

13 01190



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

---

Facultad de Ingeniería

Análisis multitemporal de atributos  
y zonificación de áreas de inundación utilizando  
técnicas de percepción remota.

Tesis Doctoral  
como requisito para obtener  
el grado de  
Doctora en Ingeniería  
presenta

Ma. del Rosío Ruíz Urbano

Director de tesis: Dr. Gabriel Echávez Aldape



Cd. Universitaria, D. F.  
2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Esta tesis se la dedico a:*

*Mi mamá: Carmen Urbano de Ruiz (q.p.d.)*

*Mi esposo: Arturo Mozqueda Pérez.*

*Mis hijas: Diana y Sofia*

*Esperando justifique el tiempo que no les dedique en su momento.*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**AGRADECIMIENTOS:**

*Muy especialmente al Dr Gabriel Echávez Aldape por el apoyo que me brindó a lo largo de este proyecto.*

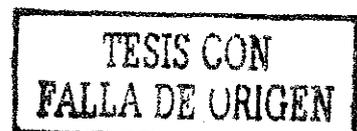
*A la Facultad de Ingeniería de la UNAM, que a través de las políticas de apoyo a profesores de carrera me impulsó para continuar mis estudios de posgrado.*

*Al Instituto de Geografía de la UNAM que proporcionó las imágenes de satélite.*

*Al Dr. Mario Ortiz Pérez por su condición siempre positiva ante éste proyecto.*

*A todos los que conformaron mi Comité Doctoral por todos sus valiosos comentarios que enriquecieron este trabajo.*

*A todas las personas que se vieron involucradas en mi trabajo y que por razones propias no menciono para no cometer el error de olvidar a alguno de ellos.*



ZONIFICACIÓN DE ÁREAS DE INUNDACIÓN Y ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE ATRIBUTOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA.

INDICE.

INTRODUCCIÓN.

APORTACIÓN DE LA TESIS.

|                 |   |           |
|-----------------|---|-----------|
| <b>CAP. I</b>   | <b>ANTECEDENTES Y OBJETIVO.</b>   | <b>1</b>  |
|                 | <i>I.1. Antecedentes.</i>   | <i>1</i>  |
|                 | <i>I.2. Objetivo.</i>   | <i>5</i>  |
|                 | <i>1.2.1. Objetivos específicos.</i>  | <i>5</i>  |
| <b>CAP. II</b>  | <b>ESQUEMA METODOLÓGICO PROPUESTO.</b>  | <b>6</b>  |
|                 | <i>II.1. Introducción.</i>  | <i>6</i>  |
|                 | <i>II.2. Metodología.</i>   | <i>6</i>  |
|                 | <i>II.3. Recomendaciones generales.</i>   | <i>16</i> |
| <b>CAP. III</b> | <b>ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO.</b>   | <b>18</b> |
|                 | <i>III.1. Análisis hidrológico.</i>   | <i>18</i> |
|                 | <i>III.2. Análisis hidráulico.</i>  | <i>20</i> |
|                 | <i>III.2.1. Flujo permanente.</i>   | <i>20</i> |
|                 | <i>III.2.2. Flujo no permanente.</i>  | <i>29</i> |
|                 | <i>III.3. Cálculo hidrológico e hidráulico para el caso de la Comarca Lagunera.</i> | <i>42</i> |
| <b>CAP. IV.</b> | <b>PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.</b>                      | <b>77</b> |
|                 | <i>IV.1. Definición de percepción remota</i>  | <i>77</i> |
|                 | <i>IV.2. Fundamentos de la observación remota.</i>                                  | <i>79</i> |
|                 | <i>IV.3. Sistemas espaciales de percepción remota.</i>                              | <i>80</i> |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| IV.4.      | Aspectos tecnológicos.  | 83  |
| IV.5.      | Bases para la interpretación de imágenes.                                     | 84  |
| IV.6.      | Clasificación digital.  | 89  |
| IV.7.      | Sistemas de Información geográfica.   | 90  |
|            | IV.7.1. Aplicaciones de la teledetección.                                     | 91  |
|            | IV.7.2. Ventajas y limitaciones.  | 92  |
| IV.8.      | Procesamiento de las imágenes de satélite de la Comarca Lagunera.             | 94  |
| <br>       |   |     |
| CAP. V.    | ZONIFICACIÓN DE ÁREAS DE INUNDACIÓN.  | 104 |
|            |   |     |
| V.1.       | Análisis de peligro de inundación.  | 108 |
| V.2.       | Análisis de la vulnerabilidad.  | 120 |
| V.3.       | Análisis de riesgo.   | 122 |
| <br>       |   |     |
| CAP. VI.   | MEDIDAS ESTRUCTURALES Y NO ESTRUCTURALES.                                     | 129 |
|            |   |     |
| VI.1.      | Medidas estructurales.  | 130 |
| VI.2.      | Medidas no estructurales.   | 131 |
| VI.3.      | Plan para la atención de emergencias causadas por inundaciones del río Nazas. | 132 |
| <br>       |   |     |
| CAP. VII.  | APLICACIÓN DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE EN EL CASO DE LA COMARCA LAGUNERA.     | 140 |
|            |   |     |
| VII.1.     | Análisis de peligro, vulnerabilidad y riesgo                                  | 140 |
| VII.2.     | Análisis multitemporal.   | 151 |
| <br>       |   |     |
| CAP. VIII. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.   | 164 |
|            |   |     |
| VIII.1.    | Conclusiones.   | 164 |
| VIII.2.    | Recomendaciones.  | 167 |
| <br>       |   |     |
|            | BIBLIOGRAFÍA.   | 169 |

