la pregunta ¿qué pasaría en el sistema si se implementara un cambio particular?, y del otro, definir el punto óptimo de operación de un proceso.

Es importante anotar que cuando se está trabajando en optimización, lo que se hace es representar el fenómeno de interés a través de ecuaciones; el punto óptimo encontrado es aquel que satisface las condiciones impuestas por las mismas, pero debe tenerse en cuenta que muchas veces dicho punto encontrado por medio de la solución a las ecuaciones planteadas, no corresponde con el punto óptimo en la realidad; esto puede ser debido a que existen situaciones que interactúan con el fenómeno que se quiere optimizar, y que son muy difíciles de representar a través de ecuaciones.

## **2.2. SELECCIÓN DE SITIOS PARA INSTALACIÓN DE TURBOGASES Y CICLOS COMBINADOS<sup>9</sup>**

A continuación se presenta la metodología desarrollada por ISAGEN para la selección de sitio en la localización de turbogases y ciclos combinados. Dicha metodología, permitió seleccionar los sitios factibles dentro del territorio nacional, resaltando en cada una de las opciones sus restricciones y ventajas técnica, económicas y ambientales.

### **2.2.1. Descripción general**

ISAGEN S.A. E.S.P. dentro de su plan de expansión de generación eléctrica, desarrolló el Estudio de Factibilidad y Diseño de Turbogases y Ciclos Combinados entre 50 y 300 MW de capacidad, que

---

<sup>9</sup> SELECCIÓN Y RECOMENDACIÓN DE SITIOS ADECUADOS PARA LA INSTALACIÓN DE TURBOGASES Y CICLOS COMBINADOS – METODOLOGÍA Y RESULTADOS, Isagen S.A. E.S.P. Informe presentado al Ministerio del Medio Ambiente. Santafé de Bogotá D.C. Agosto de 1996

le permite hacer la adecuada planeación de sus proyectos térmicos a gas y contar con una serie de proyectos maduros técnica y ambientalmente para ser realizados en el momento que el país lo requiera.

Dado que las plantas térmicas a gas de ciclo abierto tienen modestos requerimientos de espacio, altas eficiencias energéticas, gran limpieza del combustible y una avanzada tecnología en el control de sus efectos ambientales, son compatibles incluso con áreas de uso residencial; esto hizo que existiera un gran número de sitios factibles para su ubicación a todo lo largo y ancho del territorio nacional.

### **2.2.2. Metodología general**

Utiliza un método deductivo que parte de una unidad geográfica amplia que debe presentar unas mínimas características de infraestructura y condiciones ambientales, hasta llegar a sitios donde es altamente factible la ubicación de los proyectos.

El proceso de selección de sitios se llevó en cuatro etapas:

1. Delimitación de zonas potenciales.
2. Delimitación de zonas homogéneas.
3. Selección de áreas factibles.
4. Selección de sitios.

Para cada una de las etapas mencionadas, se definieron criterios de inclusión, exclusión y condicionantes que permiten desde los puntos de vista técnico, económico y ambiental, llegar a la delimitación de cada zona, área o sitio, a partir del análisis realizado en la etapa inmediatamente anterior.

En su orden, las zonas deben ser viables técnicamente para seguir con un análisis ambiental detallado; es decir, se excluyen las zonas que no cumplen con los requerimientos técnicos mínimos para la realización del proyecto. La metodología incorpora desde su primer nivel de análisis las condiciones ambientales que presenten incompatibilidad con el proyecto, lo que garantiza que se

optimice el uso de los recursos naturales y se minimicen los impactos potenciales que pueden ser causados por la construcción y operación del proyecto.

En la siguiente figura se muestra un esquema general de la metodología utilizada en el estudio para la selección de sitios.

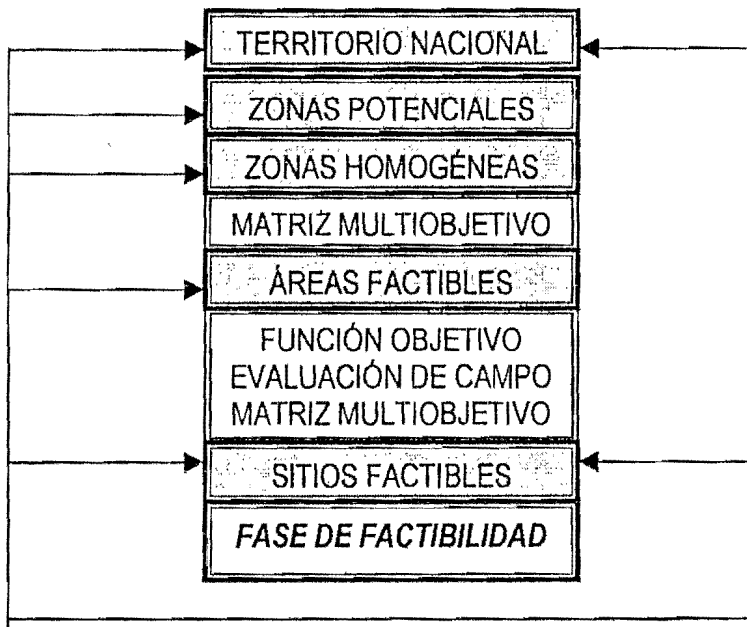


Figura 3. Esquema general. Metodología para selección de sitio. ISAGEN

- ✓ Delimitación de zonas potenciales: Las zonas potenciales son grandes extensiones que presentan características mínimas de infraestructura y condiciones ambientales que permiten desarrollar proyectos termoeléctricos a gas.

- ✓ Delimitación de zonas homogéneas: Las zonas homogéneas son unidades geográficas dentro de las zonas potenciales, que en términos generales poseen cierta similitud en cuanto a oferta técnica y ambiental necesaria para el desarrollo del proyecto.
  
- ✓ Selección de áreas factibles: Las áreas factibles son porciones de territorio dentro de las áreas homogéneas, que en principio no presentan restricciones ambientales para la ubicación del proyecto y que poseen facilidades de conexión a gasoductos, red eléctrica, red vial, y disponibilidad de agua. Para ir de zonas homogéneas a áreas factibles, se hace uso de la evaluación multiobjetivo, que permite comparar varias alternativas de ubicación del proyecto integrando criterios técnicos, económicos y ambientales. La evaluación multiobjetivo se realizó a través de matrices; la "matriz multiobjetivo" está compuesta por los resultados finales de la aplicación de varias matrices independientes que se integran a la primera, la cual en forma ponderada evalúa el resultado de las matrices independientes.
  
- ✓ Selección y recomendación de sitios. La selección de los sitios se llevó a cabo en tres etapas:
  - \* Selección de sitios: Dentro de cada área factible se determinaron los factores comunes y variables entre ellas; los comunes no fueron considerados en la evaluación y los variables se les asignaron valores relativos y están definidos principalmente por la variable distancia del punto de la malla a la red de gasoductos, a la red eléctrica o puntos de conexión, cuerpos hídricos y red vial. Con esos valores se formula una función objetivo que califica cada sitio potencial de ubicación del proyecto en términos de costos relacionados con la adecuación y construcción de la infraestructura requerida.
  
  - \* Evaluación de campo: Las áreas que tienen un menor valor de adecuación o construcción de la infraestructura requerida por el proyecto son sometidas a una evaluación de campo en los aspectos técnico y ambiental para determinar la viabilidad ambiental de cada posible localización y detectar las restricciones y beneficios ambientales o aquellos factores que constituyan un riesgo para el proyecto o para el medio ambiente.



- \* Recomendación y selección de sitios: En esta etapa se realiza nuevamente una evaluación por matriz multiobjetivo teniendo en cuenta los aspectos observados en campo.

### 2.2.3. Herramientas utilizadas

Para el desarrollo del estudio de Selección y recomendación de sitios adecuados para la instalación de turbogases y ciclos combinados, se utilizaron herramientas como sistemas de información geográfica y matrices de evaluación multiobjetivo.

- ✓ Sistemas de Información Geográfica – SIG-: Un SIG puede generar mapas de cualquier información que esté almacenada en bases de datos o tablas que tengan un componente geográfico, esto permite visualizar aspectos que no se pueden apreciar en una base de datos o en un listado simplemente. Lo anterior lo convierte en una herramienta para el manejo de la información en etapas como la planeación, ya que gracias que es un sistema dinámico que permite seleccionar y remover criterios del mapa para analizar cómo los diferentes factores afectan el modelo o el análisis que se esté realizando, ayuda a la toma de decisiones en tales etapas. En síntesis, un SIG es una herramienta computacional que permite almacenar y manipular la información geográfica de una manera eficiente, realizar análisis y modelar fenómenos geográficos<sup>10</sup>.
- ✓ Aplicación de la matriz multiobjetivo: Permite la selección de una o más alternativas a través de un análisis que considera, evalúa, establece y califica factores tales como costos de inversión, tecnología, aspectos biofísicos, sociales, económicos y financieros, además de otros parámetros que condicionan el proceso de selección y factibilidad de una alternativa. De la matriz multiobjetivo global se desprende un análisis comparativo mediante la normalización de los resultados individuales en una sola escala de valoración. Los expertos en cada área estudian cada una de las matrices que conforman la matriz global, para asignarles pesos ponderados y

---

<sup>10</sup> PARRA, R. MARULANDA, J. ESCOBAR, "Sistemas de Información Geográfica" Base de la Gestión Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1997

someterlas a una valoración global y multidisciplinaria que permite elegir la alternativa óptima dentro de un esquema multiobjetivo.

El análisis que se desarrolla en el presente trabajo complementa dicho estudio en el área ambiental, dentro de la fase de selección de sitios donde es altamente factible la ubicación de los proyectos; ya que además de considerar la distancia de la malla a las redes de infraestructura como lo hace la metodología desarrollada por ISAGEN, hace una evaluación más detallada de los costos ambientales dentro de la zona en estudio, y permite de esta manera realizar una optimización de los mismos, seleccionando aquel punto de localización que implique menores costos ambientales dentro de dicha área.

El esquema general de la metodología para la selección de sitio, una vez involucrado el análisis que se desarrolla en el presente trabajo, se presenta a continuación:

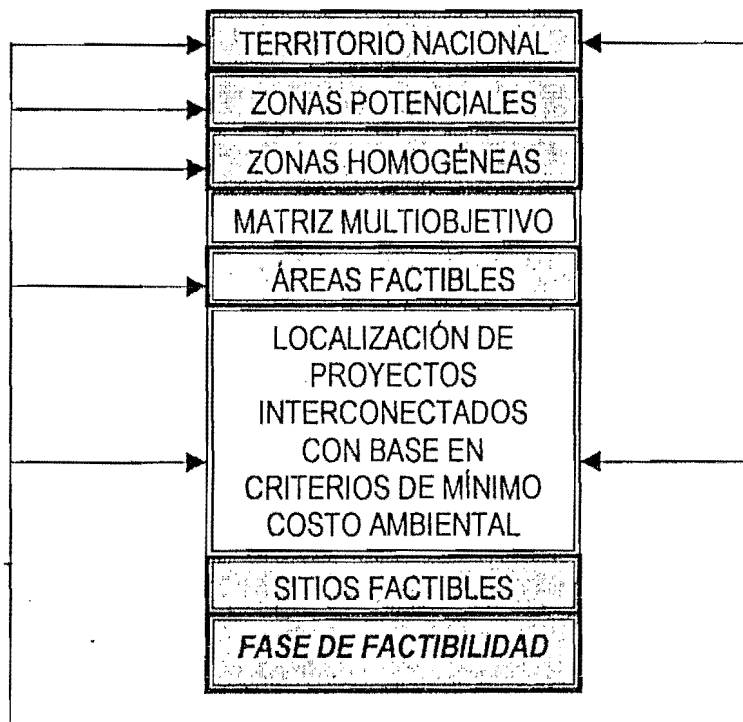


Figura 4. Metodología para la selección de sitio.

## 2.3. MÉTODOS CUANTITATIVOS APLICABLES

### 2.3.1. Programación lineal<sup>11</sup>

#### 2.3.1.1. Generalidades

La programación lineal es una técnica matemática de optimización. Por técnica de optimización, se hace referencia a un método que intenta maximizar o minimizar algún objetivo, por ejemplo, maximizar utilidades, minimizar costos, etc. La programación lineal, es un subconjunto de los procedimientos matemáticos de optimización denominados programación matemática.

Los problemas de programación lineal se ocupan del uso o asignación eficiente de los recursos limitados para alcanzar objetivos deseados, en presencia de funciones objetivo y restricciones lineales.

Los problemas de programación lineal tienen un gran número de soluciones que satisfacen las condiciones del mismo; la selección de una determinada solución como la mejor, depende de cierta meta u objetivo implícito en el planteamiento del problema (función objetivo): una solución que satisfaga tanto las condiciones del problema (restricciones) como el objetivo (función objetivo) dado se denomina solución óptima.

La estructura básica de un problema de programación lineal es maximizar o minimizar una función objetivo satisfaciendo un conjunto de limitaciones o restricciones. Para la formulación de cualquier problema de programación lineal, se emplean las variables de decisión  $x_j$ .

La función objetivo es una representación matemática del objetivo establecido, en términos de las variables de decisión  $x_j$ ; este objetivo como se mencionó anteriormente, puede representar metas tales como niveles de utilidad, ingresos totales, costo total, niveles de contaminación, rendimiento porcentual de una inversión, etc.

---

<sup>11</sup> HILLIER, E.S. LIEBERMAN, G.I. Introducción a la investigación de operaciones. McGraw Hill. Mexico. 1997

El conjunto de restricciones, establecido en términos de las variables de decisión, representa las condiciones que se deben satisfacer en la solución del problema de optimización que se está planteando.

Por ejemplo, cuando se intenta maximizar las utilidades en la producción y venta de un grupo de productos, las restricciones podrían ser los recursos limitados de mano de obra, materias primas limitadas y demanda limitada de los productos.

Para un problema de programación lineal se puede plantear un modelo matemático, o descripción del problema usando relaciones llamadas de línea recta, o lineales. Las ecuaciones lineales tienen la siguiente forma donde las  $a_i$  y la  $b$  son coeficientes conocidos y las  $x_j$  son variables desconocidas que representan las variables de decisión.

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_jx_j + \dots + a_nx_n = b$$

El planteamiento matemático de un problema de programación lineal incluye un conjunto de ecuaciones lineales simultáneas, que representan las condiciones del problema, y una función lineal que expresa el objetivo del mismo y que puede ser maximizada o minimizada. Los problemas de programación lineal son representados de la siguiente manera:

*Maximizar o minimizar:*

*Función objetivo*

*Sujeto a:*

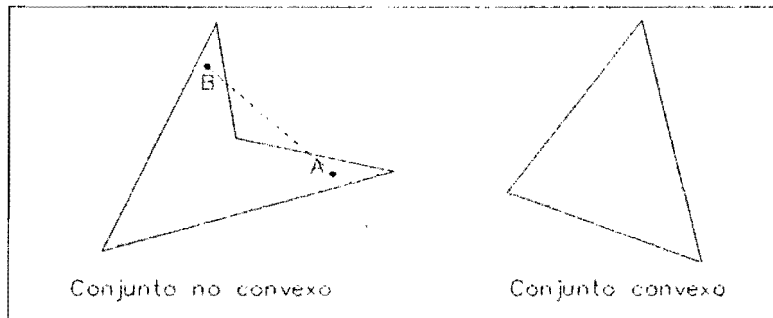
*Restricciones del problema*

### **2.3.1.2. Soluciones de punto en la esquina**

Un conjunto de puntos convexo es un conjunto de puntos cualquiera seleccionados aleatoriamente dentro del área tales que si dos puntos del conjunto seleccionados de forma arbitraria, se unen con una línea recta, todos los elementos sobre el segmento de recta también son miembros del conjunto.

A continuación se muestra la diferencia entre un conjunto convexo y uno no convexo:

Figura 5. Convexidad de conjuntos



En el conjunto no convexo, si se unen los puntos A y B con un segmento de recta, éste contiene muchos puntos que no son parte del conjunto. Esto conduce a enunciados que son de importancia fundamental en programación lineal:

1. El conjunto solución para un grupo de desigualdades lineales, es un conjunto convexo. Por lo que el área de soluciones factibles para un problema de programación lineal es un conjunto convexo.
2. Dada una función objetivo lineal en un problema de programación lineal, la solución óptima incluirá siempre un punto angular en el área de soluciones factibles. Esto es cierto haciendo caso omiso de la pendiente de la función objetivo, y para problemas tanto de maximización como de minimización.

El segundo enunciado implica que cuando una función objetivo lineal se desplaza a través de un área convexa de soluciones factibles, el último punto tocado antes de que se mueva completamente fuera del área contendrá por lo menos un punto en la esquina.

El método de punto en la esquina para resolver problemas de programación lineal, se desarrolla como se enuncia a continuación:

1. Se bosqueja en forma gráfica el área de soluciones factibles
2. Se determinan las coordenadas de cada punto en la esquina sobre el área de soluciones factibles

3. Se evalúa la función objetivo en los puntos en la esquina, para determinar los valores correspondientes de  $z$ .
4. En un problema de maximización, la solución óptima se halla en el punto en la esquina que tenga el mayor valor de  $z$ , y en un problema de minimización, en el punto en la esquina que tenga el menor valor de  $z$ .

Para el ejemplo expuesto anteriormente, los puntos en las esquinas en el área de soluciones factibles son  $(0,0)$ ;  $(0,43.33)$ ;  $(20,30)$  y  $(40,0)$ . Evaluando en estos puntos la función objetivo se obtiene:

Coordenadas del punto $(x_1, x_2)$	$z = 5x_1 + 6x_2$
$(0,0)$	0
$(0,43.33)$	260
$(20,30)$	280
$(40,0)$	200

La solución óptima se da en el punto  $(20,30)$  ya que en el se presenta el mayor valor para la utilidad.

En el método de punto en la esquina existe la posibilidad de que haya más de una solución óptima. Si la función objetivo tiene la misma pendiente que alguna de las restricciones, todos los últimos puntos tocados antes de que la función se mueva hacia afuera del área de soluciones factibles están sobre la recta; en este caso, existiría un número infinito de puntos, cada uno de los cuales resultaría del mismo valor para la función objetivo. Para que existan soluciones óptimas alternativas es necesario que la función objetivo sea paralela a una restricción que forme frontera sobre el área de soluciones factibles en la dirección del movimiento óptimo de la función objetivo.

El sistema de restricciones en un problema de programación lineal puede no tener ningún punto que satisfaga todas las restricciones; en este caso no existen puntos en el conjunto solución, y se dice que el problema de programación lineal no tiene solución factible.

### 2.3.2. Ruta del menor costo acumulado<sup>12</sup>

Los proyectos lineales son aquellos proyectos longitudinales y localizados en corredores en los cuales se imponen restricciones parciales o totales para el uso del suelo;<sup>13</sup> las redes de conexión de un proyecto con la infraestructura proyectada o existente, pueden considerarse como proyectos lineales.

Los proyectos lineales generalmente cruzan diversos ecosistemas y regiones con múltiples características biofísicas, sociales y económicas, y por tanto pueden generar procesos tan complejos como lo son la colonización, deforestación o cambios en el uso del suelo induciendo variaciones en la economía o en la composición demográfica de las regiones, entre otros.

La gestión ambiental de estos proyectos debe estar presente desde sus etapas iniciales, y es en estas etapas donde implica un cambio en la concepción de trazado de los mismos. La ruta más eficiente deja de ser aquella mediante la cual se unen dos puntos con la más corta distancia, sin importar las características y el valor potencial tanto de los recursos naturales como sociales, culturales y económicos de las regiones que atraviesan.

La ruta óptima pasa a ser aquella que además de cumplir con ciertos requerimientos técnicos y económicos exigidos, procura la conservación de los recursos naturales, no genera procesos de sobre-explotación en zonas estratégicas, tiene en cuenta las poblaciones por donde pasa, así como sus implicaciones económicas para la región; es decir, es aquella que siendo técnica y económicamente viable, haga la mínima demanda de recursos naturales y sociales.

Una técnica útil en el momento de determinar la ruta que cumpla con los requerimientos descritos en el párrafo anterior, es la ruta del menor costo acumulado que para el presente trabajo será utilizada en la situación tres, en la cual mediante procedimientos matemáticos, se elige la ruta de menor impacto.

---

<sup>12</sup> ARC VIEW GIS 3.0. ESRI. 1996

<sup>13</sup> Angel, E., Carmona S., Villegas, L.C. Gestión ambiental en proyectos de desarrollo. Fondo FEN. Santafé de Bogotá, 1996

Cabe anotar que el término costo, está asociado a los impactos<sup>14</sup> y no a los costos como valoración económica del impacto ambiental, ni a los valores económicos resultantes de aplicar al impacto ambiental las técnicas normalmente utilizadas para costear externalidades; ni a costos de gestión ambiental asimilados como los costos de gestión en los que se incurre para el manejo del impacto.

A continuación se explica el procedimiento matemático para la obtención de la ruta de mínimo costo acumulado para un proyecto lineal.

Para el análisis se hace uso de arreglos matriciales, es decir, de filas y columnas así:

- ✓ Se parte de una matriz llamada matriz de costo, en la cual cada una de sus celdas contiene el valor de criticidad para la implantación del proyecto en ella, tal como se definió en el numeral 2.1.1.2.
- ✓ Matriz de costo acumulado: cada celda contiene el costo acumulado asociado al desplazamiento de la misma a la celda objetivo, por la ruta de menor costo
- ✓ Matriz de backlink: cada celda indica la dirección que se debe tomar saliendo de ella para conectarse con la ruta óptima, según una convención preestablecida.

Una convención que puede ser adoptada se muestra a continuación:

6	7	8
5	0	1
4	3	2

Para la obtención de la ruta de mínimo costo entre los puntos A y B, utilizando el presente método, el problema debe ser resuelto de atrás hacia adelante, esto es, el análisis se hace de B hacia A.

El costo asociado de desplazarse de una celda a otra (de la celda i a la celda j por ejemplo), se obtiene con la siguiente expresión:

<sup>14</sup> En estrecha relación con el grado de criticidad



$$c_{ij} = \frac{c_i + c_j}{2} * d_{ij}$$

Donde:

$C_{ij}$  es el costo asociado al desplazamiento de la celda  $i$  a la celda  $j$

$C_i$  es el costo asociado a la celda  $i$ .

$C_j$  es el costo asociado a la celda  $j$ .

$d_{ij}$  es la distancia entre las celdas  $i$  y  $j$  medido entre sus centros.

El costo acumulado de una celda se obtiene:

$$CA_j = CA_i + C_{ij}$$

Donde:

$CA_j$  es el costo acumulado de la celda  $j$ .

$CA_i$  es el costo acumulado de la celda  $i$ .