## INDICE DE FIGURAS.

### CAPITULO II

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Fig. II.1.  | <i>Esquema metodológico general.</i>                    | 7  |
| Fig. II.2.  | <i>Ubicación geográfica de la zona de estudio.</i>      | 8  |
| Fig. II.3.  | <i>Esquema del análisis hidrológico.</i>                | 9  |
| Fig. II.4.  | <i>Adquisición de imágenes de percepción remota.</i>    | 10 |
| Fig. II.5.  | <i>Esquema del análisis hidráulico.</i>                 | 11 |
| Fig. II.6.  | <i>Estudio y procesamiento de las imágenes.</i>         | 12 |
| Fig. II.7.  | <i>Esquema del análisis de zonificación.</i>            | 13 |
| Fig. II.8.  | <i>Esquema del análisis multitemporal.</i>              | 14 |
| Fig. II.9.  | <i>Modelación del cambio geomorfológico del río.</i>    | 14 |
| Fig. II.10. | <i>Modelación del cambio de área de la zona urbana.</i> | 15 |
| Fig. II.11. | <i>Modelación del peligro, vulnerabilidad y riesgo.</i> | 16 |

### CAPITULO III

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Fig. III.1. | <i>Representación en términos de la ecuación de la energía.</i> | 21 |
| Fig. III.2. | <i>Factor de conducción.</i>                                    | 22 |
| Fig. III.3. | <i>Ejemplo de carga de energía cinética representativa</i>      | 22 |
| Fig. III.4. | <i>Secciones transversales en un puente.</i>                    | 27 |
| Fig. III.5. | <i>Puentes paralelos.</i>                                       | 28 |
| Fig. III.6. | <i>Puente asimétrico.</i>                                       | 28 |
| Fig. III.7. | <i>Puente con aberturas múltiples.</i>                          | 28 |