$C_{ij}$  es el costo asociado al desplazamiento de la celda  $i$  a la celda  $j$ .

Ejemplo:

Encuentre la ruta de mínimo costo acumulado para desplazarse de la esquina inferior derecha a la esquina superior izquierda. La matriz de costos asociada al mapa de criticidades es la siguiente<sup>15</sup>:

1	2	2	3	3	2
4	1	5	4	6	2
7	2	8	2	9	1

Como se mencionó anteriormente, para la obtención de la ruta mínimo costo entre las celdas 9 y 1, utilizando el presente método, se analiza la ruta inversa, esto es, el análisis se hace desde la celda 1

<sup>15</sup> Los números que se muestran en la parte izquierda de cada celda, son los utilizados para la identificación de la misma.

hacia 9. Las matrices se van conformando en capas concéntricas alrededor de la celda de interés, es decir, de la celda 1.

Utilizando las ecuaciones mostradas anteriormente para la obtención del costo asociado al desplazamiento de una celda a otra, y el costo acumulado correspondiente a una celda, se obtiene la siguiente matriz:

Matriz de costo acumulado

	0	2.5	5.0
1.5		4.24 ↓ 4.0	6.03 ↓ 7.0 6.03
3.0		3.62 ↓ 5.0	7.53 ↓ 5.12

Backlink

0	5	5
7	5	6
7	6	5

Para determinar cuál es la ruta de menor costo acumulado, se utiliza la matriz de Backlink resultante de los cálculos. Una vez ubicados en la celda de partida, esto es, en la esquina inferior derecha, se sigue la dirección indicada por el número que aparece en la celda, según la matriz de convenciones, así:

0	5	5
7	5	6
7	6	5

### 3. PLANTEAMIENTO DE LOS MODELOS

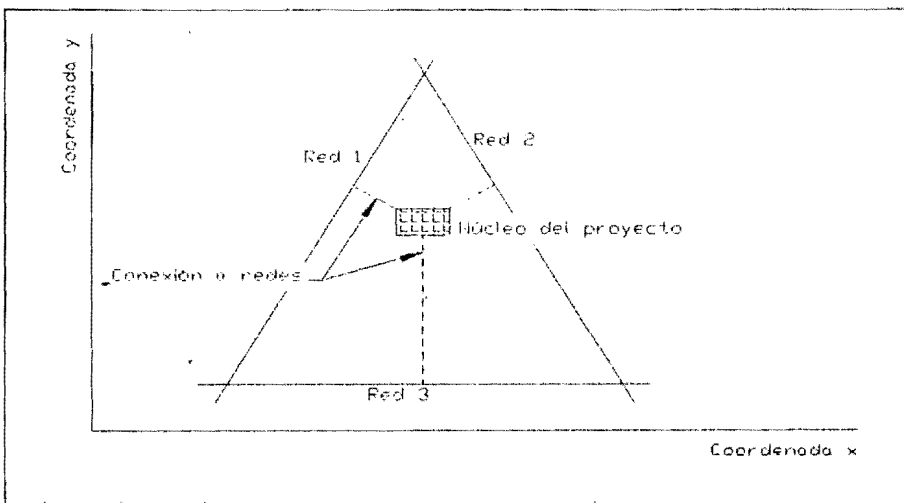
En el presente capítulo, se plantean los modelos de análisis para diferentes situaciones que pueden presentarse en el área de estudio; dicho análisis facilita la toma de decisiones acerca de la localización de un proyecto interconectado, con base en criterios de mínimo costo ambiental.

Para el desarrollo del análisis se tendrán en cuenta las siguientes situaciones posibles en la zona:

- ✓ Área de localización del proyecto con superficie de criticidad constante, y sin restricciones
- ✓ Área de localización del proyecto con superficie de criticidad constante, y con restricciones
- ✓ Área de localización del proyecto con superficie de criticidad variable, y sin restricciones
- ✓ Área de localización del proyecto con superficie de criticidad variable, y con restricciones

Se entiende por proyectos interconectados, aquellos que para su funcionamiento necesitan conexión con elementos de infraestructura preexistente o proyectada. Estos proyectos están constituidos por un núcleo central y por unas redes de conexión a la infraestructura, como se muestra en la siguiente figura. Dentro de estos proyectos, pueden mencionarse las subestaciones y las centrales térmicas.

Figura 6. Proyecto interconectado



Para la localización de un proyecto interconectado, es importante la conexión a infraestructura que provea los servicios necesarios para la operación del mismo. Para el presente análisis, el número de redes de infraestructura a las cuales es necesario conectar el núcleo del proyecto para su operación debe ser mínimo tres, ya que con sólo dos redes, el análisis se convertiría en un asunto trivial, ya que el punto de menor costo en la conexión, sería la intersección de las rectas en estudio.

En el presente trabajo, la zona que será objeto de análisis es aquella que queda enmarcada dentro de las redes a las cuales se desea conectar el núcleo, y que se constituye como la zona probable para la localización del proyecto.

Dependiendo de las características ambientales de dicha zona, pueden presentarse las diferentes situaciones mencionadas, cuyos modelos de análisis se presentan a continuación.

Es importante anotar, que al igual que en la metodología de ruta del mínimo costo acumulado, para los casos de análisis que se exponen a continuación, el término costo, está asociado a los impactos y no a los costos como valoración económica del impacto ambiental, ni a los valores económicos resultantes de aplicar al impacto ambiental las técnicas normalmente utilizadas para costear externalidades; ni a costos de gestión ambiental asimilados como los costos de gestión en los que se incurre para el manejo del impacto.

### 3.1. SUPERFICIE DE CRITICIDAD CONSTANTE, SIN RESTRICCIONES.

Para este caso, el análisis puede realizarse basado en herramientas de cálculo donde se parte del costo calculado a partir del impacto producido por una unidad de longitud de recta de conexión<sup>16</sup> y de la distancia del punto que se está analizando hasta cada una de las redes; o haciendo uso de técnicas como programación lineal, en cuyo caso, la función objetivo es minimizar el costo ambiental producido por la introducción del proyecto a la región<sup>17</sup>, es decir, minimizar el costo de conexión del proyecto a los puntos o redes de infraestructura.

Dado que el criterio utilizado en el presente trabajo para la selección del sitio de localización del núcleo del proyecto es que éste tenga los menores costos, debe considerarse además de los costos de conexión, los costos asociados a la implantación del proyecto en el área requerida para ello.

Se tiene entonces:

$$\text{Costo total} = \text{Costo total de conexión} + \text{costo del núcleo del proyecto}$$

#### 3.1.1. Análisis utilizando cálculo

Como se mencionó anteriormente, para el análisis, se parte del costo de conexión. Dado que en el presente trabajo, el costo está asociado con el impacto producido por la construcción de las obras, el costo de conexión a las redes será entonces, aquel obtenido del producto entre el impacto causado por la construcción de una unidad de longitud de la recta en estudio (un kilómetro, un metro, según el caso), y la longitud de la misma.

$$C_{\text{conexión}} = I_{\text{unitario}} * \text{distancia}$$

Es necesario anotar en este punto que la condición de linealidad supuesta al considerar los impactos unitarios, son un aproximación gruesa al fenómeno, si se tiene en cuenta que el medio ambiente no

<sup>16</sup> p.e.j., el impacto producido por la construcción de un kilómetro de un gasoducto.

<sup>17</sup> Costo de ubicación del núcleo del proyecto + costo de conexión del proyecto

tiene una respuesta lineal a las alteraciones causadas por la intervención de un proyecto de desarrollo.

Para el análisis del presente caso, es necesario conocer el grado de criticidad de la zona donde se va a localizar el proyecto, y a partir de este, tener el impacto por la localización del núcleo del proyecto y los impactos unitarios (impactos por unidad de longitud) asociados con la construcción de cada una de las tres redes de conexión.

De otro lado, es necesario conocer las coordenadas que definen cada una de las rectas de infraestructura existente o proyectada, que permiten delimitar el área de análisis.

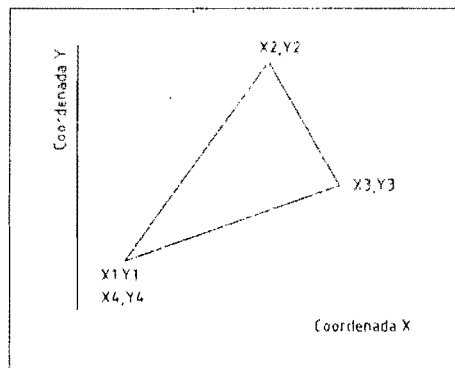


Figura 7. Coordenadas de las redes de infraestructura

Con las coordenadas de los puntos de intersección de las redes  $(X_i, Y_i)$ , pueden definirse las ecuaciones (cálculo de la pendiente e intercepto con el eje vertical) de cada una de ellas, que posteriormente serán utilizadas para la definición de la distancia del punto de análisis localizado dentro del área de estudio, a la recta en cuestión.

- ✓  $m_i$ : pendiente de la recta  $i$ .
- ✓  $b_i$ : intercepto de la recta  $i$ , con el eje vertical.

$$m_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}$$

$$b_i = y_i - m_i * x_i$$

Para evaluar el costo de conexión de un punto a las redes, es necesario calcular la distancia del mismo hasta cada una de las rectas.

La distancia de un punto  $(X_0, Y_0)$  a una recta L cuya ecuación es  $AX + BY + C = 0$  está dada por :

$$d = \frac{|A * X_0 + B * Y_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

Como se tiene la ecuación de las rectas que representan las redes de infraestructura, de la forma  $y = mx + b$ , para encontrar los coeficientes A, B y C de la fórmula correspondiente a la distancia de un punto a una recta, se tiene lo siguiente:

$$Y - y = m(X - x)$$

$$Y - mX + (mx - y) = 0$$

entonces :

$$A = -m$$

$$B = 1$$

$$C = mx - y$$

Donde x y y son las coordenadas de un punto cualquiera sobre la recta cuya ecuación se está transformando.

Reemplazando tales coeficientes en la fórmula de distancia de un punto a una recta, la distancia del punto con coordenadas  $(X_0, Y_0)$  a la red, puede escribirse como:

$$d = \frac{|-mX_0 + Y_0 + (mx - y)|}{\sqrt{(-m)^2 + 1}}$$

Una vez obtenida la distancia del punto a evaluar a cada una de las redes, puede calcularse el costo de localización del proyecto ubicado en dicho punto. Este costo de localización se considera igual al costo de conexión más el costo causado por la ubicación del núcleo del proyecto en dicho sitio.

Costo de localización = costo conexión + costo del núcleo del proyecto

Para esta situación, el costo asociado a la localización del núcleo del proyecto, es constante para todos los puntos del área de estudio, gracias a que la superficie de criticidad es uniforme en toda la zona.

El costo de conexión es la sumatoria de los impactos unitarios de cada red multiplicados por la distancia del punto a cada recta:

$$\text{costo\_conexión} = \sum_1^3 \text{distancia}_i * \text{impacto unit}_i$$

El punto óptimo de ubicación del proyecto, es aquel en el cual el costo de localización (costo de conexión más costo de ubicación del núcleo del proyecto) tiene un valor mínimo; dado que el costo de ubicación del núcleo del proyecto es igual en toda la región gracias que la superficie de criticidad es constante, el punto óptimo será aquel que tenga el mínimo costo de conexión.

Con respecto a los impactos unitarios, pueden presentarse dos situaciones:

1. **Impacto unitario constante.** El impacto que causa la construcción de una unidad de longitud es igual para cada una de las tres redes. Para este caso, el costo de conexión *será mínimo cuando la sumatoria de las distancias del punto que se está evaluando a cada una de las rectas, sea mínima.* Esto resulta obvio si se analiza la ecuación anterior, correspondiente al costo de conexión.

A continuación se presenta un análisis para establecer dónde se hace mínima la sumatoria de las distancias del punto a cada recta:



La distancias desde el punto  $(X_0, Y_0)$  hasta cada una de las redes de conexión, se muestran a continuación:

$$d_1 = \frac{-m_1 X_0 + Y_0 + (m_1 X_1 - Y_1)}{\sqrt{m_1^2 + 1}}$$

$$d_2 = \frac{-m_2 X_0 + Y_0 + (m_2 X_2 - Y_2)}{\sqrt{m_2^2 + 1}}$$

$$d_3 = \frac{-m_3 X_0 + Y_0 + (m_3 X_3 - Y_3)}{\sqrt{m_3^2 + 1}}$$

La función cuyo valor debe ser mínimo será entonces la sumatoria de tales distancias:

$$z = \sum_{i=1}^3 d_i$$

$$z = \frac{-m_1 X_0 + Y_0 + (m_1 X_1 - Y_1)}{\sqrt{m_1^2 + 1}} + \frac{-m_2 X_0 + Y_0 + (m_2 X_2 - Y_2)}{\sqrt{m_2^2 + 1}} + \frac{-m_3 X_0 + Y_0 + (m_3 X_3 - Y_3)}{\sqrt{m_3^2 + 1}}$$

Para evaluar los puntos extremos de la función anterior (máximos y mínimos), es necesario evaluar la derivada con respecto a  $X_0$  y  $Y_0$ . Aquellos puntos en los cuales la primera derivada se hace igual a cero, son los puntos críticos de la función. El signo de la segunda derivada indica si esos puntos críticos son máximos o mínimos, es decir, si la función es cóncava hacia arriba o hacia abajo.

$$\frac{dz}{dX_0} = \frac{-m_1}{\sqrt{m_1^2 + 1}} - \frac{m_2}{\sqrt{m_2^2 + 1}} - \frac{m_3}{\sqrt{m_3^2 + 1}}$$

$$\frac{d^2z}{dY_0 dX_0} = 0$$

Como la segunda derivada es igual a cero, puede concluirse que  $z$  representa un plano. El punto óptimo se encuentra entonces en uno de los vértices, ya que gracias a que en cada uno de ellos la distancia a dos de las redes se hace cero, el costo de conexión se minimiza.

A continuación se evaluará el costo de conexión a las redes para cada uno de los vértices.

- ✓ Vértice con coordenadas  $(X_1, Y_1)$ : en este punto la distancia a las redes 1 y 3 es cero, por ser el punto de intersección de estas dos rectas.

$$z = \frac{-m_2 X_1 + Y_1 + (m_2 X_2 - Y_2)}{\sqrt{m_2^2 + 1}}$$

- ✓ Vértice con coordenadas  $(X_2, Y_2)$ : en este punto la distancia a las redes 1 y 2 es cero, por ser el punto de intersección de estas dos rectas, de donde:

$$z = \frac{-m_3 X_2 + Y_2 + (m_3 X_3 - Y_3)}{\sqrt{m_3^2 + 1}}$$

- ✓ Vértice con coordenadas  $(X_3, Y_3)$ : en este punto la distancia a las redes 2 y 3 es cero, por ser el punto de intersección de estas dos rectas, por lo que:

$$z = \frac{-m_1 X_3 + Y_3 + (m_1 X_1 - Y_1)}{\sqrt{m_1^2 + 1}}$$

Dado que  $z$  es la longitud de la perpendicular que va desde el vértice con coordenadas  $(X_i, Y_i)$  hasta su lado opuesto, puede concluirse  $z$  es una de las alturas del triángulo definido por las tres redes.

Siguiendo con el criterio que define el punto óptimo, como aquel en el cual se minimiza la sumatoria de las distancias del punto que se está evaluando a cada una de las rectas; teniendo en cuenta que dicho punto óptimo se encuentra en uno de los vértices, y que la distancia desde un vértice hasta la red opuesta es una de las alturas del triángulo, puede deducirse que el punto óptimo de localización, será aquel vértice desde el cual parta la menor altura del triángulo definido por las tres redes.

Ejemplo:

Obtener el punto óptimo de localización de un proyecto interconectado a tres redes de infraestructura. Las características de las redes son:

	Red 1	Red 2	Red 3
$X_1$	2	8	11
$X_2$	8	11	2
$Y_1$	2	10	5
$Y_2$	10	5	2
<b>Impacto unitario</b>	3	3	3
<b>Valor criticidad</b>	2	2	2

En la gráfica que se muestra a continuación, se encuentra una representación gráfica del problema. Las rectas  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$  representan las distancias desde los vértices hasta su lado opuesto, es decir, su altura.

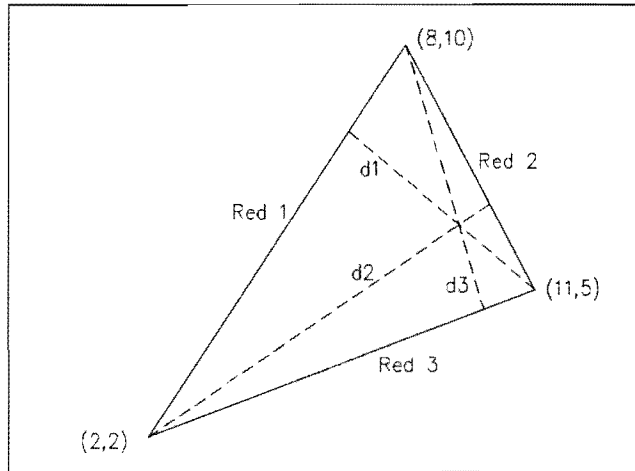


Figura 8. Ejemplo

Para calcular dichas distancias, es necesario primero conocer las ecuaciones de las rectas que representan las redes a donde va a estar conectado el proyecto.

$$m_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}$$

$$m_1 = \frac{10 - 2}{8 - 2} = 1,33$$

Para las otras dos rectas:

RECTA	PENDIENTE
1	1,33
2	-1,66
3	0,33

Las distancias de cada uno de los vértices hasta su lado opuesto se calculan a continuación:

$$d = \frac{|-mX_0 + Y_0 + (mx - y)|}{\sqrt{(-m)^2 + 1}}$$

VÉRTICE	DISTANCIA
(2,2)	D2=9,26
(8,10)	D3=5,69
(11,5)	D1=5,39

La menor altura del triángulo definido por las tres redes es  $d_1$ , el punto de localización del proyecto que minimiza los costos ambientales es aquel desde el cual parte dicha altura, es decir el punto con coordenadas (11,5).

**2. Impacto unitario variable.** El impacto que causa la construcción de una unidad de longitud de las redes es diferente para las tres rectas. Para este caso, el costo de conexión será mínimo cuando la sumatoria del producto entre las distancias del punto que se está evaluando a cada una de las rectas y el impacto unitario causado por la construcción de las conexiones, sea mínima.

$$z = \sum_{i=1}^3 d_i C_i$$

$$z = \frac{-m_1 X_0 + Y_0 + (m_1 X_1 - Y_1) * C_1}{\sqrt{m_1^2 + 1}} + \frac{-m_2 X_0 + Y_0 + (m_2 X_2 - Y_2) * C_2}{\sqrt{m_2^2 + 1}} + \frac{-m_3 X_0 + Y_0 + (m_3 X_3 - Y_3) * C_3}{\sqrt{m_3^2 + 1}}$$

Al igual que en el caso anterior, para evaluar los puntos extremos de la función anterior (máximos y mínimos), es necesario evaluar la derivada con respecto a  $X_0$  y  $Y_0$

$$\frac{dz}{dX_0} = \frac{-m_1}{\sqrt{m_1^2 + 1}} * C_1 - \frac{m_2}{\sqrt{m_2^2 + 1}} * C_2 - \frac{m_3}{\sqrt{m_3^2 + 1}} * C_3$$

$$\frac{d^2z}{dY_0 dX_0} = 0$$

Al igual que en el caso en el que el impacto unitario es constante, como la segunda derivada es igual a cero, puede concluirse que  $z$  es un plano.

A continuación se evaluará en cual de los vértices se encuentra el punto óptimo.

- ✓ Vértice con coordenadas  $(X_1, Y_1)$ : en este punto la distancia a las redes 1 y 3 es cero, por ser el punto de intersección de estas dos rectas.

$$z = \frac{-m_2 X_1 + Y_1 + (m_2 X_2 - Y_2)}{\sqrt{m_2^2 + 1}} * C_2$$

- ✓ Vértice con coordenadas  $(X_2, Y_2)$ : en este punto la distancia a las redes 1 y 2 es cero, por ser el punto de intersección de estas dos rectas.

$$z = \frac{-m_3 X_2 + Y_2 + (m_3 X_3 - Y_3)}{\sqrt{m_3^2 + 1}} * C_3$$

- ✓ Vértice con coordenadas  $(X_3, Y_3)$ : en este punto la distancia a las redes 2 y 3 es cero, por ser el punto de intersección de estas dos rectas.

$$z = \frac{-m_1 X_3 + Y_3 + (m_1 X_1 - Y_1)}{\sqrt{m_1^2 + 1}} * C_1$$

El punto óptimo será aquel vértice para el que el producto entre la altura y el impacto unitario de la red sea menor.

Ejemplo:

Para las redes del ejemplo anterior, encontrar el punto óptimo de conexión del proyecto si los impactos unitarios por la construcción de las redes de conexión son diferentes para cada una de las redes, como se muestra a continuación.

	Red 1	Red 2	Red 3
X <sub>1</sub>	2	8	11
X <sub>2</sub>	8	11	2
Y <sub>1</sub>	2	10	5
Y <sub>2</sub>	10	5	2
<b>Impacto unitario</b>	3	2	1
<b>Valor criticidad</b>	2	2	2

Para este caso no se evalúan sólo las distancias a las redes, sino el valor del producto entre dichas distancias y el valor del impacto unitario causado por la construcción de la red.

$$z_1 = \frac{|-m_1 X_0 + Y_0 + (m_1 X_1 - Y_1)|}{\sqrt{m_1^2 + 1}} * C_1$$

$$z_1 = \frac{|-1.33 * 11 + 5 + (1.33 * 2 - 2)|}{\sqrt{1.33^2 + 1}} * 3 = 16,17$$

VÉRTICE	Z
(2,2)	18,52
(8,10)	5,69
(11,5)	16,17

En este caso, el punto óptimo estaría localizado entonces en el vértice con coordenadas (8,10)

### 3.1.2. Análisis basado en programación lineal.

Partiendo de los conceptos presentados en numerales anteriores correspondientes a las soluciones de punto en la esquina para problemas de programación lineal, y particularmente del enunciado que dice : *“Dada una función objetivo lineal en un problema de programación lineal, la solución óptima incluirá siempre un punto angular en el área de soluciones factibles. Esto es cierto haciendo caso omiso de la pendiente de la función objetivo, y para problemas tanto de maximización como de minimización”*, puede concluirse que la solución se encuentra en uno de los vértices.

Siguiendo el método de punto en la esquina para resolver problemas de programación lineal, se tiene lo siguiente:

- ✓ Se bosqueja en forma gráfica el área de soluciones factibles: el área de soluciones factibles para este caso, es el triángulo formado por la intersección de las tres redes con las cuales va a ser conectado el proyecto.
- ✓ Se determinan las coordenadas de cada punto en la esquina sobre el área de soluciones factibles: Estas coordenadas corresponden a los puntos  $(X_1, Y_1)$ ,  $(X_2, Y_2)$ ;  $(X_3, Y_3)$ .
- ✓ Se evalúa la función objetivo en los puntos en la esquina para determinar los valores correspondientes de z.: en este caso la función objetivo es :

$$z = \sum_{i=1}^3 d_i * C_i$$



- ✓ En un problema de maximización, la solución óptima se halla en el punto en la esquina que tenga el mayor valor de  $z$ , y en un problema de minimización, en el punto en la esquina que tenga el menor valor de  $z$ .

Ejemplo:

Resolver el ejemplo anterior basado en los métodos de programación lineal

Utilizando el método de soluciones de punto en la esquina:

- ✓ Se bosqueja en forma gráfica el área de soluciones factibles:

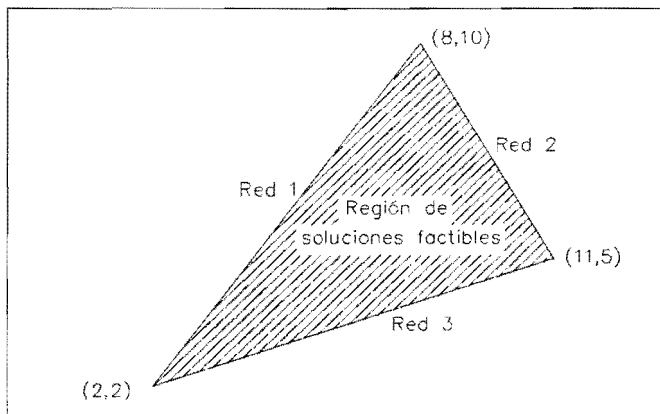


Figura 9. Ejemplo: Región de soluciones factibles

- ✓ Se determinan las coordenadas de cada punto en la esquina sobre el área de soluciones factibles: Estas coordenadas corresponden a los puntos  $(2,2)$ ,  $(8,10)$ ;  $(11,5)$ .
- ✓ Se evalúa la función objetivo en los puntos en la esquina para determinar los valores correspondientes de  $z$ .

$$z_1 = \frac{| -m_1 X_0 + Y_0 + (m_1 X_1 - Y_1) |}{\sqrt{m_1^2 + 1}} * C_1$$

$$z_1 = \frac{| -1.33 * 11 + 5 + (1.33 * 2 - 2) |}{\sqrt{1.33^2 + 1}} * 3 = 16,17$$

$$z_2 = \frac{| -m_2 X_0 + Y_0 + (m_2 X_2 - Y_2) |}{\sqrt{m_2^2 + 1}} * C_2$$

$$z_2 = \frac{| 1.66 * 2 + 2 + (-1.66 * 8 - 10) |}{\sqrt{1.66^2 + 1}} * 2 = 18,52$$

$$z_3 = \frac{| -m_3 X_0 + Y_0 + (m_3 X_3 - Y_3) |}{\sqrt{m_3^2 + 1}} * C_3$$

$$z_3 = \frac{| -0.33 * 8 + 10 + (0.33 * 11 - 5) |}{\sqrt{0.33^2 + 1}} * 1 = 5.69$$

- ✓ En un problema de maximización, la solución óptima se halla en el punto en la esquina que tenga el mayor valor de z, y en un problema de minimización, en el punto en la esquina que tenga el menor valor de z. Dado que este es un problema de minimización, la solución se encuentra en aquel punto de la esquina en la que la función objetivo se hace mínima, es decir en el punto (8,10).

En este caso es posible hacer el análisis utilizando herramientas como el método gráfico de programación lineal, gracias a la sencillez del problema que se está analizando: tres redes que se cruzan. La utilización de dicha herramienta deja de ser tan clara en el caso en el que el problema se vuelve un poco más complejo, por ejemplo cuando las redes están conformadas por varias rectas, es decir, cuando son polilíneas, o cuando de cada red existen varias rectas, por ejemplo, varias redes de transmisión a las cuales se puede hacer la conexión, o varios gasoductos, etc.

### 3.2. SUPERFICIE DE CRITICIDAD CONSTANTE, CON RESTRICCIONES

Una restricción, como se mencionó anteriormente, es una zona que tiene una limitación total impuesta para la realización de un proyecto sobre un área geográfica determinada, en razón de las características ambientales. Las restricciones hacen inviables los proyectos independientemente de la gestión ambiental que se desarrolle, es por esto que para este caso, debe evitarse que el proyecto quede localizado en la zona de restricción y que alguna de las redes de conexión atraviesen tal región.

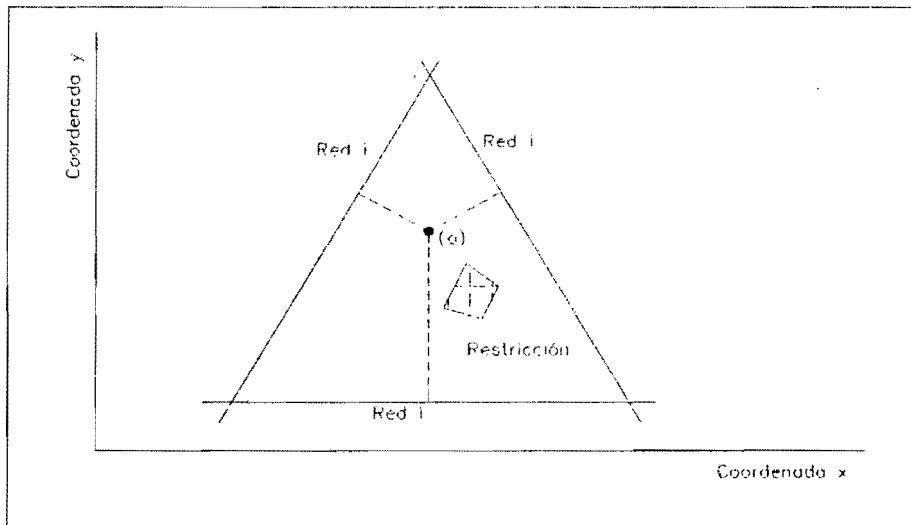


Figura 10. Superficie de criticidad constante, con restricciones

Con un análisis análogo al del caso anterior, podría pensarse que para esta situación, el punto óptimo se encuentra en uno de los vértices, pero en este caso no es posible hacer tal generalización<sup>18</sup>, ya que la altura puede estar atravesando la restricción como se muestra en la gráfica siguiente, situación que no es permitida.

<sup>18</sup> Cuando el impacto unitario es constante, el punto óptimo es el vértice desde el cual parte la mínima altura, y cuando el impacto unitario es variable, el punto óptimo será aquel donde el producto entre la altura y el impacto unitario se haga mínima.

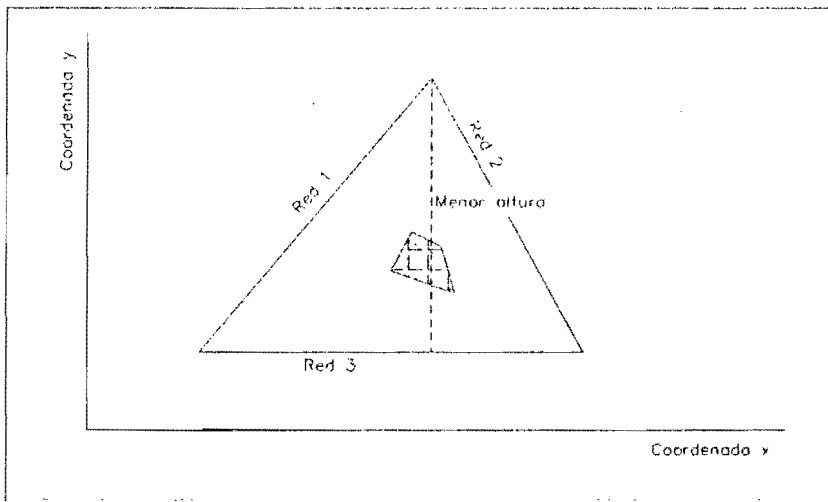


Figura 11. Cruce no permitido de restricción

Cuando se presenta esta situación, se hace necesario la realización de un análisis adicional que permita la determinación del vértice en el que los costos de conexión sean mínimos, para los casos en los cuales el impacto unitario es constante, y variable:

1. **Impacto unitario constante.** Una vez establecidas rutas alternativas que no atraviesen la restricción para la conexión del proyecto, se comparan ya sea con las demás alturas, o con las demás rutas alternativas ( en el caso que todas las alturas crucen la restricción), para entre ellas seleccionar la menor, y de esta manera obtener el punto óptimo. Las rutas alternativas se construyen trazando<sup>19</sup> una tangente hasta la restricción, y una perpendicular desde la red a la cual se va a hacer la conexión. Si la tangente y la perpendicular no se cruzan una vez toquen la restricción, éstas deben unirse bordeando la restricción como se ilustra a continuación:

<sup>19</sup> Desde el vértice que se esté analizando

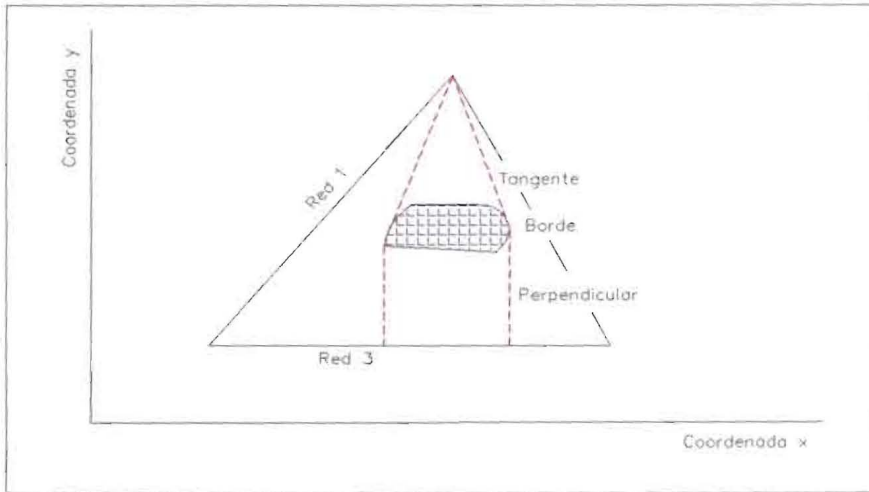


Figura 12. Rutas alternativas

En la siguiente gráfica, se muestra un ejemplo de las diferentes rutas alternativas que se construyen alrededor de una restricción para compararlas y seleccionar la menor.

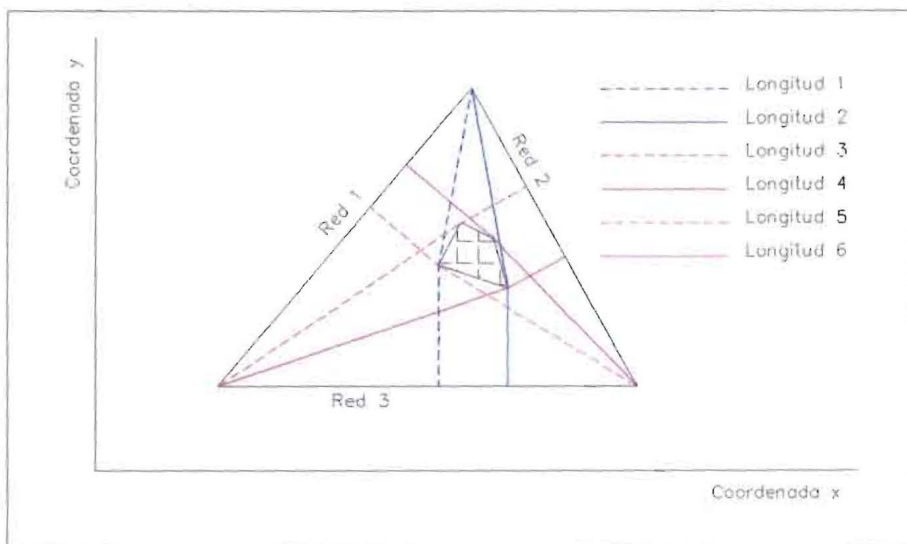


Figura 13. Ejemplo. Rutas alternativas

En este caso deben compararse:

- a. Longitud 1 vs. Longitud 2, y seleccionar la menor.
- b. Longitud 3 vs. Longitud 4, y seleccionar la menor.
- c. Longitud 5 vs. Longitud 6, y seleccionar la menor.
- d. Seleccionar la menor longitud entre a., b., y c.

El vértice en el que se encuentra el punto óptimo, es decir el de mínimo costo de conexión, será aquel a partir del cual se presente la mínima distancia entre las evaluadas.

2. **Impacto unitario variable.** Para este caso se hace un análisis análogo al anterior, pero esta vez considerando los impactos unitarios generados, es decir, en este caso el vértice en el que se encuentra el punto óptimo no será aquel a partir del cual se presente la mínima distancia entre las evaluadas, sino en el que se presente el menor producto entre la distancia y el impacto unitario, al igual que en la situación anterior.

### 3.3. SUPERFICIE DE CRITICIDAD VARIABLE, SIN RESTRICCIÓN

Para el análisis del presente caso, se plantea la siguiente alternativa:

#### 3.3.1. Construcción de superficie de costos acumulados de conexión alrededor de un punto

Una alternativa para el análisis del presente caso, se desarrolla a partir de la evaluación de los costos acumulados de construcción de la red de conexión, para una malla de puntos que se encuentra en el área de estudio, es decir, aquella área delimitada por las tres rectas correspondientes a la infraestructura a la cual se va a conectar el proyecto.

Para la realización de dicha evaluación, se hace necesario conocer el valor de la superficie de criticidad para cada uno de los puntos mencionados, ya que a partir de dicho valor se construye la superficie de costos acumulada por la construcción de las redes de conexión alrededor de cada uno de los puntos de la red.

Aquí es necesario considerar que la superficie de criticidad puede ser diferente para cada una de las redes, considerando las diferencias en los impactos ambientales causados por la construcción de los mismos. Para la evaluación se debe conocer entonces el valor de las tres superficies de criticidad y de la relacionada con la construcción del núcleo del proyecto interconectado.

Alrededor de cada uno de los puntos contenidos en el área delimitada por las tres redes, y utilizando la técnica de ruta del mínimo costo acumulado explicada en capítulos anteriores, se construye la superficie de costos acumulados por la construcción de cada una de las redes de conexión utilizando la superficie de criticidad de cada red. En la figura que se muestra a continuación, se esquematiza la superficie de costos acumulados generados por la construcción de la conexión a la red que se muestra en color rojo; dicha superficie es construida alrededor del punto (O).

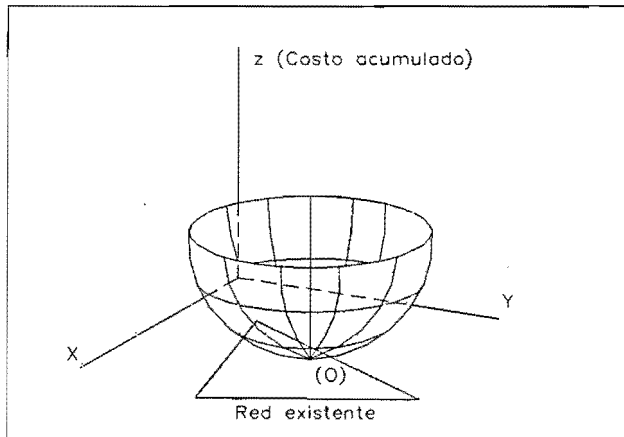


Figura 14. Superficie de costos acumulados alrededor del punto (o)

Para obtener el mínimo costo acumulado de conexión, partiendo de la superficie construida de costos acumulados, se proyecta sobre tal superficie, la red a la cual se está evaluando el costo de conexión. El punto mínimo de la curva que se obtiene de tal corte, representa el costo mínimo acumulado de conexión del punto (O) a la red que se está proyectando. Lo anterior se muestra en la siguiente figura, donde la superficie de costos acumulados es cortada por el plano resultante de la proyección de la red existente (plano con achurado azul).

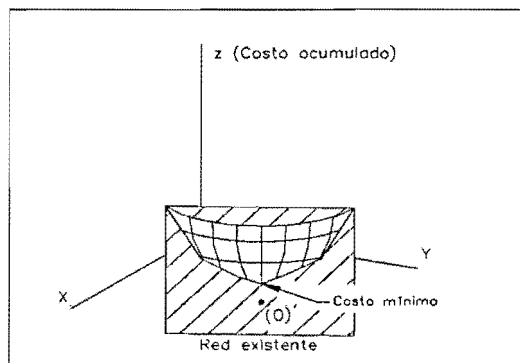


Figura 15. Corte de superficie de costos acumulados

Una vez seleccionados los costos mínimos acumulados de conexión a cada red, se calcula el costo total de la conexión, como la sumatoria de dichos costos mínimos acumulados. La diferencia entre los impactos causados sobre el ambiente, por la construcción de diferentes obras (línea de



transmisión, carretera y gasoducto), ya fue tomada en cuenta cuando se consideró una superficie de criticidad diferente para cada red.

$$\text{costo\_conexión} = \sum_{i=1}^3 z_i$$

Donde:

Costo\_conexión: costo total de conexión (costo de conexión a gas, a vía, a línea de transmisión)

Z<sub>i</sub>: costo acumulado de construcción de recta ;

En este caso, a diferencia de los dos casos anteriores, y teniendo en cuenta que las superficies de criticidad son variables, es importante para determinar el costo total de localización del proyecto en el punto de coordenadas (x,y), evaluar el costo asociado con la construcción de las obras del núcleo del proyecto interconectado siendo entonces el costo total del proyecto, la suma del costo de conexión y el costo del núcleo del proyecto.

$$\text{Costo localización} = \text{costo del núcleo del proyecto} + \text{costo conexión.}$$

Para desarrollar el análisis con el procedimiento anteriormente descrito, es necesario conocer la superficie de costos acumulados de conexión (ver figura ), para a partir de ella, y de la ecuación de la recta con la cual se está evaluando el costo de conexión, obtener el valor del punto mínimo<sup>20</sup> de la curva resultante del corte explicado en párrafos anteriores (ver figura).

Dentro de las características de la superficie de costos acumulados, puede mencionarse que es una superficie cóncava hacia arriba dado que el valor del costo acumulado de conexión de un punto determinado, necesariamente crece al alejarse de él.

---

<sup>20</sup> Que representa el mínimo costo acumulado de conexión

Además dicha superficie, no es en general expresable de manera analítica puesto que la forma de tal superficie depende de las condiciones específicas de cada problema, lo que imposibilita su generalización.

Las características y condiciones descritas, hacen que matemáticamente sea imposible generalizar la ecuación de la curva resultante del corte y por tanto determinar el valor del costo mínimo acumulado por la conexión a cada una de las rectas, lo que conduce a la necesidad de implementar un algoritmo para resolver el problema de manera numérica.

Dado que la realización del cálculo de costos presupone una malla de puntos a los cuales se les han asociado las características de criticidad, el análisis anterior ha de efectuarse sobre una superficie en la cual la información geográfica se ha discretizado en celdas.

En este caso, para la obtención del mínimo costo de conexión entre un punto y una red, es necesario establecer el costo de conexión entre este y cada uno de los puntos o celdas que están sobre la red, y que pertenecen a la malla de puntos. En la siguiente figura se ilustra lo anterior para la red 1; las celdas con achurado azul son aquellas con las cuales debe evaluarse el costo de conexión del punto rojo.

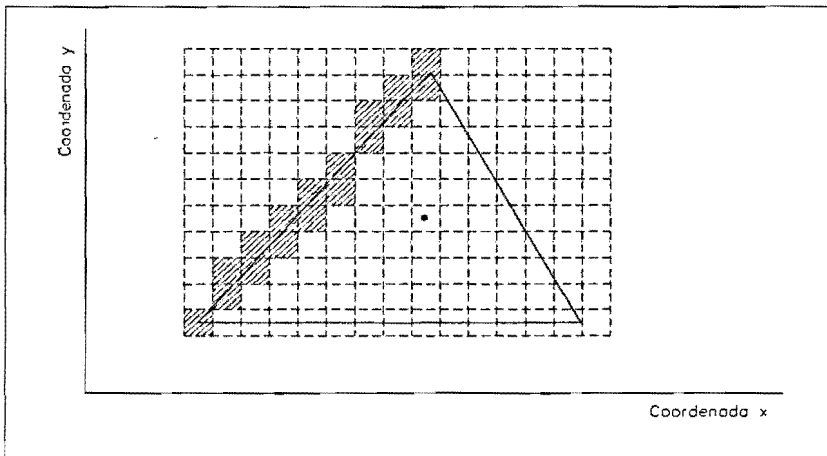


Figura 16. Puntos de conexión sobre la red 1

Una vez determinados esos puntos o celdas sobre la red, y utilizando la teoría de ruta del menor costo acumulado, se determinan los costos de realizar la conexión desde el punto interior del área de estudio hasta la red y la ruta para hacerlo. De esos costos obtenidos, se selecciona el menor, y ese sería el mínimo costo acumulado de conexión desde el punto de coordenadas  $(x, y)$  hasta la red de análisis, como se muestra en la siguiente figura donde la ruta de menor costo dentro de las mínimas, es mostrada con color rojo. Este análisis se realiza para las tres rectas a las cuales se desea conectar el proyecto.

En caso de existir sobre las redes puntos forzados de conexión, es decir, puntos que seleccionados con base en criterios técnicos a los cuales es más conveniente hacer la conexión se realiza el análisis ya no sobre cada uno de los puntos o celdas que se encuentran sobre la red, sino sólo sobre aquellos a los cuales es forzada la conexión.

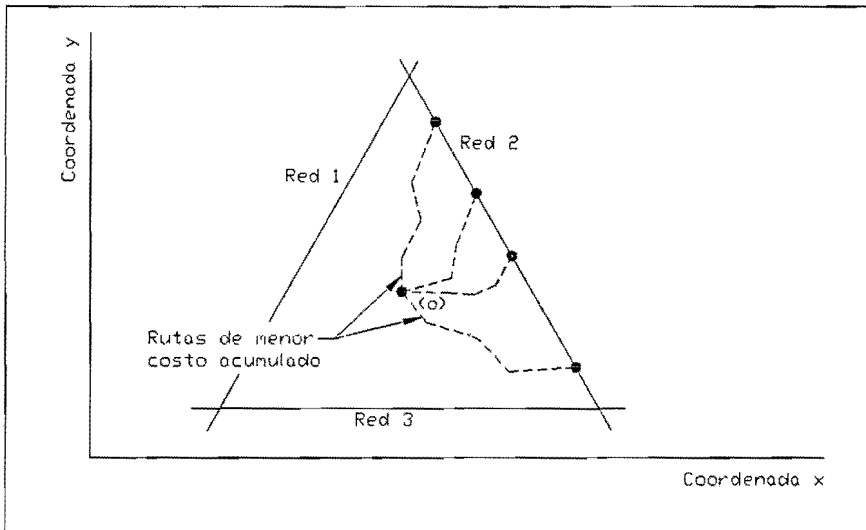


Figura 17. Ruta de mínimo costo acumulado de conexión

Una vez seleccionados los costos mínimos acumulados de conexión a cada red, se calcula el costo total de la conexión, como la sumatoria de dichos costos mínimos acumulados.