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

|   |    |
|---|----|
| <i>Fig. III.7a. Volumen de control en las llanuras.</i>                       | 39 |
| <i>Fig. III.7b. Tipos de flujo entre elementos de la llanura.</i>             | 40 |
| <i>Fig. III.8. Ubicación de la Comarca Lagunera en la República Mexicana.</i> | 43 |
| <i>Fig. III.9. Localización de la región hidrológica No. 36.</i>              | 43 |
| <i>Fig. III.10. Representación gráfica de las estaciones hidrométricas.</i>   | 45 |
| <i>Fig. III.11. Comparación de gastos anuales.</i>                            | 49 |
| <i>Fig. III.12. Hidrograma de diseño para <math>T = 100</math> años.</i>      | 49 |
| <i>Fig. III.13. Fotografía aérea de la zona de estudio.</i>                   | 50 |
| <i>Fig. III.14. Ubicación de algunas secciones transversales.</i>             | 52 |
| <i>Fig. III.15. Sección transversal del río Nazas (cadenamiento 22+000).</i>  | 53 |
| <i>Fig. III.16. Datos de una sección transversal en HEC-RAS.</i>              | 53 |
| <i>Fig. III.17. Puente Ferrocarril.</i>                                       | 55 |
| <i>Fig. III.18. Modelación del Puente Doble.</i>                              | 56 |
| <i>Fig. III.19. Puente Ramos Arispe.</i>                                      | 57 |
| <i>Fig. III.20. Puente Solidaridad.</i>                                       | 58 |
| <i>Fig. III.21. Puente Salvador Creel.</i>                                    | 59 |
| <i>Fig. III.22. Perfiles de flujo obtenidos con el HEC-RAS.</i>               | 63 |
| <i>Fig. III.23. Perfiles de flujo obtenidos con el programa RED-RIOS.</i>     | 68 |
| <i>Fig. III.24. División en planta de los 12 tramos</i>                       | 69 |
| <i>Fig. III.25. Planicies de inundación para <math>t = 1</math> hora.</i>     | 72 |
| <i>Fig. III.26. Planicies de inundación para <math>t = 14</math> horas</i>    | 73 |
| <i>Fig. III.27. Planicies de inundación para <math>t = 21</math> horas.</i>   | 74 |

|                     |  |           |
|---------------------|--|-----------|
| <b>Fig. III.28.</b> | <b>Planicies de inundación para <math>t = 35</math> horas.</b> | <b>75</b> |
|---------------------|--|-----------|

**CAPITULO IV**

|                    |   |            |
|--------------------|---|------------|
| <b>Fig. IV.1.</b>  | <b>Esquema de la generación de una imagen digital multiespectral.</b>                               | <b>77</b>  |
| <b>Fig. IV.2.</b>  | <b>Espectro electromagnético.</b>   | <b>80</b>  |
| <b>Fig. IV.3.</b>  | <b>Organización de una imagen digital.</b>  | <b>88</b>  |
| <b>Fig. IV.4.</b>  | <b>Banda 5 de la década de los 80's.</b>  | <b>95</b>  |
| <b>Fig. IV.5.</b>  | <b>Histograma de la banda 5 de las década de los 80's.</b>  | <b>96</b>  |
| <b>Fig. IV.6.</b>  | <b>Banda 5 de la década de los 80's, con la aplicación de la técnica del estrechamiento lineal.</b> | <b>97</b>  |
| <b>Fig. IV.7.</b>  | <b>Histograma de la banda 5 de la década de los 80's con la técnica del estrechamiento lineal.</b>  | <b>97</b>  |
| <b>Fig. IV.8.</b>  | <b>Composición en falso color de la década de los 90's para realce de la mancha urbana.</b>         | <b>99</b>  |
| <b>Fig. IV.9.</b>  | <b>Ejemplo de la estadística de muestreo para la clase: área urbana de la década de los 70's.</b>   | <b>100</b> |
| <b>Fig. IV.10.</b> | <b>Imagen clasificada para realce de la mancha urbana de la década de los 90's.</b>                 | <b>102</b> |
| <b>Fig. IV.11.</b> | <b>Imagen clasificada anterior con filtro "Majority".</b>   | <b>102</b> |