Además de los costos de conexión, deben considerarse también, los costos asociados a la implantación del núcleo del proyecto en el punto de análisis.

$$\text{costo\_conexion} = \sum_{i=1}^3 z_i$$

Costo localización = costo núcleo del proyecto + costo conexión.

Lo anterior se realiza para todos los puntos de la malla; aquel que tenga el menor valor de costo de localización, será el punto que implique menores costos ambientales para la realización del proyecto.

### 3.4. SUPERFICIE DE CRITICIDAD VARIABLE, CON RESTRICCIÓN

El análisis se desarrolla de manera similar al escenario anterior, con la diferencia que en este caso deben respetarse las restricciones, esto es, el núcleo del proyecto no debe estar localizado en la zona de restricción, y las redes de conexión a la infraestructura no la pueden atravesar. Para ello, pueden asignarse a las celdas que se encuentran sobre la restricción, valores de criticidad altos.

Cuando a la zona de restricción se le asignan valores altos de criticidad, la ruta de mínimo costo acumulado evitará pasar por dicha zona. De igual manera, al tener grandes valores en su grado de criticidad, los puntos ubicados en las zonas de restricción, implican grandes costos en la localización del núcleo del proyecto, lo que hace que estos puntos no sean elegidos como puntos óptimos, conduciendo de esta forma a que se respeten las zonas de restricción.

En la figura que se muestra a continuación, las celdas con achurado azul son aquellas que deben tener un valor mayor en la criticidad, para evitar que el núcleo del proyecto quede localizado en la zona de restricción, y que las redes de conexión pasen por allí.

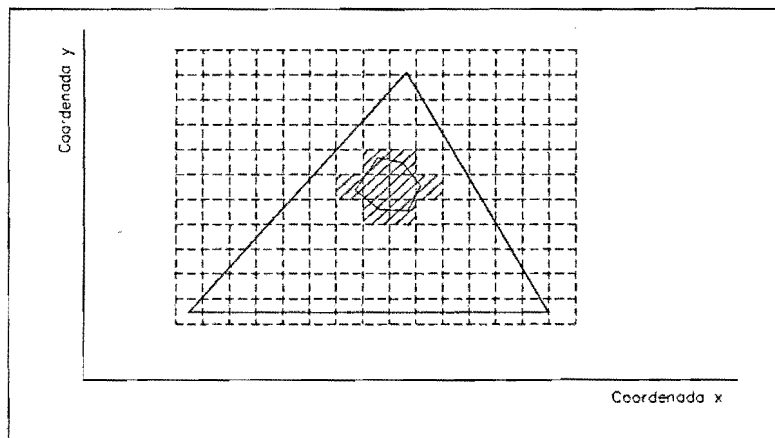


Figura 18. Superficie de criticidad variable, con restricción.

Una vez asignados dichos valores de criticidad, se procede de igual manera que en la situación anterior: para cada punto de la malla establecida, se obtiene el mínimo costo de conexión entre éste y cada una de las redes. El costo total de localización del proyecto será:

$$\text{costo\_localización} = \text{costo\_conexión} + \text{costo\_núcleo}$$

$$\text{costo\_conexión} = \sum_{i=1}^3 \text{costo\_conexión\_red}_i$$

Cuando se hayan calculado los costos totales de localización para cada uno de los puntos de la malla que se encuentran dentro del área delimitada por las tres redes, se selecciona el menor de estos, constituyéndose éste como punto óptimo de localización del proyecto interconectado.

#### **4. ALGORITMO PARA ANÁLISIS DE SITUACIONES CON SUPERFICIE DE CRITICIDAD VARIABLE, Y PROGRAMA AMBIENTAL.PRO**

Para el análisis de las situaciones para las cuales se tienen superficies de criticidad variables, se desarrolló un algoritmo que selecciona el punto óptimo de localización de proyectos interconectados; esto debido a que el análisis de tales casos tienen implícitos una gran cantidad de operaciones en el cálculo del mínimo costo acumulado de conexión, lo que haría bastante dispendioso la realización de dicho análisis manualmente.

##### **4.1. ASPECTOS GENERALES DEL ALGORITMO**

El algoritmo desarrollado, parte de las coordenadas de las rectas que representan las redes de infraestructura a las cuales se va a conectar el proyecto, del grado de criticidad de la zona, y selecciona el punto(s) de localización del proyecto que implique el menor costo ambiental<sup>21</sup>.

Para su descripción, el algoritmo puede dividirse en tres partes:

- La parte inicial es la de entrada de datos; dentro de los datos a ingresar se encuentran las coordenadas de las redes de infraestructura. Partiendo de dichas coordenadas, el algoritmo calcula el número de filas y columnas de la matriz de criticidad. Los valores de las criticidades de cada una de las celdas de dicha matriz, deben ser ingresados por el usuario, para posteriormente ser utilizados en el cálculo del costo mínimo acumulado de conexión de un punto a las redes, utilizando el método de ruta del menor costo acumulado.

---

<sup>21</sup> término que está asociado a los impactos y no a los costos ambientales como valoración económica del impacto ambiental.



Adicionalmente, el algoritmo, basado en las coordenadas de las rectas a las cuales se desea hacer la conexión, evalúa cuáles de los puntos están ubicados dentro del área delimitada por las tres redes, para hacer el análisis del costo de localización del proyecto.

Dado que los puntos a evaluar deben estar contenidos dentro del área establecida por las tres redes, para optimizar los cálculos realizados y efectivamente evaluar sólo aquellos que se encuentren en tal área, es necesario hacer dos delimitaciones del área a evaluar:

1. Evaluar sólo aquellos que están dentro de las coordenadas mínimas, esto es, desde la coordenada menor hasta la coordenada mayor en el eje horizontal ( $X_0$  a  $X_n$ ), y desde la coordenada menor hasta la coordenada mayor en el eje vertical ( $Y_0$  a  $Y_n$ ):

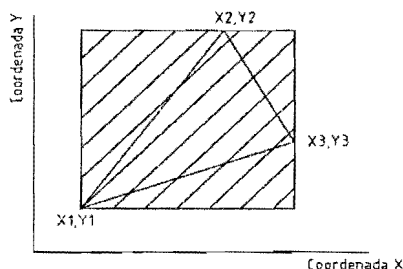


Figura 19. Coordenadas mínimas y máximas de las redes

2. Como puede observarse en la gráfica anterior, si se evalúa el costo de conexión de cada uno de los puntos contenidos en el área achurada, se estarían evaluando puntos que están por fuera del área delimitada por las redes, es por esto que se hace necesario incluir un segundo criterio para definir cuáles de esos puntos de la región achurada se analizan.

El criterio a utilizar es el de la suma de las áreas:

Desde el punto a evaluar se traza una línea a cada uno de los vértices del triángulo formado por las redes. Si la sumatoria de los valores absolutos de las áreas de los triángulos que se forman con estas líneas es igual al área del triángulo formado por las redes, el punto se encuentra contenido en el área de análisis, si el resultado de dicha sumatoria es diferente al área en mención, el punto está fuera del área de análisis.



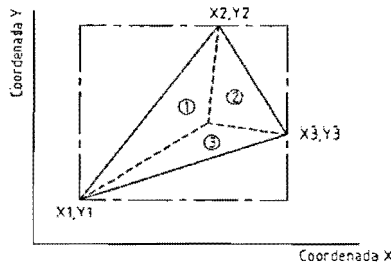


Figura 20. Ejemplo. Punto dentro del área

Como  $(|\text{área1}| + |\text{área2}| + |\text{área3}|) = \text{área total}$ , el punto está dentro del área delimitada por las redes.

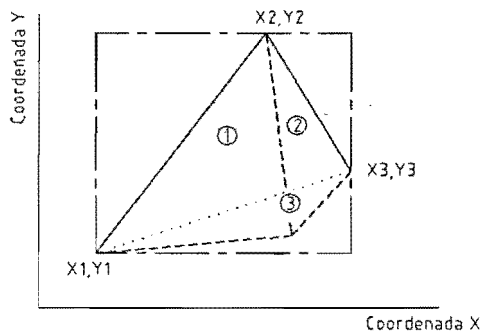


Figura 21. Ejemplo. Figura dentro del área

En la gráfica anterior, como  $(|\text{área1}| + |\text{área2}| + |\text{área3}|) > \text{área total}$ , el punto está fuera del área delimitada por las redes.

Para el cálculo de las áreas se utiliza el método de los productos cruzados:



$$\text{Área} = \frac{1}{2} * [(X_3 * Y_2 + X_1 * Y_3 + X_2 * Y_1) - (X_2 * Y_3 + X_3 * Y_1 + X_1 * Y_2)]$$

- En la segunda parte del algoritmo se efectúa el cálculo del costo de localización del proyecto en un punto de coordenadas (x,y).

El costo de localización del proyecto, como se explicó anteriormente está constituido por el costo de implantación del mismo en la zona, y por el costo de conexión a las redes; este último es realizado por el algoritmo con base en el método de ruta de menor costo de viaje. El algoritmo evalúa para este fin, el costo de conexión del punto de coordenadas  $(x,y)$  a cada una de las redes, siendo el costo total de conexión la sumatoria de dichos costos mínimos acumulados.

El algoritmo evalúa el costo de conexión a cada uno de dichos puntos y selecciona el menor.

- En la parte final, el algoritmo hace la comparación entre los costos de localización del proyecto en los puntos con coordenadas  $(x,y)$ , y selecciona aquel cuyo costo sea menor.

## 4.2. ESQUEMA DEL ALGORITMO

A continuación se presenta un esquema general de la estructura del algoritmo que fue implementado en lenguaje IDL y cuyo código se muestra en el anexo 1.

### Inicio

#### 1. Entrada De Datos

Los datos a ingresar son:

Valores de la matriz de criticidad para la red 1.

Valores de la matriz de criticidad para la red 2.

Valores de la matriz de criticidad para la red 3.

Valores de la matriz de costos de ubicación del núcleo del proyecto

Coordenadas de las rectas que representan las redes de infraestructura

Valor del incremento en x, esto es, el valor del tamaño de la celda o pixel en el eje x

Valor del incremento en y, esto es, el valor del tamaño de la celda o pixel en el eje y

2. Identifica cuáles de los puntos de la matriz están ubicados en la región delimitada por las tres rectas, utilizando el criterio de la suma de las áreas.
3. Identifica cuáles de los puntos de la matriz están localizados sobre alguna de las redes; éstos serán los puntos de llegada con los cuales se evaluará el costo de conexión desde un punto de coordenadas  $x,y$ . La selección de estos puntos se realizó con base en el siguiente criterio:

Dado que se conocen las características de las rectas, es decir, sus ecuaciones, es posible calcular la distancia desde el centro de las celdas hasta cada una de ellas. Si tal distancia es menor que la mitad de la longitud de la diagonal de la celda, el pixel que se está analizando se encuentra sobre la red.

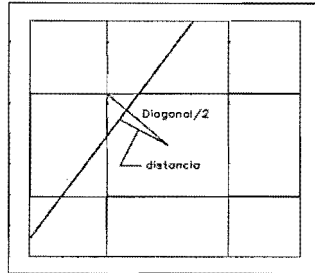


Figura 22. Celdas sobre las redes

**4. Para cada punto dentro de la región (con coordenadas  $x,y$  conocidas)**

**5. Para cada una de las redes de conexión**

**6. Para cada uno de los puntos sobre la red**

Utilizando la subrutina RUTA, calcula el mínimo costo acumulado de conexión entre el punto de coordenadas  $(x,y)$  mencionado en el punto 4, y cada uno de los puntos sobre la red mencionados en el punto 6.

**Fin Para**

Selecciona el menor de los costos mínimos acumulados de conexión para cada una de las redes.

**Fin Para**

Calcula el costo total de localización del proyecto como la sumatoria de esos mínimos costos acumulados seleccionados en el punto anterior, más el costo de localización del núcleo del proyecto, para cada uno de los puntos mencionados en el punto 4.

**Fin Para**

Selecciona el menor costo total de localización del proyecto, entre los calculados en el punto anterior. El punto seleccionado, es el punto óptimo de localización.

Fin

Lo anterior podría representarse gráficamente como se muestra en la figura que se presenta a continuación:

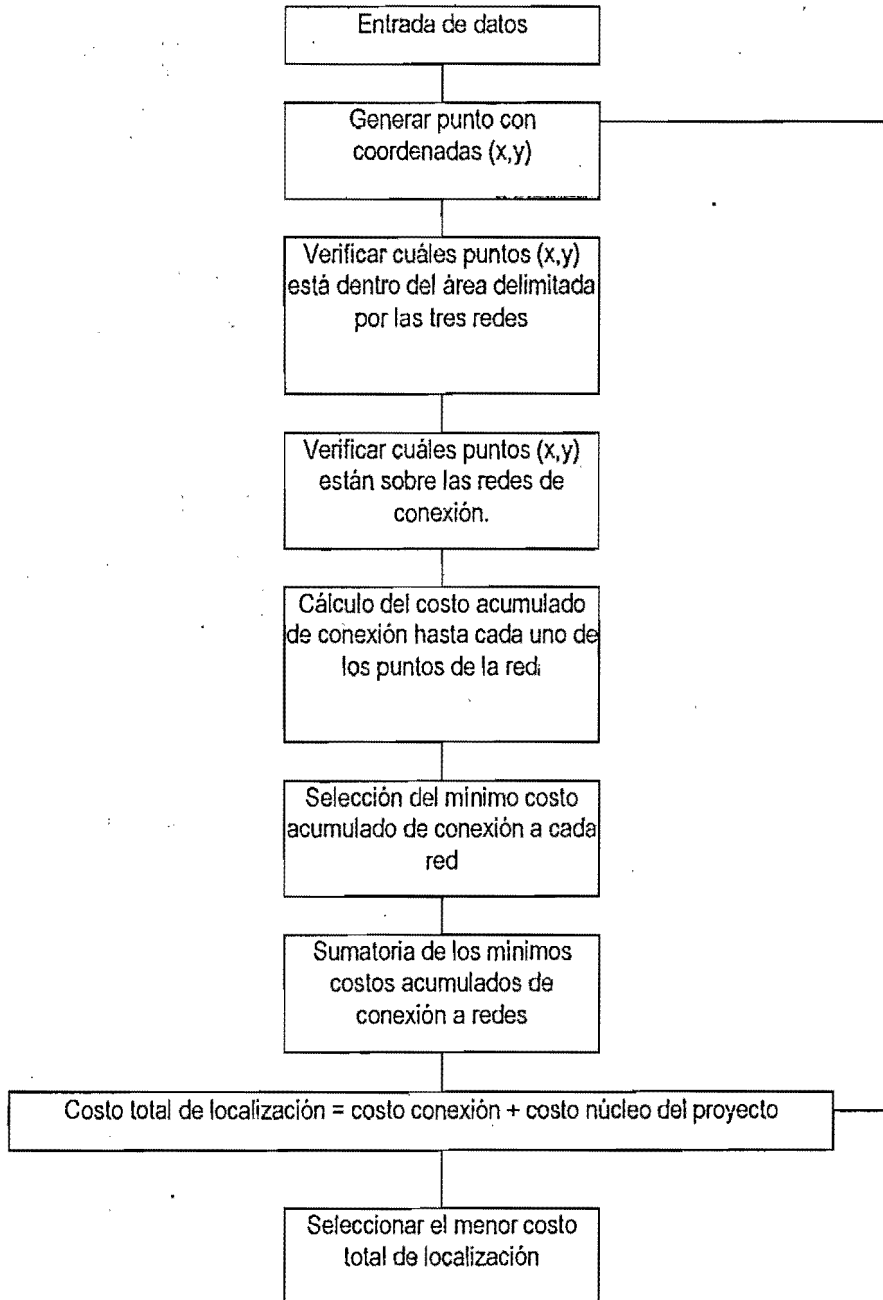


Figura 23. Esquema general del algoritmo

En caso de que el área necesaria para la instalación del núcleo del proyecto, sea superior al área de una celda de la matriz (área de un píxel), su matriz de costos debe tener en cuenta tal situación; para ello se plantea el procedimiento que se ilustra en el siguiente ejemplo:

Construir la matriz de costos asociada al núcleo del proyecto si se tiene que el área del mismo equivale al área de 4 píxeles de la matriz inicial de costos que se presenta a continuación:

1	1	1	1	1	1	1	2	3	4	4	4
1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4	4
2	2	2	2	2	2	1	1	2	3	4	4
2	3	3	3	3	2	1	1	2	3	3	4
2	3	4	4	3	3	2	1	1	2	3	4
2	3	4	4	3	3	2	1	1	2	3	4
2	3	3	3	3	2	2	1	1	2	3	4
2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	3	4
1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4
1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4
2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4
2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4

El valor de cada celda de la nueva matriz de costos del núcleo del proyecto, se obtiene como la sumatoria de los valores de las celdas de la matriz de costos inicial, que se encuentran dentro del área del núcleo del proyecto. Para identificar cuáles celdas están en dicha área, se superpone el área del núcleo del proyecto sobre la matriz de costos, de tal manera que la primera celda de dicha área coincida con la celda a la cual se le desea calcular el nuevo costo, así:

1	1	1	1	1	1	2	3	4	4	4
1	1	1	1	1	1	2	3	3	4	4
2	2	2	2	2	2	1	1	2	3	4
2	3	3	3	3	2	1	1	2	3	4
2	3	4	4	3	3	2	1	1	2	3
2	3	4	4	3	3	2	1	1	2	3
2	3	3	3	3	2	2	1	1	2	3
2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	3
1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3
1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3
2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4
2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4

La nueva matriz de costos, siguiendo este procedimiento sería entonces:

4	4	4	4	4	4	6	10	13	15	16
6	6	6	6	6	5	5	8	11	14	16
9	10	10	10	9	6	4	6	10	13	15
10	13	14	13	11	8	5	5	8	11	14
10	14	16	14	12	10	6	4	6	10	14
10	13	14	13	11	9	6	4	6	10	14
9	10	10	10	9	7	5	4	6	10	14
6	6	6	6	6	5	4	5	8	11	14
4	4	4	4	5	6	6	8	11	12	14
6	6	6	6	7	9	10	11	12	13	15
8	8	8	8	9	11	12	12	13	15	16

#### 4.3. PROGRAMA AMBIENTAL.PRO

El algoritmo descrito en el punto anterior, fué implementado en el lenguaje de programación IDL.

IDL (Interactive Data Language) es un paquete de informática que permite el análisis interactivo y la visualización de los datos que se están manipulando. IDL integra un lenguaje de programación con numerosas opciones de análisis matemático y técnicas de despliegue gráfico.

A continuación se hace una breve descripción del programa ambiental.pro, y se presentan algunas indicaciones acerca de la forma de instalación en el computador y de su funcionamiento.

El programa principal se llama ambiental.pro<sup>22</sup>. Dicho programa es la materialización del algoritmo presentado en párrafos anteriores, y calcula los costos de localización de un proyecto interconectado en cada uno de los puntos pertenecientes al área delimitada por las redes de infraestructura. Una vez obtenidos los costos de localización del proyecto en cada uno de dichos puntos, selecciona el menor, siendo éste el punto óptimo para la ubicación del mismo.

El programa cuenta con dos subrutinas:

<sup>22</sup> Ver código del programa en el anexo 1.

- Subrutina RUTA: a través de esta subrutina se hace el cálculo del mínimo costo de conexión entre el punto que se está evaluando y cada uno de los puntos que están sobre las redes. Dicho cálculo se realiza haciendo uso de la técnica de ruta del mínimo costo acumulado, explicada en capítulos anteriores. Además de el valor del mínimo costo acumulado de conexión, esta subrutina permite conocer cuál es la ruta, es decir el camino para ir de la celda de partida a la de llegada, que implica ese mínimo costo
- Subrutina AVANCE: esta subrutina sirve de apoyo a la subrutina RUTA en la obtención de la ruta de mínimo costo acumulado; a través de ella se conoce la dirección de avance cuando se quiere avanzar de una celda a otra, dado que las convenciones de dirección en la matriz de backlink son diferentes, y varían según la ubicación relativa entre las celdas de partida y de llegada.

En esta subrutina se analizan las diferentes posiciones relativas posibles:

- Celda de llegada ubicada abajo de la celda de salida.
- Celda de llegada ubicada encima de la celda de salida.
- Celda de llegada ubicada abajo y a la derecha de la celda de salida.
- Celda de llegada ubicada abajo y a la izquierda de la celda de salida.
- Celda de llegada ubicada arriba y a la derecha de la celda de salida.
- Celda de llegada ubicada arriba y a la izquierda de la celda de salida.

#### **4.4. INSTALACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA AMBIENTAL.PRO**

##### **4.4.1. Como instalar ambiental.pro?**

Para la adecuada instalación y funcionamiento del programa ambiental.pro, es necesario que el equipo en el cual se va a realizar dicha instalación cuente con el paquete de IDL, en cualquiera de sus versiones (full version o student version). Si la versión de IDL con que cuenta el computador es la student version, el tamaño máximo de las matrices dentro del programa es de 255x255 pixeles.

- Inicialmente es necesario crear una nueva carpeta con el nombre Ambiental\_programa en cualquiera de los discos duros del computador:

Por ejemplo: E:\Ambiental\_programa

- Dentro de esta carpeta estarán ubicados los siguientes archivos y carpeta:

El programa principal que es ambiental.pro

Los programas Ruta.pro y avance.pro

La carpeta PROYECTOS (E:\Ambiental\_programa\Proyectos), esta carpeta contiene los siguientes tipos de archivos, cuya creación se explica posteriormente:

-ejem.pry (archivos.pry)

-ejem.cos (archivos.cos)

-ejem\_1.cri (archivos.cri)

-ejem\_2.cri (archivos.cri)

-ejem\_3.cri (archivos.cri)

Todos ellos con formato plano (no es binario) y fácil de ver en cualquier editor de texto como notepad, wordpad, etc.

- Dentro de IDL (Student Version) hacer lo siguiente:

- En el menú **File/Preferences..../path**: agregar la dirección donde se encuentran los programas; de acuerdo con el ejemplo:

E:\Ambiental\_programa

- En el menú **File/Preferences..../Startup** : agregar la dirección donde se encuentran los archivos pertenecientes a los proyectos a evaluar; de acuerdo con el ejemplo:

E:\Ambiental\_programa\Proyectos\

- Reiniciar IDL

#### 4.4.2. Como crear los archivos de datos de entrada para el programa ambiental.pro?

Los archivos que contienen los datos de entrada necesarios para correr el programa ambiental.pro se describen a continuación:

- ✓ **“\*\*.pry”** es el nombre del archivo que contiene:
  - ✓ La información de las coordenadas de las redes por parejas ordenadas.
  - ✓ El número de columnas (n) y filas (m) de las matrices de criticidad y costos de localización del núcleo del proyecto.



- ✓ El nombre de los archivos que contienen las matrices de criticidad y de costos de ubicación del núcleo del proyecto; los archivos de las matrices de criticidad deben tener la forma "\*\*\*\_1.cri", y el archivo de costos, la forma "\*\*\*.cos"

A continuación se muestra la estructura de los archivos "\*\*\*.pry", y un ejemplo de uno de ellos:

; X1 Y1 (coordenadas de la recta que representa la red 1)

; X2 Y2 (coordenadas de la recta que representa la red 2)

; X3 Y3 (coordenadas de la recta que representa la red 3)

;n (número de columnas de las matrices)

;m (número de filas de las matrices)

;Increx (valor del incremento en x, es decir, tamaño del pixel en el eje horizontal)

;InceY (valor del incremento en y, es decir, tamaño del pixel en el eje vertical)

;ejem.cos (nombre del archivo que contiene la matriz de costos de localización del núcleo del proyecto)

;ejem\_1.cri (nombre del archivo que contiene la matriz de criticidad para la red 1)

;ejem\_2.cri (nombre del archivo que contiene la matriz de criticidad para la red 2)

;ejem\_3.cri (nombre del archivo que contiene la matriz de criticidad para la red 3)

Ejemplo:

2 3

11 21

21 10

20

20

1

1

ejem.cos

ejem\_1.cri

ejem\_2.cri

ejem\_3.cri

- ✓ Archivos de matrices: se escriben en cualquier editor de texto y se pueden salvar en el note-pad con la extensión que se necesita (.cri o .cos)

#### 4.4.3. Cómo se ejecuta el programa ambiental.pro y qué opciones tiene?

Para ejecutar el programa ambiental.pro, es necesario, una vez creados los archivos de entrada de datos y estando en IDL, abrir el programa principal y compilarlo.

Cuando dentro del IDL, se le da la opción "Run" al programa ambiental.pro, en la parte superior izquierda de la pantalla aparece una barra de herramientas que tiene el siguiente menú:

##### **Archivo:**

- ✓ Abrir proyecto: muestra los \*\*.proy.

Para correr el programa, es necesario abrir el archivo \*\*.proy correspondiente al proyecto que se desee analizar.

Cuando se abre un archivo \*\*.proy, se tiene lo siguiente:

- ✓ Se muestran las coordenadas x y y de cada una de las redes mostrando un esquema de las mismas, en caso de ser necesario su edición<sup>23</sup>, se da doble click en la coordenada a cambiar, se pone el nuevo valor, y se finaliza con enter.
- ✓ Se muestran las ecuaciones de cada una de las rectas que representan las redes que infraestructura.
- ✓ En la parte derecha de la ventana, se muestran las coordenadas (x,y), número de fila y de columna, valores de la criticidad de cada una de las redes, costo del núcleo del proyecto y costo total de localización del proyecto, para aquel punto sobre el cual esté el cursor.

- ✓ Salvar trabajo: permite salvar un nuevo proyecto
- ✓ Salvar como PS: creo que salva la gráfica que esté en ese momento en pantalla.

### Opciones

- ✓ Visualizar matrices de criticidad: en la gráfica, muestra por medio de una escala de colores, los valores de las matrices de criticidad para la red que se seleccione.
- ✓ Visualizar matriz de costos: en forma análoga a la opción anterior, permite visualizar el valor del costo de localizar el núcleo del proyecto en cada una de las celdas.
- ✓ Visualizar matriz de costos totales: representación gráfica de los costos totales de localización del proyecto interconectado en cada uno de los puntos del área dentro de las redes, utilizando código de colores.
- ✓ Visualizar puntos dentro de la red: permite visualizar aquellos puntos a los cuales se les va a hacer el análisis de costos, estos puntos son aquellos que están contenidos dentro de la región delimitada por las tres redes.

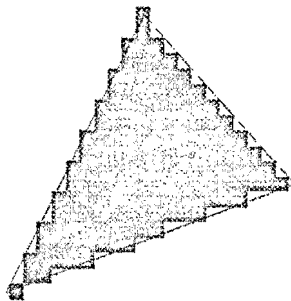


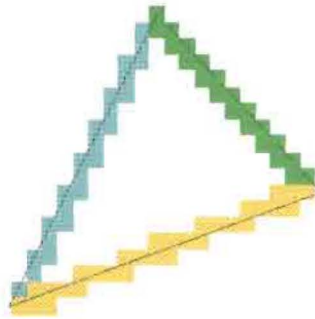
Figura 24. Puntos dentro de la red

- ✓ Visualizar puntos sobre la red: permite visualizar todos aquellos puntos sobre las redes, con los cuales se va a hacer el análisis de costo de conexión

---

<sup>23</sup> Por ejemplo, si se detecta un error en una de las coordenadas y necesita ser corregido antes de evaluar los costos de localización del proyecto.

Figura 25. Puntos sobre la red



- ✓ **Seleccionar región:** traza la ruta de mínimo costo de conexión entre dos puntos cualquiera dentro de la matriz. Para hacerlo, se localiza el cursor en el punto inicial, y haciendo click, se desplaza hacia el segundo punto con el cual se quiere averiguar la ruta de mínimo costo; una vez en el segundo punto, se suelta el click e inmediatamente gráfica la ruta de mínimo costo. Es importante anotar, que esta ruta es trazada utilizando la matriz de criticidad que esté activa en ese momento.
- ✓ **Análisis puntual:** Esta opción permite conocer cuál es la opción de mínimo costo de conexión a cada una de las redes, desde cualquier punto de la matriz que quiera analizarse. Para lo anterior, se da click en el punto de la matriz que desee analizarse, y se obtienen las rutas de mínimo costo de conexión a los puntos de mínimo costo de conexión sobre cada una de las redes.
- ✓ **Análisis de mínimo costo:** con base en las matrices de criticidad y costo de localización del núcleo del proyecto, y utilizando la técnica de ruta de mínimo costo, selecciona el punto óptimo de localización del proyecto, es decir, aquel punto que implique un menor costo ambiental en la implantación del proyecto, señalando además las rutas de conexión desde tal punto hasta cada una de las redes.

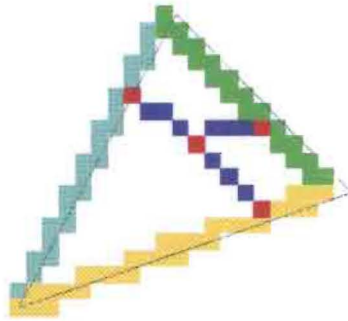


Figura 26. Mínimo costo de conexión y rutas.

En todo momento, en la parte derecha de la gráfica, es posible ver los siguientes atributos del punto sobre el cual está localizado el cursor del mouse:

Coordenada x, número de la columna

Coordenada y, número de la fila

Costo de localización del núcleo del proyecto: CP

Valor de la criticidad para la red 1: C1

Valor de la criticidad para la red 2: C2

Valor de la criticidad para la red 3: C3

Costo total de localización del proyecto interconectado: CT

**Acerca de**

Muestra en el prompt del IDL información básica acerca del programa ambiental.pro

## 5. RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan dos ejemplos de la utilización del programa ambiental.pro. El primer caso corresponde a una superficie de criticidad variable y diferente para cada una de las redes, y sin restricciones. El segundo caso corresponde también a una superficie de criticidad variable y diferente para cada una de las redes, pero con restricción.

### 5.1. SUPERFICIE DE CRITICIDAD VARIABLE, SIN RESTRICCIONES

Hallar el punto de mínimo costo de localización del núcleo de un proyecto interconectado, y las rutas de conexión a cada una de las redes de infraestructura. Las coordenadas de las redes a las cuales debe hacerse la conexión, se presentan a continuación (Tener en cuenta que el tamaño de los pixeles para las matrices de criticidad y costos, es de 1 en los ejes horizontal y vertical)

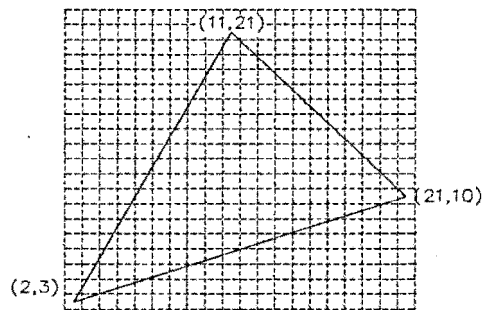
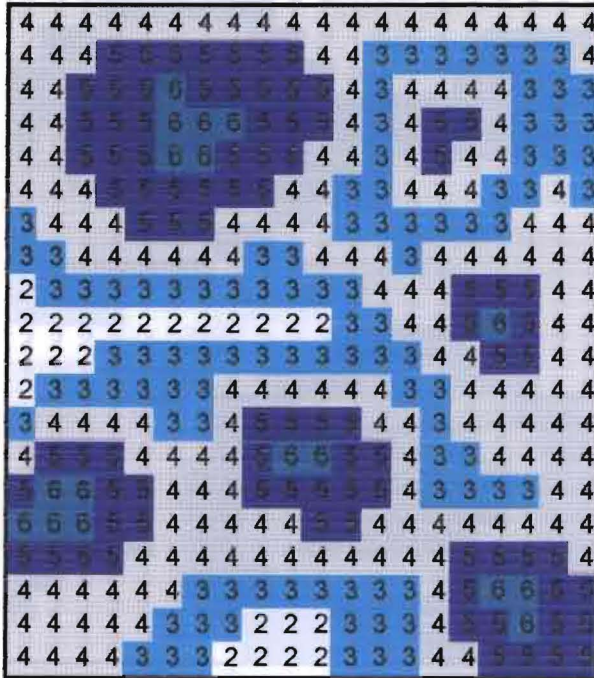


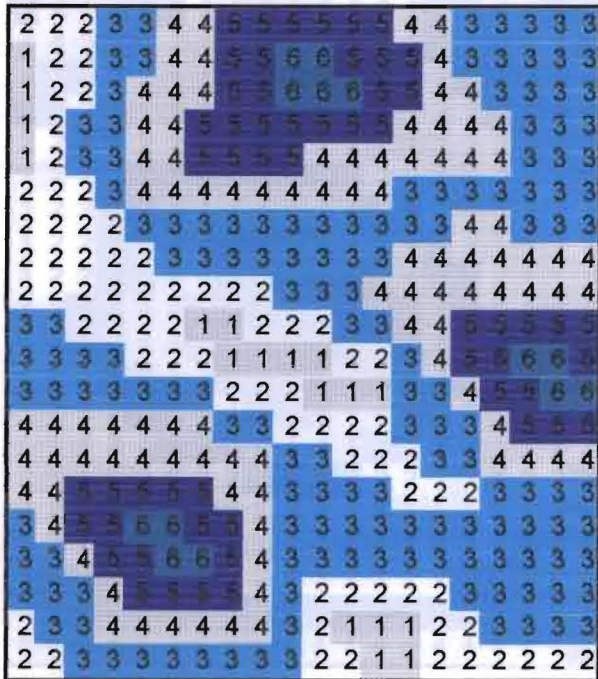
Figura 27. Ejemplo. Coordenadas de las redes.

Los valores de las superficies de criticidad y costos de localización del núcleo del proyecto se presentan a continuación:

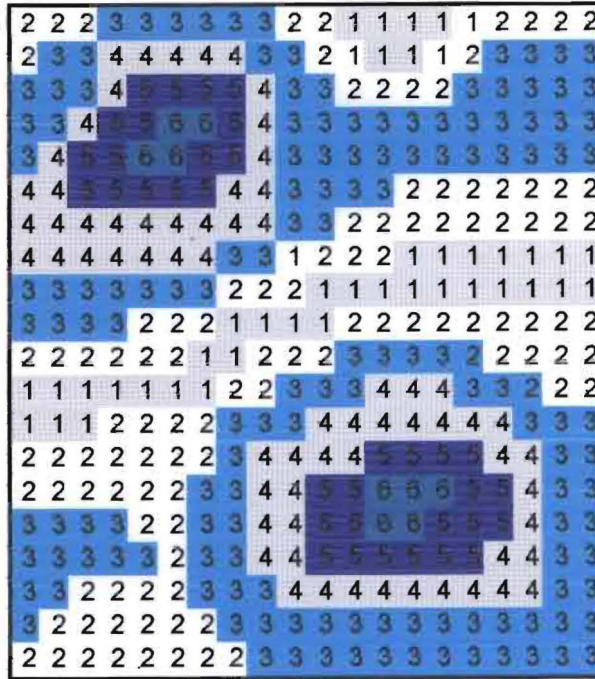
Superficie de costos del núcleo del proyecto:



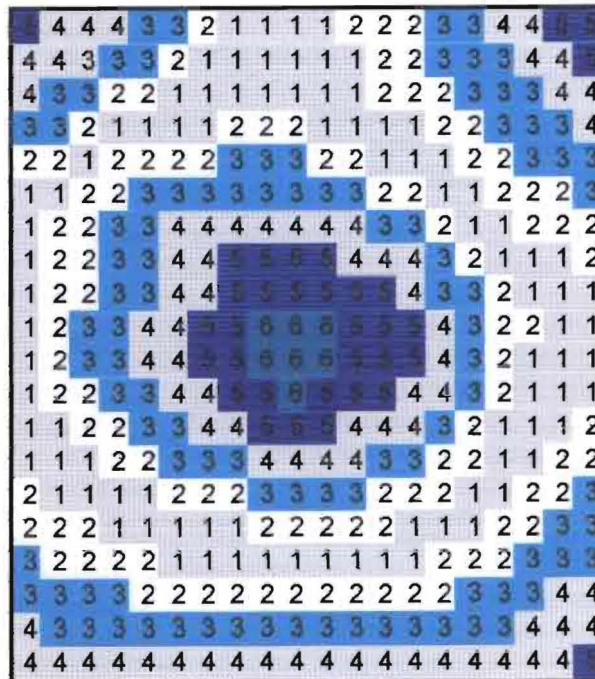
Superficie de criticidad para la red 1:



Superficie de criticidad para la red 2:



Superficie de criticidad para la red 3:





Con tales características del proyecto, se construyeron los archivos de datos de entrada para la ejecución del programa ambiental.pro.

A continuación se presenta el punto óptimo de localización del proyecto interconectado, es decir aquel que presenta un menor costo de conexión: 24.6, dicho valor fué obtenido a través de la ejecución del programa ambiental.pro

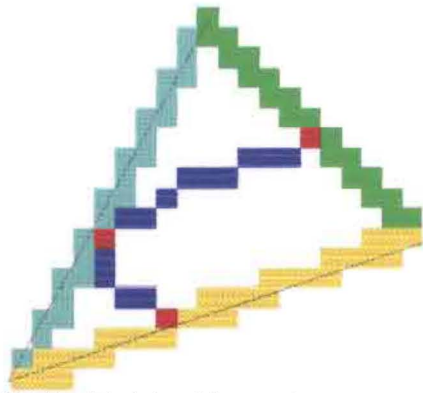
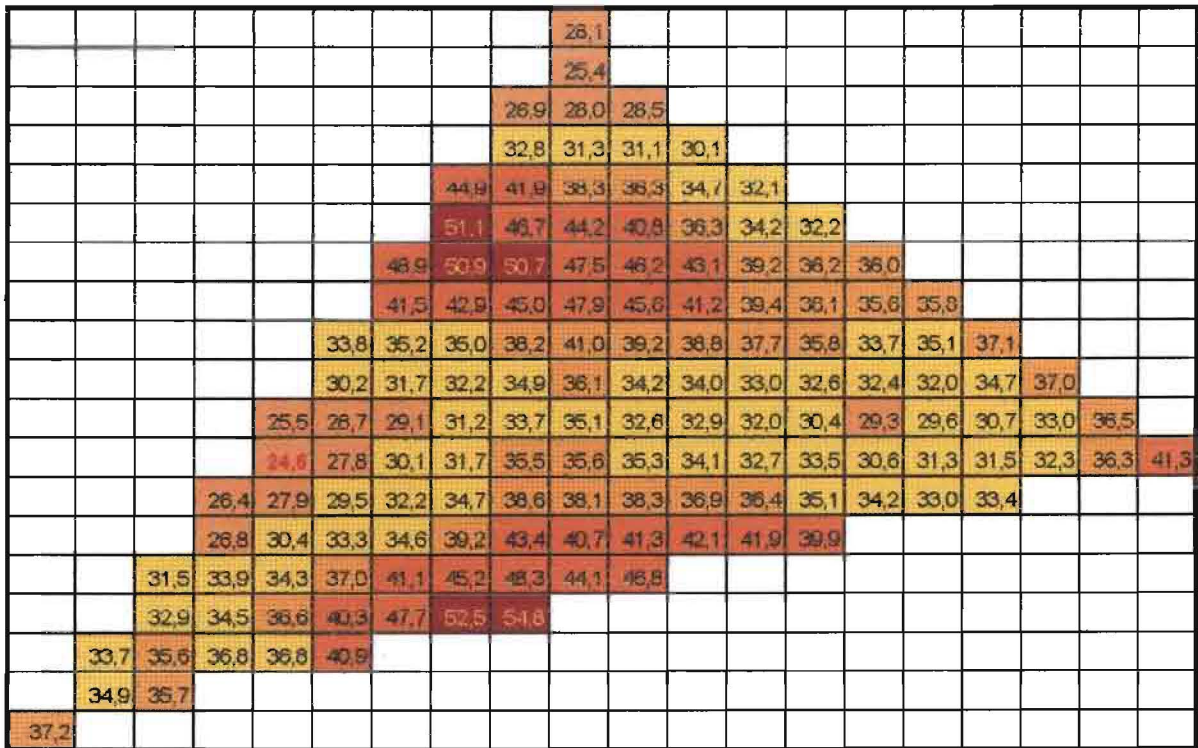


Figura 28. Ejemplo. Punto óptimo de localización del núcleo del proyecto.

El punto óptimo de localización está ubicado en las coordenadas  $x=6$  e  $y=10$ , punto ubicado sobre la red número uno; las rutas de conexión se muestran con color azul en la figura anterior. En la misma figura, se establecen cuáles son los puntos de mínimo costo de conexión sobre cada una de las redes, y se muestran con color rojo en cada una de ellas.

En la figura que se presenta en la página siguiente, se muestra la matriz de costos totales, que contiene el valor del costo total de localización para cada una de las celdas. Dichos costos son mostrados a través de un código de colores.



Código de colores:

Entre 20 y 29:



Entre 30 y 35:



Entre 36 y 40:



Entre 41 y 49:



Entre 50 y 59:

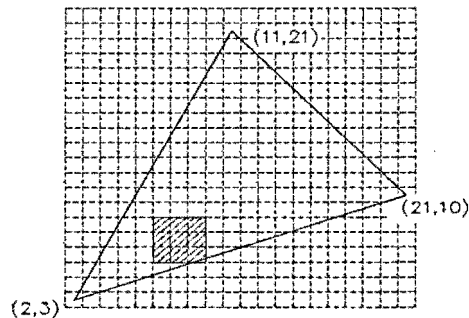


## 5.2. SUPERFICIE DE CRITICIDAD VARIABLE, CON RESTRICCIONES

Como se mencionó en el capítulo anterior, cuando a la zona de restricción se le asignan valores altos de criticidad, la ruta de mínimo costo acumulado evitará pasar por dicha zona. De igual manera, al tener grandes valores en su grado de criticidad, los puntos ubicados en las zonas de restricción, implican grandes costos en la localización del núcleo del proyecto, lo que hace que estos puntos no sean elegidos como puntos óptimos, conduciendo de esta forma a que se respeten las zonas de restricción, como se muestra a continuación:

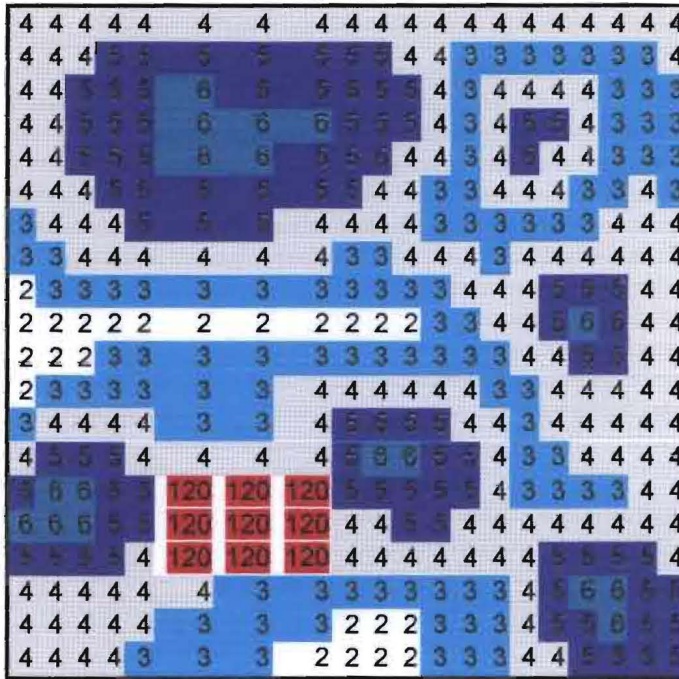
### Ejemplo

Hallar el punto de mínimo costo de localización de un proyecto interconectado, teniendo en cuenta que debe respetarse la zona de restricción. La ubicación de dicha zona, y las coordenadas de las redes a las cuales debe hacerse la conexión, se presenta a continuación (tener en cuenta que el tamaño de los pixeles para la matriz de criticidad, es de 1 en los ejes horizontal y vertical)

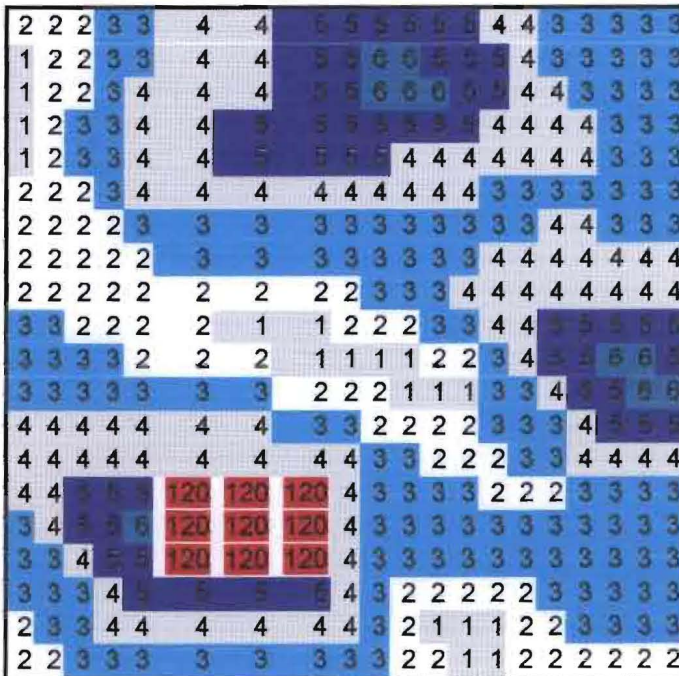


Los valores de las superficies de criticidad para cada una de las redes y los costos de localización del núcleo del proyecto se asumen iguales al ejemplo anterior, pero considerando una restricción, que está ubicada en la ruta de conexión del punto óptimo a una de las redes; esto con el objetivo de verificar el cambio en el trazado de la ruta para evitar la restricción. Dichos valores se presentan a continuación:

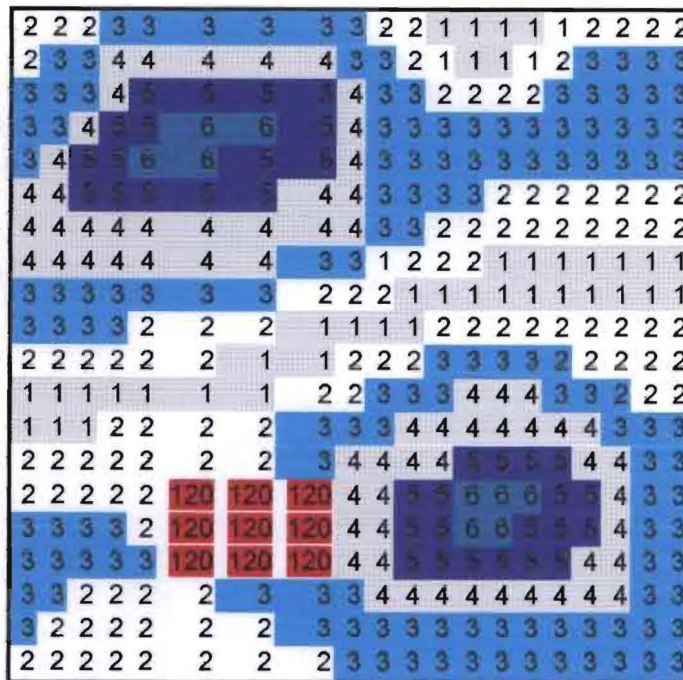
Costos del núcleo del proyecto:



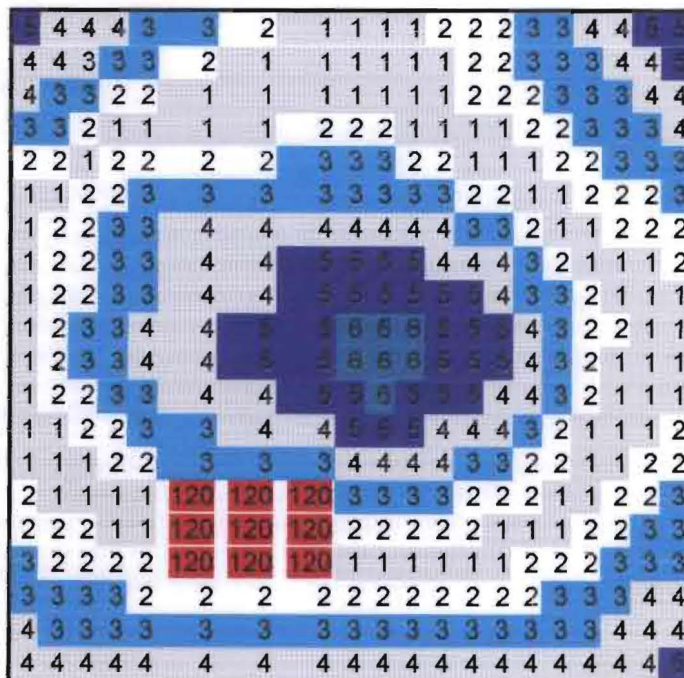
Superficie de criticidad para la red 1:



Superficie de criticidad para la red 2:



Superficie de criticidad para la red 3:



Con tales características del proyecto, se construyeron los archivos de datos de entrada para la ejecución del programa ambiental.pro.

A continuación se presenta el punto óptimo de localización del proyecto interconectado, es decir aquel que presenta un menor costo de conexión: 25.30, dicho valor fué obtenido a través de la ejecución del programa ambiental.pro

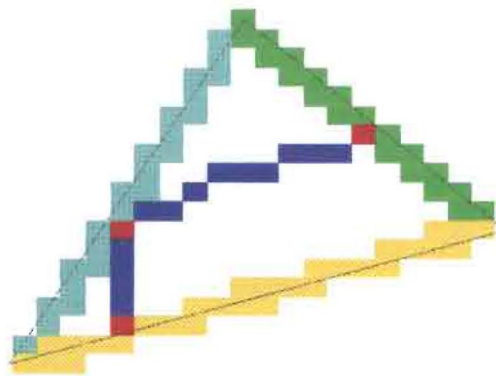
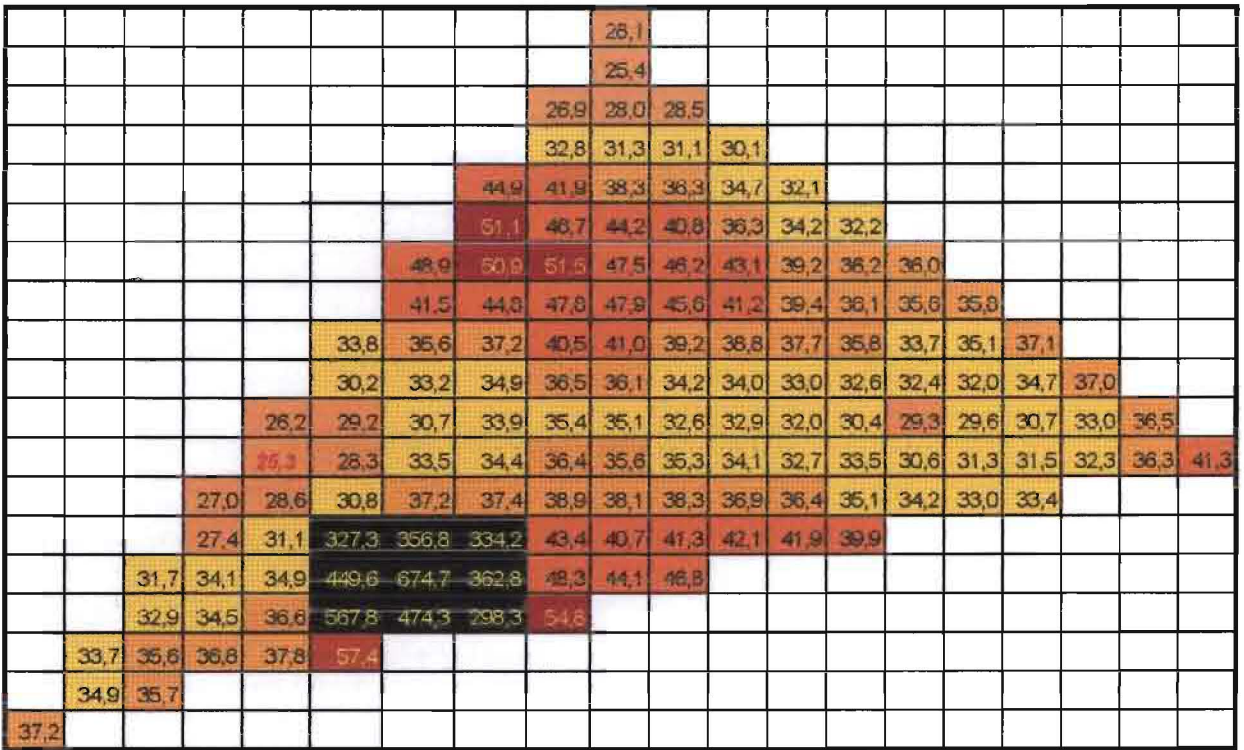


Figura 29. Ejemplo. Punto óptimo de localización del núcleo del proyecto interconectado.

El punto óptimo de localización está ubicado en las coordenadas  $x=6$  e  $y=10$  y las rutas de conexión se muestran con color azul en la figura anterior. En la misma figura, se establecen cuáles son los puntos de mínimo costo de conexión sobre cada una de las redes, y se muestran con color rojo en cada una de ellas.

Cabe en este punto resaltar, que ni el punto óptimo de localización, ni las rutas de conexión atraviesan la restricción gracias a sus altos valores en la superficie de criticidad, como se indicó anteriormente. Si se comparan las figuras 28 y 29, puede observarse que la ruta de conexión a la red tres es diferente en la segunda figura para evitar el paso por la restricción.

En la figura que se muestra a continuación, se presenta mediante un código de colores los valores de los costos totales de localización, para cada punto contenido en la región delimitada por las tres redes.



Código de colores:

- Entre 20 y 29:
- Entre 30 y 35:
- Entre 36 y 40:
- Entre 41 y 49:
- Entre 50 y 59:
- Mayores



## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló un análisis que permite establecer el punto óptimo de localización de un proyecto interconectado<sup>24</sup>, dentro del área delimitada por tres redes de infraestructura existente o proyectada; lo anterior se realizó para las siguientes situaciones:

- Superficie de criticidad constante, sin restricciones.
- Superficie de criticidad constante, con restricciones.
- Superficie de criticidad variable, sin restricciones.
- Superficie de criticidad variable, con restricciones.

El análisis que se desarrolla en el presente trabajo complementa en el área ambiental, la metodología planteada por ISAGEN S.A. E.S.P para localización de turbogases y ciclos combinados; esto lo hace dentro de la cuarta etapa, o fase de selección de sitios donde es altamente factible la ubicación de los proyectos, ya que además de considerar la distancia de la malla a las redes de infraestructura como lo hace la metodología desarrollada por ISAGEN, hace una evaluación más detallada de los costos ambientales dentro de la zona en estudio, y permite de esta manera realizar una optimización de los mismos, seleccionando aquel punto de localización que implique menores costos ambientales dentro de dicha área.

Es importante mencionar la aplicabilidad del análisis en el proceso de toma de decisiones acerca de la localización de proyectos interconectados, ya que éste con base en los métodos cuantitativos aplicables y en las características de la zona, define cuál es el punto óptimo de localización del núcleo del proyecto, siendo éste aquel que implique un menor costo ambiental.

Como se mostró en el capítulo de planteamiento de los modelos de análisis, la ubicación del punto óptimo de localización, depende de las características de la situación a analizar, así:

---

<sup>24</sup> Se entiende por proyectos interconectados, aquellos que para su funcionamiento necesitan conexión de su núcleo, con infraestructura preexistente o proyectada.





- Superficie de criticidad contante, sin restricciones

**Impacto unitario constante.** El impacto que causa la construcción de una unidad de longitud es igual para cada una de las tres redes. Para esta situación, el costo de conexión será mínimo cuando la sumatoria de las distancias del punto que se está evaluando a cada una de las rectas, sea mínima. El punto óptimo se presenta en el vértice desde el cual parta la mínima altura del triángulo formado por las redes de infraestructura.

**Impacto unitario variable.** El impacto que causa la construcción de una unidad de longitud de las redes es diferente para las tres rectas. Para este caso, el costo de conexión será mínimo cuando la sumatoria del producto entre las distancias del punto que se está evaluando a cada una de las rectas y el impacto unitario causado por la construcción de las conexiones, sea mínima. El punto óptimo será aquel vértice para el que el producto entre la altura y el impacto unitario de la red sea menor.

- Superficie de criticidad constante, con restricciones

**Impacto unitario constante.** Una vez establecidas rutas alternativas que no atraviesen la restricción para la conexión del proyecto, se comparan ya sea con las demás alturas, o con las demás rutas alternativas ( en el caso que todas las alturas crucen la restricción), para entre ellas seleccionar la menor, y de esta manera obtener el punto óptimo. El vértice en el que se encuentra el punto óptimo, es decir el de mínimo costo de conexión, será aquel a partir del cual se presente la mínima distancia entre las evaluadas.

**Impacto unitario variable.** el vértice en el que se encuentra el punto óptimo no será aquel a partir del cual se presente la mínima distancia entre las evaluadas, sino en el que se presente el menor producto entre la distancia y el impacto unitario, al igual que en la situación anterior.

- Superficie de criticidad variable con restricciones: se evalúa el costo de localización del proyecto como:

Costo localización = costo proyecto central + costo conexión.

El costo de conexión se evalúa como la sumatoria de los menores costos mínimos de conexión a cada una de las redes. Los costos mínimos de conexión se evalúan utilizando la técnica de ruta de mínimo costo acumulado.

La evaluación del costo de localización se realiza para todos los puntos de la malla; aquel que tenga el menor valor de costo de localización, será el punto que implique menores costos ambientales para la realización del proyecto.

- Superficie de criticidad variable con restricciones: se realiza un análisis análogo al del caso anterior. Para garantizar que el proyecto no va a estar localizado en la zona de restricción, o que las redes de conexión van a atravesarla, se le asignan valores muy altos a la criticidad de la zona restrictiva para que el paso por dicha zona implique costos tan altos, que sea evitado.

## RECOMENDACIONES

Generalmente cuando se está definiendo la ruta óptima de un proyecto lineal, inicialmente se traza la ruta óptima técnicamente; una vez ésta está definida, se le hacen las modificaciones al trazado con base en criterios ambientales, de tal manera que éste afecte lo menos posible al medio y posteriormente se efectúa un análisis de los sobrecostos que dichas modificaciones puedan causar al proyecto.

Tomando como punto de partida los datos correspondientes a un proyecto real se recomienda hacer la articulación entre el ciclo técnico y ambiental de manera inversa, esto es, que inicialmente haciendo uso del análisis y algoritmo desarrollados en el presente trabajo, se determine la ruta óptima ambientalmente, una vez ésta esté definida, se le hagan las modificaciones al trazado con base en criterios técnicos y posteriormente se efectúe un análisis de los sobrecostos ambientales que dichas modificaciones puedan causar al proyecto.

Con respecto al programa ambiental.pro se recomienda desarrollar un módulo para el programa, que permita hacer la lectura de datos a partir de formatos como mapas digitalizados, imágenes satelitales, etc.

Finalmente, se recomienda hacer la modificación en el algoritmo, que permita considerar que las redes a las cuales se va a conectar el proyecto, pueden estar conformadas por varias rectas, es decir, pueden ser polilíneas; esto conduce a que la región delimitada por las redes deja de ser un triángulo, para convertirse en un polígono de  $n$  número de lados.

## BIBLIOGRAFIA

ANGEL, E. CARMONA, S. I. VILLEGAS, L.C Gestión Ambiental con énfasis en Proyectos de Desarrollo Fondo FEN. Santafé de Bogotá, 1996.

ARC VIEW GIS 3.0. ESRI. 1996

BUDNICK, Frank S. Matemáticas aplicadas para administración, economía y ciencias sociales. McGraw-Hill. México. 1987. 746pp.

HILLIER, E.S. LIEBERMAN, G.I. Introducción a la investigación de operaciones. McGraw Hill. México. 1997

ISA. Estudio de restricciones y posibilidades ambientales para los proyectos de transmisión. Plan de expansión 2001-2010. Tomo I y II. Medellín, 1998.

ISAGEN S.A. E.S.P. selección y recomendación de sitios adecuados para la instalación de turbogases y ciclos combinados – metodología y resultados. Informe presentado al Ministerio del Medio Ambiente. Santafé de Bogotá D.C. Agosto de 1996.

MANUAL DEL USUARIO. IDL.

PARRA, R. MARULANDA, J. ESCOBAR, Sistemas de Información Geográfica Base de la Gestión Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1997.

# **ANEXO 1**

```
pro WID_BASE_0_event, Event
```

```
common datos,datos
```

```
5 common objetos,objetos
```

```
common flag,flag
```

```
common dentro,dentro
```

```
common sobre,sobre
```

```
common flag1,flag1
```

```
10 common flag2,flag2
```

```
common reg,reg
```

```
common mat_cos_acu,mat_cos_acu
```

```
common avan,avan
```

```
common mat_dir,mat_dir
```

```
15 common mat_final,mat_final
```

```
common costo_final,costo_final
```

```
common para_dibl,para_dibl
```

```
common matriz,matriz
```

```
wWidget = Event.top
```

```
20 WIDGET_CONTROL,Event.Id,GET_Uvalue=Ev_uval
```

```
case Ev_uval of
```

```
;Del menu archivo
```

```
;Boton Abrir archivo
```

```
25 'Abrir_opt':begin
```

```
    ;Lectura de Datos
```

```
    close,/all
```

```
    filename=DIALOG_PICKFILE(/READ,PATH='d:\Ambiental_programa\Proyectos\',$
```

```
    get_path=ruta,title='Seleccione el proyecto', FILTER = '*.pry')
```

```
30 if filename ne "" then begin
```

```
    openr,1,filename
```

```
    coord=fltarr(2,3)
```

```
    readf,1,coord
```

```
    readf,1,n
```

```
35 readf,1,m
```

```
    readf,1,incrementox
```

```
    readf,1,incrementoy
```

```
    mat=''
```

```
    filename=str_sep(filename,'\')
```

```
    ruta=''
```

```
    for i=0,n_elements(filename)-2 do ruta=ruta+filename(i)+'\'
```

```
    matrices=fltarr(n,m,4)
```

```
    matriz=fltarr(n,m)
```

```
    nom_mat=strarr(4)
```

```
45 for i=0,3 do begin
```

```
    readf,1,mat
```

```
    nom_mat(i)=mat
```

```
    openr,2;ruta+mat
```

```
    readf,2,matriz
```

```
50 matrices(*,*,i)=reverse(matriz,2)
```

```
    close,2
```

```
endfor
```

```
close,/all
```

```
widget_control,objetos.WID_BASE_0,SCR_YSIZE=315
```

```
55 widget_control,objetos.WID_BASE_0,SCR_XSIZE=628
```

```
widget_control,objetos.WID_TABLE_0,set_value=coord
```

```
widget_control,objetos.WID_DRAW_0,get_value=id1
```

```
wset,id1
```

```
;/;;;;/calculo de las ecuaciones de las rectas
```

```
60 widget_control,objetos.WID_TABLE_0,set_value=coord
```

```
eq1=linfit(coord(0,0:1),coord(1,0:1))
```

```
eq2=linfit(coord(0,1:2),coord(1,1:2))
```

```
eq3=linfit([coord(0,0),coord(0,2)], [coord(1,0),coord(0,2)])
```

```
65 widget_control,objetos.WID_LABEL_2,set_value='Ec. red 1: Y= ' $
```

```
+strtrim(eq1(0),2)+' + '+'( '+strtrim(eq1(1),2)+' ) '+'X'
```

```

70 widget_control,objetos.WID_LABEL_4,set_value='Ec. red 2: Y= '$
+strtrim(eq2(0),2)+' + '+'( '+strtrim(eq2(1),2)+' ) '+'X'
widget_control,objetos.WID_LABEL_3,set_value='Ec. red 3: Y= '$
+strtrim(eq3(0),2)+' + '+'( '+strtrim(eq3(1),2)+' ) '+'X'
;////////////////////////////////////
factor=[n/float(objetos.xt),m/float(objetos.yt)]
blanco=matrices(*,*,0)
blanco(*,*)=255
75 xmin=min(coord(0,*))&xmax=max(coord(0,*))
ymin=min(coord(1,*))&ymin=max(coord(1,*))
xcen=xmin+findgen(n_elements(matriz(0,*)))*incrementox
ycen=ymin+findgen(n_elements(matriz(0,*)))*incrementoy
;Estructura datos
;contiene: Coordenadas de las rectas;matrices: Con tres dimensiones
80 ; n x m y cuatro capas: la primera la matriz de costos del núcleo
; del proyecto y las otras tres correspondientes a las matrices
; de criticidad asociadas a las rectas 1,2 y 3 respectivamente;
; factor: que amplía las matrices un porcentaje tal que cubra la
; ventana de dibujo completa;Blanco: matriz temporal de n x m donde
85 ; se colocan los elementos deseados (píxeles de red, entre la red,
; rectángulo seleccionado, etc); (xmin,xmax,ymin y ymax): mínimo y
; máximo de las coordenadas de las rectas;incrementox e incrementoy:
; Distancia entre los centroides de cada pixel en las matrices de
; costos y criticidad; xcen y ycen: coordenadas de los centroides de
90 ; las matrices de costos y criticidad
datos={coord:coord,matrices:matrices,factor:factor,blanco:blanco,$
xmin:xmin,xmax:xmax,ymin:ymin,ymax:ymax,incrementox:incrementox,$
incrementoy:incrementoy,xcen:xcen,ycen:ycen,nom_mat:nom_mat}
95 flag=-1
if flag eq -1 then begin
matriz=datos.blanco
ERASE ,255
tv,congrid(matriz,250,250)
endif else begin
100 matriz=datos.matrices(*,*,flag)
ERASE ,255
tvsc1,congrid(matriz,250,250)
endelse
;////////////////////////////////////dibuja la red
105 widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./(2*n_elements(matriz(0,*)))
ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./(2*n_elements(matriz(*,0)))
plots,xs,ys,color=0,/normal
plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
110 xyouts,xs,ys,strtrim(fix(findgen(n_elements(xs))+1),2),color=0,/normal
;////////////////////////////////////
endif
end
'save_work':begin
115 close,/all
filename=DIALOG PICKFILE(/Write,PATH='d:\Ambiental_programa\Proyectos\',$
get_path=ruta,title='Escriba el nombre del proyecto (sin extensión)',FILTER = '*'.
if filename ne "" then begin
openw,1,filename+'.pry'
120 widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
printf,1,coord
printf,1,n_elements(datos.matrices(*,0,0))
printf,1,n_elements(datos.matrices(0,*,0))
printf,1,datos.incrementox
125 printf,1,datos.incrementoy
for i=0,3 do printf,1,datos.nom_mat(i)
close,1
filename=str_sep(filename,'\')
ruta=''
130 for i=0,n_elements(filename)-2 do ruta=ruta+filename(i)+'\'

```

```

        for i=0,3 do begin
            openw,2,ruta+datos.nom_mat(i)
            printf,2,datos.matrices(*,*,i)
            close,2
135         endfor
            close,/all
        endif
    end
    'saveps_opt':begin
140     filename1=DIALOG_PICKFILE(/write,PATH='C:\jfmejia',get_path=ruta,title=$
        'Escribir Nombre Archivo (*.txt y *.ps)', FILTER = 'Solo el nombre-sin ext.')
        SET_PLOT, 'ps'
        DEVICE, FILENAME=filename1+'.ps',/PORT,/INCH,XSIZE=6.5,XOFF=1,YSIZE=6,YOFF=3,$
        /COLOR,BITS=8
145     ERASE ,255
        CASE FLAG OF
        -1:TITULO='Matriz en blanco (Red)
        0:TITULO='Matriz de Costos
        1:TITULO='Matriz de Criticidad 1
150     2:TITULO='Matriz de Criticidad 2
        3:TITULO='Matriz de Criticidad 3
        3:TITULO='Matriz de Costos totales
        5:TITULO='Matriz de puntos sobre la red
        6:TITULO='Matriz de puntos dentro de la red
155     7:TITULO='Matriz de punto óptimo (total)
        8:TITULO='Matriz de punto óptimo (selección)
        END
        tv,congrid(matriz,250,250)
        ;////////////////////////////////////dibuja la red
160     widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
        xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./(2*n_elements(matriz(0,*)))
        ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./(2*n_elements(matriz(*,0)))
        plots,xs,ys,color=0,/normal
        plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
165     xyouts,xs,ys,strtrim(fix(findgen(n_elements(xs))+1),2),color=0,/normal
        xyouts,0,1.1,titulo,color=0,/normal
        stop
        ;tv,congrid(mat_final,250,250)
        ;////////////////////////////////////dibuja la red
170     ;widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
        ;xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./(2*n_elements(matriz(0,*)))
        ;ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./(2*n_elements(matriz(*,0)))
        ;plots,xs,ys,color=0,/normal
        ;plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
175     ;xyouts,xs,ys,strtrim(fix(findgen(n_elements(xs))+1),2),color=0,/normal
        DEVICE, /CLOSE
        SET_PLOT, 'win'
    end
;Boton Salir
180     'salir':widget_control,objetos.WID_BASE_0,/destroy
;Del menu Opciones
;Boton Visualizar matriz de criticidad 1
    'b_crit1':begin
        flag=1 ;flag es de acuerdo al subindice de la matriz activa
185     matriz=datos.matrices(*,*,flag)
        ERASE ,255
        tvscl,congrid(matriz,250,250)
        ;////////////////////////////////////dibuja la red
        widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
190     xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./(2*n_elements(matriz(0,*)))
        ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./(2*n_elements(matriz(*,0)))
        plots,xs,ys,color=0,/normal
        plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
        xyouts,xs,ys,strtrim(fix(findgen(n_elements(xs))+1),2),color=0,/normal
195     ;////////////////////////////////////

```



```

end
;Boton Visualizar matriz de criticidad 2
'b_crit2':begin
  flag=2 ;flag es de acuerdo al subindice de la matriz activa
200  matriz=datos.matrices(*,*,flag)
  ERASE ,255
  tvscl,congrid(matriz,250,250)
  ;////////////////////dibuja la red
  widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
205  xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./(2*n_elements(matriz(0,*)))
  ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./(2*n_elements(matriz(*,0)))
  plots,xs,ys,color=0,/normal
  plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
  xyouts,xs,ys,strtrim(fix(findgen(n_elements(xs))+1),2),color=0,/normal
210  ;////////////////////
end
;Boton Visualizar matriz de criticidad 3
'b_crit3':begin
  flag=3 ;flag es de acuerdo al subindice de la matriz activa
215  matriz=datos.matrices(*,*,flag)
  ERASE ,255
  tvscl,congrid(matriz,250,250)
  ;////////////////////dibuja la red
  widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
220  xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./(2*n_elements(matriz(0,*)))
  ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./(2*n_elements(matriz(*,0)))
  plots,xs,ys,color=0,/normal
  plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
  xyouts,xs,ys,strtrim(fix(findgen(n_elements(xs))+1),2),color=0,/normal
225  ;////////////////////
end
;Boton Visualizar matriz de costos
'b_cost':begin
  flag=0 ;flag es de acuerdo al subindice de la matriz activa
230  matriz=datos.matrices(*,*,flag)
  ERASE ,255
  tvscl,congrid(matriz,250,250)
  ;////////////////////dibuja la red
  widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
235  xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./(2*n_elements(matriz(0,*)))
  ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./(2*n_elements(matriz(*,0)))
  plots,xs,ys,color=0,/normal
  plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
  xyouts,xs,ys,strtrim(fix(findgen(n_elements(xs))+1),2),color=0,/normal
240  ;////////////////////
end
;Boton Visualizar matriz de costos totales
'b_cost_total':begin
  ERASE ,255
245  flag=4
  matriz=mat_final
  tvscl,congrid(matriz,250,250)
  ;////////////////////dibuja la red
  widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
250  xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./(2*n_elements(matriz(0,*)))
  ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./(2*n_elements(matriz(*,0)))
  plots,xs,ys,color=0,/normal
  plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
  xyouts,xs,ys,strtrim(fix(findgen(n_elements(xs))+1),2),color=0,/normal
255  ;////////////////////
end
;Boton para seleccionar region dentro de la red
'b_on':begin
  ;Criterio: que el centroide del pixel este dentro de la red
260  widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord

```



```

area =.5*((coord(0,2)*coord(1,1)+coord(0,0)*coord(1,2)+coord(0,1)*coord(1,0))$
-(coord(0,1)*coord(1,2)+coord(0,2)*coord(1,0)+coord(0,0)*coord(1,1))
xcen=datos.xcen
ycen=datos.ycen
matriz=datos.blanco
265 for i=0,n_elements(datos.xcen)-1 do begin
    for j=0,n_elements(datos.ycen)-1 do begin
        area1=.5*((xcen(i)*coord(1,1)+coord(0,0)*ycen(j)+coord(0,1)*coord(1,0))$
        -(coord(0,1)*ycen(j)+xcen(i)*coord(1,0)+coord(0,0)*coord(1,1))
270 area2=.5*((coord(0,2)*coord(1,1)+xcen(i)*coord(1,2)+coord(0,1)*ycen(j))-
(coord(0,1)*coord(1,2)+coord(0,2)*ycen(j)+xcen(i)*coord(1,1))
area3=.5*((coord(0,2)*ycen(j)+coord(0,0)*coord(1,2)+xcen(i)*coord(1,0))-
(xcen(i)*coord(1,2)+coord(0,2)*coord(1,0)+coord(0,0)*ycen(j))
275 temp=abs(area1)+abs(area2)+abs(area3)
if temp eq area then begin
    matriz(i,j)=110
endif
    endfor
endfor
280
ERASE ,255
tv,congrid(matriz,250,250)
widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./(2*n_elements(matriz(0,*)))
285 ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./(2*n_elements(matriz(*,0)))
plots,xs,ys,color=0,/normal
plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
xyouts,xs,ys,stri(trim(findgen(n_elements(xs))+1),2),color=0,/normal
dentro=matriz ;dentro de las rectas =110
290 flag=6
end
;Botón para seleccionar región sobre la red
'b_in':begin
;Criterio: que el píxel toque con cualquier punta la red
295 widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
equ1=linfit(coord(0,0:1),coord(1,0:1))
equ2=linfit(coord(0,1:2),coord(1,1:2))
equ3=linfit([coord(0,0),coord(0,2)], [coord(1,0),coord(1,2)])
equ=[[equ1],[equ2],[equ3]]
300 xcen=datos.xcen
ycen=datos.ycen
matriz=datos.blanco
pru=((datos.incrementox/2)^2+(datos.incrementoy/2)^2)^.5
for k=0,2 do begin
305 for i=0,n_elements(datos.xcen)-1 do begin
    for j=0,n_elements(datos.ycen)-1 do begin
        xo=(xcen(i)/equ(1,k)+ycen(j)-equ(0,k))/(equ(1,k)+1/equ(1,k))
        yo=xo*equ(1,k)+equ(0,k)
310 if yo le max(coord(1,*)) and yo ge min(coord(1,*)) and xo le $
max(coord(0,*)) and xo ge min(coord(0,*)) then begin
            d=((xcen(i)-xo)^2+(ycen(j)-yo)^2)^.5
            if d lt pru then matriz(i,j)=40*k+100
            endif
        endfor
    endfor
315 endfor
endfor
ERASE ,255
tv,congrid(matriz,250,250)
widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
320 xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./(2*n_elements(matriz(0,*)))
ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./(2*n_elements(matriz(*,0)))
plots,xs,ys,color=0,/normal
plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
xyouts,xs,ys,stri(trim(findgen(n_elements(xs))+1),2),color=0,/normal
325 sobre=matriz ; red1=100, red2=140, red3=180

```

```

        flag=5
    end
;Boton para activar la selección de un rectangulo sobre las matrices
    'b_reg': begin
330         flag1=0
    end
;Boton para realizar el análisis de costos mínimo en un sólo punto
    'b_ana_uno': begin
        flag1=2
335    end
;Boton para realizar el análisis de costos mínimo a todos los puntos dentro de la red
    'b_ana':begin
        ;1). localiza los puntos dentro de la red
        widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
340        area =.5*((coord(0,2)*coord(1,1)+coord(0,0)*coord(1,2)+coord(0,1)*coord(1,0))-
            (coord(0,1)*coord(1,2)+coord(0,2)*coord(1,0)+coord(0,0)*coord(1,1))
        xcen=datos.xcen
        ycen=datos.ycen
        matriz=datos.blanco
345        for i=0,n_elements(datos.xcen)-1 do begin
            for j=0,n_elements(datos.ycen)-1 do begin
                areal=.5*((xcen(i)*coord(1,1)+coord(0,0)*ycen(j)+coord(0,1)*coord(1,0))-
                    (coord(0,1)*ycen(j)+xcen(i)*coord(1,0)+coord(0,0)*coord(1,1))
                area2=.5*((coord(0,2)*coord(1,1)+xcen(i)*coord(1,2)+coord(0,1)*ycen(j))-
350                (coord(0,1)*coord(1,2)+coord(0,2)*ycen(j)+xcen(i)*coord(1,1))
                area3=.5*((coord(0,2)*ycen(j)+coord(0,0)*coord(1,2)+xcen(i)*coord(1,0))-
                    (xcen(i)*coord(1,2)+coord(0,2)*coord(1,0)+coord(0,0)*ycen(j)))
                temp=abs(areal)+abs(area2)+abs(area3)
                if temp eq area then begin
355                    matriz(i,j)=110
                endif
            endfor
        endfor
        dentro=matriz ;dentro de las rectas =110
360        ;////////////////////////////////////
        ;2). localiza los puntos sobre la red
        equ1=linfit(coord(0,0:1),coord(1,0:1))
        equ2=linfit(coord(0,1:2),coord(1,1:2))
        equ3=linfit([coord(0,0),coord(0,2)], [coord(1,0),coord(1,2)])
365        equ=[[equ1],[equ2],[equ3]]
        xcen=datos.xcen
        ycen=datos.ycen
        matriz=datos.blanco
        mat_final=datos.blanco
370        pru=((datos.incrementox/2)^2+(datos.incrementoy/2)^2)^.5
        for k=0,2 do begin
            for i=0,n_elements(datos.xcen)-1 do begin
                for j=0,n_elements(datos.ycen)-1 do begin
375                    xo=(xcen(i)/equ(1,k)+ycen(j)-equ(0,k))/(equ(1,k)+1/equ(1,k))
                    yo=xo*equ(1,k)+equ(0,k)
                    if yo le max(coord(1,*)) and yo ge min(coord(1,*)) and xo le $
                        max(coord(0,*)) and xo ge min(coord(0,*)) then begin
                        d=((xcen(i)-xo)^2+(ycen(j)-yo)^2)^.5
                        if d lt pru then matriz(i,j)=40*k+100
380                    endif
                endfor
            endfor
        endfor
        sobre=matriz ; red1=100, red2=140, red3=180
385        ;////////////////////////////////////
        ;opt_total=intarr(3,5); {k,0}:el costo para la red k; {1}:fila de salida;
        ;{2}:columna de salida {4,5} las filas y columnas de optimo de cada red
        ;3). Hace un analisis para cada uno de los puntos dentro de la red, repitiendo
        ; con ellos el análisis parcial; a cada uno de ellos le encuentra el punto sobre
390        ; cada red donde el costo es minimo. El resultado final es el punto con el minimo

```

```

; valor (Costo) dentro de la red, también, se cuenta con las rutas de minimo costo
; hacia cada una de ellas
y1=fix(where(dentro eq 110)/n_elements(datos.matrices(*,0,0)))
x1=fix(where(dentro eq 110)-y1*n_elements(datos.matrices(0,*,0)))
395 costominimo_total=999999
for m=0,n_elements(where(dentro eq 110))-1 do begin
    opt_red=fltarr(3,5)
    opt_red(*,0)=999999
    for k=0,2 do begin
400        costo_par=999999
        y2=fix(where(sobre eq 40*k+100)/n_elements(datos.matrices(*,0,0)))
        x2=fix(where(sobre eq 40*k+100)-y2*n_elements(datos.matrices(0,*,0)))
        ;de la red
405        for n=0,n_elements(where(sobre eq 40*k+100))-1 do begin
            reg={x1:x1(m),x2:x2(n),$
                y1:y1(m),y2:y2(n)}
            flag=k+1
            ;Devuelve las matrices de costos acumulados y de dirección para
            ;las coordenadas determinadas en la estructura reg
410            ;;reg: contiene la fila y columna (1) de salida y (2) de llegada
            RUTA
            ;temp: costo total acumulado mas el valor en la matriz de costo
            temp=mat_cos_acu(reg.x2,reg.y2)
            if temp lt costo_par then begin
415                opt_red(k,0)=temp
                costo_par=temp
                opt_red(k,1:2)=[reg.x1,reg.y1]
                opt_red(k,3:4)=[reg.x2,reg.y2]
                mat_dir_opt=mat_dir
                reg_opt=reg
            endif
        endfor
    endfor
    mat_final(reg.x1,reg.y1)=total(opt_red(*,0))+datos.matrices(reg.x1,reg.y1,0)
425    if total(opt_red(*,0))+datos.matrices(reg_opt.x1,reg_opt.y1,0) lt $
        costominimo_total then begin
        opt_total=opt_red
        costominimo_total=total(opt_red(*,0))+datos.matrices(reg_opt.x1,reg_opt.y1,0)
        ;ojo guardar esta variable para resultado final
430        costo_final=total(opt_red(*,0))+datos.matrices(reg_opt.x1,reg_opt.y1,0)
        endif
    endfor
;Lee la matriz de dirección obtenida entre cada dos puntos la ruta de minimo costo
;para asignar a la matriz blanco el valor arbitrario 50 correspondiente a los
435 ;pixeles de la ruta de minimo costo
for k=0,2 do begin
    x1=opt_total(k,1)
    y1=opt_total(k,2)
    x2=opt_total(k,3)
440    y2=opt_total(k,4)
    reg={x1:x2,x2:x1,$
        y1:y2,y2:y1}
    flag=k+1
    RUTA
445    px=reg.x2 & py=reg.y2
    bandera=0
    while bandera eq 0 do begin
        case mat_dir(px,py) of
            0: begin
450                px=px
                py=py
                matriz(px,py)=50
                bandera=1
            end
            1: begin

```

```

    px=px+1
    py=py
    matriz(px,py)=50
end
460 2: begin
    px=px+1
    py=py-1
    matriz(px,py)=50
465 end
3: begin
    px=px
    py=py-1
    matriz(px,py)=50
470 end
4: begin
    px=px-1
    py=py-1
    matriz(px,py)=50
475 end
5: begin
    px=px-1
    py=py
    matriz(px,py)=50
480 end
6: begin
    px=px-1
    py=py+1
    matriz(px,py)=50
485 end
7: begin
    px=px
    py=py+1
    matriz(px,py)=50
490 end
8: begin
    px=px+1
    py=py+1
    matriz(px,py)=50
495 end
end
endwhile
endfor
;stop
500 ERASE ,255
matriz(opt_total(0,1),opt_total(0,2))=220
matriz(opt_total(*,3),opt_total(*,4))=220
para_dibl=matriz
tv,congrid(matriz,250,250)
505 ;////////////////////dibuja la red
widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./(2*n_elements(matriz(0,*)))
ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./(2*n_elements(matriz(*,0)))
plots,xs,ys,color=0,/normal
510 plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
xyouts,xs,ys,strtrim(fix(findgen(n_elements(xs))+1),2),color=0,/normal
widget_control,objetos.file_btttn51,sensitive=1
;widget_control,objetos.file_btttn2,sensitive=1
widget_control,objetos.WID_LABEL_ct,set_value='CT'
515 flag=7
flag2=1
end
;Boton acerca de
'Acerca_de':begin
520 ;Para llenar y programar

```

```

print, 'Universidad Nacional de Colombia - Interconexión Eléctrica S.A.
print, 'Especialización en Gestión Ambiental con énfasis en proyectos energéticos
print, 'Programa para selección de punto óptimo de localización
print, 'de proyectos interconectados
525 print, 'con base en criterios de mínimo costo ambiental
print, 'IDL 5.0. Student version

```

```
end
```

```
;Eventos
```

```
;realiza toda acción sobre la ventana
```

```

530 'WID_DRAW_0':begin
    xl=-1&y1=-1
    case flag1 of
        ;Devuelve las coordenadas de la posición del ratón
        -1:begin
535 cursor, x, y, /device, /nowait
        widget_control, objetos.WID_LABEL_x, set_value='X= '$
        +strtrim(datos.xmin+x*datos.factor(0)-(datos.xmax-datos.xmin)/datos.factor(0)$
        /250/2, 2)+'', '+strtrim(fix(1+x*datos.factor(0)), 2)
        widget_control, objetos.WID_LABEL_y, set_value='Y= '$
540 +strtrim(datos.ymin+y*datos.factor(0)-(datos.xmax-datos.xmin)/datos.factor(1)$
        /250/2, 2)+'', '+strtrim(fix(1+y*datos.factor(1)), 2)
        widget_control, objetos.WID_LABEL_cp, set_value='CP= '$
        +strtrim(datos.matrices(fix(x*datos.factor(0)), fix(y*datos.factor(0)), 0), 2)
        widget_control, objetos.WID_LABEL_c1, set_value='C1= '$
545 +strtrim(datos.matrices(fix(x*datos.factor(0)), fix(y*datos.factor(0)), 1), 2)
        widget_control, objetos.WID_LABEL_c2, set_value='C2= '$
        +strtrim(datos.matrices(fix(x*datos.factor(0)), fix(y*datos.factor(0)), 2), 2)
        widget_control, objetos.WID_LABEL_c3, set_value='C3= '$
        +strtrim(datos.matrices(fix(x*datos.factor(0)), fix(y*datos.factor(0)), 3), 2)
550 if flag2 eq 1 then begin
            valor=mat_final(fix(x*datos.factor(0)), fix(y*datos.factor(0)))
            if valor eq 255 then widget_control, objetos.WID_LABEL_ct, set_value=$
            'CT=-- ' else widget_control, objetos.WID_LABEL_ct, set_value='CT= '$
            +strtrim(valor, 2)
555 endif
        ;print, 'Z= '+strtrim(datos.matrices(fix(x*datos.factor(0)),
        ;fix(y*datos.factor(0)), flag), 2)
        ;print, datos.matrices(0:1, 0:1, flag)
        end
560 ;Indica el punto inicial donde se empieza a seleccionar el rectangulo
        ;una vez se halla oprimido el boton 'b_reg'
        0: begin
            cursor, xl, y1, /device, /down
            xl=fix(xl*datos.factor(0))&y1=fix(y1*datos.factor(1))
565 x2=0&y2=0
            reg={x1:xl, x2:fix(x2*datos.factor(0)), $
                y1:y1, y2:fix(y2*datos.factor(1))}
            flag1=1
        end
570 ;Indica el punto final donde se termina de seleccionar el rectangulo una vez
        ;se halla undido el ratón
        1: begin
            cursor, x2, y2, /device, /up
            x2=fix(x2*datos.factor(0))&y2=fix(y2*datos.factor(1))
575 reg={x1:reg.x1, x2:x2, $
                y1:reg.y1, y2:y2}
            flag1=-1
            matriz=datos.blanco
            if reg.x1 eq reg.x2 then begin
580 matriz(reg.x1, reg.y1<reg.y2:reg.y1>reg.y2)=100
            endif else begin
                if reg.y1 eq reg.y2 then begin
                    matriz(reg.x1<reg.x2:reg.x2>reg.x1, reg.y2)=100
                endif else begin
585 matriz(reg.x1<reg.x2:reg.x2>reg.x1, reg.y1<reg.y2:reg.y1>reg.y2)=$

```

```

        100
    endelse
endelse
flag=0
590 RUTA
    px=reg.x2 & py=reg.y2
    bandera=0
    while bandera eq 0 do begin
        case mat_dir(px,py) of
595         0: begin
            px=px
            py=py
            matriz(px,py)=50
            bandera=1
600         end
        1: begin
            px=px+1
            py=py
            matriz(px,py)=50
605         end
        2: begin
            px=px+1
            py=py-1
            matriz(px,py)=50
610         end
        3: begin
            px=px
            py=py-1
            matriz(px,py)=50
615         end
        4: begin
            px=px-1
            py=py-1
            matriz(px,py)=50
620         end
        5: begin
            px=px-1
            py=py
            matriz(px,py)=50
625         end
        6: begin
            px=px-1
            py=py+1
            matriz(px,py)=50
630         end
        7: begin
            px=px
            py=py+1
            matriz(px,py)=50
635         end
        8: begin
            px=px+1
            py=py+1
            matriz(px,py)=50
640         end
        end
    endwhile
    matriz(reg.x2,reg.y2)=210
    matriz(reg.x1,reg.y1)=210
645 ERASE ,255
    tvscl,congrid(matriz,250,250)
    ;////////////////////dibuja la red
    widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
    xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./(2*n_elements(matriz(0,*)))
650    ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./(2*n_elements(matriz(*,0)))

```

```

plots;xs,ys,color=0,/normal
plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
xyouts,xs,ys,strcmp(trim(findgen(n_elements(xs))+1),2),color=0,/normal
655 flag=0
end
;Se activa con el boton 'bot_ana_uno' y realiza el analisis para un solo
; punto (oprimiendo el boton izquierdo del ratón).
2: begin
  cursor,x1,y1;/device,/wait
660 x1=fix(x1*datos.factor(0))&y1=fix(y1*datos.factor(1))
  widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
  equ1=linfit(coord(0,0:1),coord(1,0:1))
  equ2=linfit(coord(0,1:2),coord(1,1:2))
  equ3=linfit([coord(0,0),coord(0,2)], [coord(1,0),coord(1,2)])
665 equ=[equ1],[equ2],[equ3]
  xcen=datos.xcen
  ycen=datos.ycen
  matriz=datos.blanco
  matrizr=datos.blanco
670 pruv=((datos.incrementox/2)^2+(datos.incrementoy/2)^2)^.5
  for k=0,2 do begin
    for i=0,n_elements(datos.xcen)-1 do begin
      for j=0,n_elements(datos.ycen)-1 do begin
675 x0=(xcen(i)/equ(1,k)+ycen(j)-equ(0,k))/(equ(1,k)+1/equ(1,k))
        yo=x0*equ(1,k)+equ(0,k)
        if yo le max(coord(1,*)) and yo ge min(coord(1,*)) and $
        x0 le max(coord(0,*)) and x0 ge min(coord(0,*)) then begin
680 d=((xcen(i)-x0)^2+(ycen(j)-yo)^2)^.5
          if d lt pruv then matriz(i,j)=40*k+100
        endif
      endif
    endfor
  endfor
  sobre=matriz ; red1=100, red2=140,red3=180
685 ;////////////////////////////////////
  costominimo_total=999999
  opt_red=fltarr(3,5)
  opt_red(*,0)=999999
  for k=0,2 do begin
690 costo_par=999999
    y2=fix(where(sobre eq 40*k+100)/n_elements(datos.matrices(*,0,0)))
    x2=fix(where(sobre eq 40*k+100)-y2*n_elements(datos.matrices(0,*,0)))$
    ; de la red
    for n=0,n_elements(where(sobre eq 40*k+100))-1 do begin
695 reg=(x1:x1,x2:x2(n),$
      y1:y1,y2:y2(n))
      flag=k+1
      RUTA
      temp=mat_cos_acu(reg.x2,reg.y2)
700 if temp lt costo_par then begin
        opt_red(k,0)=temp
        costo_par=temp
        opt_red(k,1:2)=[reg.x1,reg.y1]
        opt_red(k,3:4)=[reg.x2,reg.y2]
705 reg_opt=reg
      endif
    endfor
  endfor
  if total(opt_red(*,0))+datos.matrices(reg_opt.x1,reg_opt.y1,flag) lt $
710 costominimo_total then begin
    opt_total=opt_red
    for k=0,2 do begin
715 x1=opt_total(k,1)
      y1=opt_total(k,2)
      x2=opt_total(k,3)
    endfor
  end

```



```

y2=opt_total(k,4)
reg={x1:x1,x2:x2,$
      y1:y1,y2:y2}
flag=k+1
RUTA
720 px=reg.x2 & py=reg.y2
bandera=0
while bandera eq 0 do begin
725   case mat_dir(px,py) of
      0: begin
          px=px
          py=py
          matriz(px,py)=50
          bandera=1
730       end
      1: begin
          px=px+1
          py=py
          matriz(px,py)=50
735       end
      2: begin
          px=px+1
          py=py-1
          matriz(px,py)=50
740       end
      3: begin
          px=px
          py=py-1
          matriz(px,py)=50
745       end
      4: begin
          px=px-1
          py=py-1
          matriz(px,py)=50
750       end
      5: begin
          px=px-1
          py=py
          matriz(px,py)=50
755       end
      6: begin
          px=px-1
          py=py+1
          matriz(px,py)=50
760       end
      7: begin
          px=px
          py=py+1
          matriz(px,py)=50
765       end
      8: begin
          px=px+1
          py=py+1
          matriz(px,py)=50
770       end
      end
    endwhile
endfor
costominimo_total=total(opt_red(*,0))
775 ERASE ,255
matriz(opt_total(0,1),opt_total(0,2))=220
matriz(opt_total(*,3),opt_total(*,4))=220
tv,congrid(matriz,250,250)
widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
780 xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./$

```

```

(2*n_elements(matriz(0,*))
ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./$
(2*n_elements(matriz(*,0))
785 plots,xs,ys,color=0,/normal
plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
xyouts,xs,ys,strtrim(fix(findgen(n_elements(xs))+1),2)$
,color=0,/normal
endif
790 flag=8
flag1=-1
end
end
end
;realiza toda acción sobre la lista de coordenadas
795 'WID_TABLE_0':begin
;stop
if flag eq -1 then begin
matriz=datos.blanco
ERASE,255
800 tv,congrid(matriz,250,250)
endif else begin
tvsc1,congrid(matriz,250,250)
endelse
;/////calculo de las ecuaciones de las rectas
805 widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
eq1=linfit(coord(0,0:1),coord(1,0:1))
eq2=linfit(coord(0,1:2),coord(1,1:2))
eq3=linfit([coord(0,0),coord(0,2)], [coord(1,0),coord(0,2)])
810 widget_control,objetos.WID_LABEL_2,set_value='Ec. red 1: Y= '$
+strtrim(eq1(0),2)+' + '+'( '+strtrim(eq1(1),2)+' ) '+'X'
widget_control,objetos.WID_LABEL_4,set_value='Ec. red 2: Y= '$
+strtrim(eq2(0),2)+' + '+'( '+strtrim(eq2(1),2)+' ) '+'X'
widget_control,objetos.WID_LABEL_3,set_value='Ec. red 3: Y= '$
+strtrim(eq3(0),2)+' + '+'( '+strtrim(eq3(1),2)+' ) '+'X'
815 ;////////////////////////dibuja la red
widget_control,objetos.WID_TABLE_0,get_value=coord
xs=(coord(0,*)-datos.xmin)/datos.factor(0)/250.+1./(2*n_elements(matriz(0,*)))
ys=(coord(1,*)-datos.ymin)/datos.factor(1)/250.+1./(2*n_elements(matriz(*,0)))
820 plots,xs,ys,color=0,/normal
plots,xs(0),ys(0),color=0,/normal,/continue
xyouts,xs,ys,strtrim(fix(findgen(n_elements(xs))+1),2),color=0,/normal
;////////////////////////////////////////
end
825 else:
endcase
end
830 pro WID_BASE_0, GROUP_LEADER=wGroup, _EXTRA=_VWBExtra_
common objetos,objetos
common datos,datos
common flag,flag
835 common dentro,dentro
common sobre,sobre
common flag1,flag1
common flag2,flag2
common reg,reg
840 common mat_cos_acu,mat_cos_acu
common avan,avan
common mat_dir,mat_dir
common mat_final,mat_final
common costo_final,costo_final
845 common para_dib1,para_dib1

```

common matriz,matriz

850 WID\_BASE\_0 = Widget\_Base( GROUP\_LEADER=wGroup, Uvalue='WID\_BASE\_0' \$  
 ,SCR\_XSIZE=400 ,SCR\_YSIZE=10 ,TITLE='Localización de proyectos interconectados' \$  
 ,SPACE=3 ,XPAD=3 ,YPAD=3 ,mbar=bar)

855 WID\_BASE\_1 = Widget\_Base(WID\_BASE\_0, Uvalue='WID\_BASE\_1' \$  
 ,XOFFSET=292 ,YOFFSET=51 ,SCR\_XSIZE=330 ,SCR\_YSIZE=250 \$  
 ,TITLE='IDL' ,SPACE=3 ,XPAD=3 ,YPAD=3)

860 WID\_LABEL\_x = Widget\_Label(WID\_BASE\_1, Uvalue='WID\_LABEL\_x' \$  
 ,XOFFSET=255 ,YOFFSET=20 ,SCR\_XSIZE=80 ,SCR\_YSIZE=17 \$  
 ,/ALIGN\_left ,VALUE='X=')

WID\_LABEL\_y = Widget\_Label(WID\_BASE\_1, Uvalue='WID\_LABEL\_y' \$  
 ,XOFFSET=255 ,YOFFSET=40 ,SCR\_XSIZE=80 ,SCR\_YSIZE=17 \$  
 ,/ALIGN\_left ,VALUE='Y=')

865 WID\_LABEL\_cp = Widget\_Label(WID\_BASE\_1, Uvalue='WID\_LABEL\_cp' \$  
 ,XOFFSET=255 ,YOFFSET=60 ,SCR\_XSIZE=80 ,SCR\_YSIZE=17 \$  
 ,/ALIGN\_left ,VALUE='CP=')

870 WID\_LABEL\_c1 = Widget\_Label(WID\_BASE\_1, Uvalue='WID\_LABEL\_c1' \$  
 ,XOFFSET=255 ,YOFFSET=80 ,SCR\_XSIZE=80 ,SCR\_YSIZE=17 \$  
 ,/ALIGN\_left ,VALUE='C1=')

875 WID\_LABEL\_c2 = Widget\_Label(WID\_BASE\_1, Uvalue='WID\_LABEL\_c2' \$  
 ,XOFFSET=255 ,YOFFSET=100 ,SCR\_XSIZE=80 ,SCR\_YSIZE=17 \$  
 ,/ALIGN\_left ,VALUE='C2=')

WID\_LABEL\_c3 = Widget\_Label(WID\_BASE\_1, Uvalue='WID\_LABEL\_c3' \$  
 ,XOFFSET=255 ,YOFFSET=120 ,SCR\_XSIZE=80 ,SCR\_YSIZE=17 \$  
 ,/ALIGN\_left ,VALUE='C3=')

880 WID\_LABEL\_ct = Widget\_Label(WID\_BASE\_1, Uvalue='WID\_LABEL\_ct' \$  
 ,XOFFSET=255 ,YOFFSET=140 ,SCR\_XSIZE=80 ,SCR\_YSIZE=17 \$  
 ,/ALIGN\_left ,VALUE='')

885

widget\_control,WID\_BASE\_1,map=1

890 xt=250  
 yt=250

WID\_DRAW\_0 = Widget\_Draw(WID\_BASE\_1, Uvalue='WID\_DRAW\_0' ,XOFFSET=0 \$  
 ,YOFFSET=0 ,SCR\_XSIZE=xt ,SCR\_YSIZE=yt ,/MOTION\_EVENTS ,/BUTTON\_EVENTS)

895 WID\_BASE\_2 = Widget\_Base(WID\_BASE\_0, Uvalue='WID\_BASE\_2' ,XOFFSET=22 \$  
 ,YOFFSET=31 ,SCR\_XSIZE=220 ,SCR\_YSIZE=170 ,TITLE='Info\_coor' ,SPACE=3 \$  
 ,XPAD=3 ,YPAD=3)

900 WID\_BASE\_3 = Widget\_Base(WID\_BASE\_2, Uvalue='WID\_BASE\_2' ,XOFFSET=0 \$  
 ,YOFFSET=25 ,SCR\_XSIZE=220 ,SCR\_YSIZE=75 ,TITLE='Info\_coor' ,SPACE=3 \$  
 ,XPAD=3 ,YPAD=3)

905 widget\_control,WID\_BASE\_2,map=1

WID\_TABLE\_0 = Widget\_Table(WID\_BASE\_3, Uvalue='WID\_TABLE\_0' \$  
 ,XOFFSET=1 ,YOFFSET=100 ,SCR\_XSIZE=150 ,SCR\_YSIZE=50 ,/EDITABLE \$  
 ,COLUMN\_LABELS=[ 'X' , 'Y' ] ,ROW\_LABELS=[ '1' , \$  
 '2' , '3' ] ,XSIZE=2 ,YSIZE=3 ,value=[[2,3],[11,21],[21,10]],/all\_events)

910

```

WID_LABEL_0 = Widget_Label(WID_BASE_2, Uvalue='WID_LABEL_0' $
, XOFFSET=4 , YOFFSET=200 , SCR_XSIZE=198 , SCR_YSIZE=17 $
, /ALIGN_CENTER , VALUE='Coordenas de la red')
915

WID_LABEL_2 = Widget_Label(WID_BASE_2, Uvalue='WID_LABEL_2' $
, XOFFSET=4 , YOFFSET=117 , SCR_XSIZE=200 , SCR_YSIZE=18 $
, /ALIGN_LEFT , VALUE='Ecuación 1')
920

WID_LABEL_3 = Widget_Label(WID_BASE_2, Uvalue='WID_LABEL_3' $
, XOFFSET=4 , YOFFSET=159 , SCR_XSIZE=200 , SCR_YSIZE=18 $
, /ALIGN_LEFT , VALUE='Ecuación 3')
925

WID_LABEL_4 = Widget_Label(WID_BASE_2, Uvalue='WID_LABEL_4' $
, XOFFSET=3 , YOFFSET=138 , SCR_XSIZE=200 , SCR_YSIZE=18 $
, /ALIGN_LEFT , VALUE='Ecuación 2')
930

file_menu = WIDGET_BUTTON(bar, VALUE='Archivo', /MENU)
file_bbtn1=WIDGET_BUTTON(file_menu, VALUE='Abrir proyecto', UVALUE='Abrir_opt')
file_bbtn2_1=WIDGET_BUTTON(file_menu, VALUE='Salvar trabajo', UVALUE='save_work', $
/separator)
935 file_bbtn2=WIDGET_BUTTON(file_menu, VALUE='Salvar datos *.txt y gráfico *.PS', $
UVALUE='saveps_opt')
file_bbtn2_2=WIDGET_BUTTON(file_menu, VALUE='Salir', UVALUE='salir', /separator)
opciones_menu = WIDGET_BUTTON(bar, VALUE='Opciones', /MENU)
file_bbtn4=WIDGET_BUTTON(opciones_menu, VALUE='Visualizar matrices de criticidad' $
, UVALUE='b_crit', /MENU)
940 file_bbtn41=WIDGET_BUTTON(file_bbtn4, VALUE='red 1', UVALUE='b_crit1')
file_bbtn42=WIDGET_BUTTON(file_bbtn4, VALUE='red 2', UVALUE='b_crit2')
file_bbtn43=WIDGET_BUTTON(file_bbtn4, VALUE='red 3', UVALUE='b_crit3')
file_bbtn5=WIDGET_BUTTON(opciones_menu, VALUE='Visualizar matriz de costos', $
UVALUE='b_cost')
945 file_bbtn51=WIDGET_BUTTON(opciones_menu, VALUE='Visualizar matriz de costos totales' $
, UVALUE='b_cost_total')
file_bbtn6=WIDGET_BUTTON(opciones_menu, VALUE='Visualizar puntos dentro de la red', $
UVALUE='b_on', /separator)
950 file_bbtn7=WIDGET_BUTTON(opciones_menu, VALUE='Visualizar puntos sobre la red', $
UVALUE='b_in')
file_bbtn8=WIDGET_BUTTON(opciones_menu, VALUE='Ruta de mínimo costo', UVALUE='b_reg')
file_bbtn9=WIDGET_BUTTON(opciones_menu, VALUE='Análisis Puntual', $
UVALUE='b_ana_uno', /separator)
955 file_bbtn10=WIDGET_BUTTON(opciones_menu, VALUE='Análisis de Mínimo Costo Total', $
UVALUE='b_ana')
Acercade_menu = WIDGET_BUTTON(bar, VALUE='Acerca de', /MENU)
file_bbtn11=WIDGET_BUTTON(Acercade_menu, VALUE='Acerca de', uvalue='Acerca_de')

960 widget_control, file_bbtn51, sensitive=0
Widget_Control, /REALIZE, WID_BASE_0

XManager, 'WID_BASE_0', WID_BASE_0 , /no_block

965 objetos={WID_BASE_0:WID_BASE_0, $
WID_BASE_1:WID_BASE_1, $
WID_DRAW_0:WID_DRAW_0, $
WID_BASE_2:WID_BASE_2, $
WID_BASE_3:WID_BASE_3, $
970 WID_TABLE_0:WID_TABLE_0, $
WID_LABEL_0:WID_LABEL_0, $
WID_LABEL_2:WID_LABEL_2, $
WID_LABEL_3:WID_LABEL_3, $
WID_LABEL_4:WID_LABEL_4, $
975 xt:xt, yt:yt, $

```

```

WID_LABEL_x:WID_LABEL_x,$
WID_LABEL_y:WID_LABEL_y,$
WID_LABEL_cp:WID_LABEL_cp,$
980 WID_LABEL_c1:WID_LABEL_c1,$
WID_LABEL_c2:WID_LABEL_c2,$
WID_LABEL_c3:WID_LABEL_c3,$
WID_LABEL_ct:WID_LABEL_ct,$
file_bttn51:file_bttn51,$
file_bttn2:file_bttn2)
985
widget_control,objetos.file_bttn51,sensitive=0
;widget_control,objetos.file_bttn2,sensitive=0
flag1=-1
flag1=-1
990 flag2=0
end
;
; Empty stub procedure used for autoloading.
;
995 pre Ambiental, GROUP_LEADER=wGroup, _EXTRA= VWBExtra_
WID_BASE_0, GROUP_LEADER=wGroup, _EXTRA= VWBExtra_
loadct,39
end
1000 ;////////////////////Comentarios
;Lectura de datos:
;'*.pry' es el nombre del archivo que contiene la información de las coordenadas
;de la red,por parejas ordenas, el numero de columnas (n) y filas (m) de las
1005 ;matrices de criticidad y costos y el nombre de los archivos que contienen las
;matrices de criticidad y de costoslas matrices de criticidad deben tener el
;sufijo *_1.cri y la de costos *.cos que cuenta en su orden con los entradas de
;cada uno de los matricesvalores en cada una de las entradas ejemplo:
;archivo de proyecto
1010 ; X1 Y1
; X2 Y2
; X3 Y3
;n
;m
1015 ;increx
;incroy
;ejem.cos
;ejem_1.cri
;ejem_2.cri
1020 ;ejem_3.cri

;Archivos de matrices
;c(0,0),c(1,0),c(2,0),....,c(n,0)
;c(0,1),c(1,1),c(2,1),....,c(n,1)
1025 ;....
;....
;....
;c(0,m),c(1,m),c(2,m),....,c(n,m)
1030 ;////////////////////
;warning
;No puede haber rectas horizontales, o paralelas al eje de las abscisas

```

pro ruta

;Los parámetros de entrada de este procedimiento son:

;=datos: la estructura datos

5 ;-flag: la matriz de criticidad que se esta analizando

;=reg: las filas y columnas de inicio y final del análisis

;Los resultados son:

;=mat\_cos\_acu: La matriz de costo acumulado

;=mat\_dir: matriz de dirección asociada

10

common datos,datos

common flag,flag

common reg,reg

common mat\_cos\_acu,mat\_cos\_acu

15

common mat\_dir,mat\_dir

mat\_cos\_acu=datos.matrices(\*,\*,flag)

mat\_cos\_acu(\*,\*)=0

mat\_dir=datos.matrices(\*,\*,flag)

20

mat\_dir(\*,\*)=0

avan=avance(reg)

;stop

////////////////////////////////////

;calculo de la matriz de costos acumulado asociado a un punto de partida

; (ubicación tentativa del proyecto) y

; y un punto de llegada (sobre la red).

////////////////////////////////////

;x2 y2 estan asociados al punto de llegada (punto sobre la red)

;x1 y1 estan asociados al punto de salida (punto del proyecto)

30

for i=reg.x1,reg.x2,avan.ax do begin

for j=reg.y1,reg.y2,avan.ay do begin

if i eq reg.x1 and j eq reg.y1 then begin

;Esquina inicio

mat\_cos\_acu(i,j)=0

35

mat\_dir(i,j)=0

endif else begin

if i eq reg.x1 then begin

;Para borde del rectangulo seleccionado (Columna)

mat\_cos\_acu(i,j)=((datos.matrices(i,j,flag)+datos.matrices\$

40

(i,j-avan.ay,flag))/2.)\*datos.incrementoy+mat\_cos\_acu(i,j-avan.ay)

;dirección asociada

if avan.ay lt 0 then mat\_dir(i,j)=7 else mat\_dir(i,j)=3

endif else begin

45

if j eq reg.y1 then begin

;Para borde del rectangulo seleccionado (fila)

mat\_cos\_acu(i,j)=((datos.matrices(i,j,flag)+datos.matrices\$

(i-avan.ax,j,flag))/2.)\*datos.incrementox+mat\_cos\_acu(i-avan.ax,j)

50

;dirección asociada

if avan.ax lt 0 then mat\_dir(i,j)=1 else mat\_dir(i,j)=5

endif else begin

;general

uno=((datos.matrices(i,j,flag)+datos.matrices(i,j-avan.ay,flag))/2.)\$

\*datos.incrementoy+mat\_cos\_acu(i,j-avan.ay)

55

dos=((datos.matrices(i,j,flag)+datos.matrices(i-avan.ax,j,flag))/2.)\$

\*datos.incrementox+mat\_cos\_acu(i-avan.ax,j)

tres=((datos.matrices(i,j,flag)+datos.matrices\$

(i-avan.ax,j-avan.ay,flag))/2.)\*(datos.incrementox^2+\$

datos.incrementoy^2)^.5 + mat\_cos\_acu(i-avan.ax,j-avan.ay)

60

mat\_cos\_acu(i,j)=min([uno,dos,tres])

;dirección asociada

temp=where(min([uno,dos,tres]) eq [uno,dos,tres])

case temp(0) of

0:begin

65

if avan.ay lt 0 then mat\_dir(i,j)=7 else mat\_dir(i,j)=3

```

    end
    1:begin
        if avan.ax lt 0 then mat_dir(i,j)=1 else mat_dir(i,j)=5
    end
70    2:begin
        if avan.ay lt 0 and avan.ax lt 0 then mat_dir(i,j)=8
        if avan.ay gt 0 and avan.ax lt 0 then mat_dir(i,j)=2
        if avan.ay lt 0 and avan.ax gt 0 then mat_dir(i,j)=6
        if avan.ay gt 0 and avan.ax gt 0 then mat_dir(i,j)=4
75    end
        end
        endelse
        endelse
        endelse
80    endfor
    endfor
    end
end
```

85

90

```

;////////////////////Reconoce el sentido de busqueda
function avance,rcg
if reg.x1 le reg.x2 and reg.y1 le reg.y2 then begin
5  ;hacia arriba y a la derecha
   ax=1 & ay=1
   endif
   if reg.x1 ge reg.x2 and reg.y1 le reg.y2 then begin
10  ;hacia arriba y a la izquierda
    ax=-1 & ay=1
    endif
    if reg.x1 le reg.x2 and reg.y1 ge reg.y2 then begin
15  ;hacia abajo y a la derecha
     ax=1 & ay=-1
     endif
     if reg.x1 ge reg.x2 and reg.y1 ge reg.y2 then begin
20  ;hacia abajo y a la izquierda
      ax=-1 & ay=-1
      endif
      incre=(ax:ax, ay:ay)
      return, incre
    end
  end
```