**CAPITULO V**

|                  |  |            |
|------------------|--|------------|
| <b>Fig. V.1.</b> | <b>Superposición de fotografía aérea con planos digitalizados.</b> | <b>106</b> |
| <b>Fig. V.2.</b> | <b>Superposición de plano digitalizado con imagen de satélite.</b> | <b>107</b> |
| <b>Fig. V.3.</b> | <b>Pendientes de terreno.</b>                                      | <b>110</b> |
| <b>Fig. V.4.</b> | <b>Volúmenes de inundación acumulados.</b>                         | <b>113</b> |

## CAPITULO VII

|  |     |
|--|-----|
| <i>Fig. VII.1. Niveles de peso en un plano con orografía.</i>                    | 144 |
| <i>Fig. VII.2. Mapa de niveles de peligro en la región.</i>                      | 145 |
| <i>Fig. VII.3. Mapa de niveles de vulnerabilidad.</i>                            | 147 |
| <i>Fig. VII.4. Mapa de riesgo en la región.</i>                                  | 149 |
| <i>Fig. VII.5. Composición en falso color para realzar la mancha urbana.</i>     | 152 |
| <i>Fig. VII.6. Combinación de bandas 5, 6 y 7 para realzar el río.</i>           | 153 |
| <i>Fig. VII.7. Zona urbana en 1972.</i>  | 154 |
| <i>Fig. VII.8. Zona urbana en 1983.</i>  | 155 |
| <i>Fig. VII.9. Zona urbana en 1992.</i>  | 155 |
| <i>Fig. VII.10. Cauce del río entre los años 1972 y 1983.</i>                    | 156 |
| <i>Fig. VII.11. Censo poblacional de la Comarca Lagunera.</i>                    | 157 |
| <i>Fig. VII.12. Cambio temporal de la mancha urbana de los años 1972 a 1992.</i> | 161 |
| <i>Fig. VII.13. Cambio temporal del río Nazas de los años 1972 a 1992.</i>       | 162 |

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## INDICE DE TABLAS.

### CAPITULO III

|  |    |
|--|----|
| <i>Tabla III.1. Factores de pérdida por contracción y expansión.</i>   | 24 |
| <i>Tabla III.2. Estaciones hidrométricas en la región hidrológica 36.</i>  | 45 |
| <i>Tabla III.3. Número de años de registro de las estaciones hidrométricas.</i>                                      | 46 |
| <i>Tabla III.3a. Registro histórico en las estaciones hidrométricas.</i>   | 47 |
| <i>Tabla III.3b. Resumen de errores en la estación Coyote.</i>   | 48 |
| <i>Tabla III.4. Resultado del análisis de frecuencia.</i>  | 48 |
| <i>Tabla III.4a. Comparación de gastos medidos y calculados.</i>   | 54 |
| <i>Tabla III.5. Perfiles de agua. <math>Q = 550 \text{ m}^3/\text{s}</math>. <math>T = 10</math> años.</i>           | 61 |
| <i>Tabla III.6. Perfiles de agua. <math>Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}</math>. <math>T = 20</math> años.</i>          | 61 |
| <i>Tabla III.7. Perfiles de agua. <math>Q = 1600 \text{ m}^3/\text{s}</math>. <math>T = 50</math> años.</i>          | 62 |
| <i>Tabla III.8. Perfiles de agua. <math>Q = 1900 \text{ m}^3/\text{s}</math>. <math>T = 100</math> años.</i>         | 62 |
| <i>Tabla III.9. Tramos para flujo no permanente.</i>   | 65 |
| <i>Tabla III.10. Flujo permanente. <math>Q = 1900 \text{ m}^3/\text{s}</math>.</i>                                   | 66 |
| <i>Tabla III.11. Flujo no permanente. <math>t = 7 \text{ h}</math>. <math>Q = 1900 \text{ m}^3/\text{s}</math>.</i>  | 66 |
| <i>Tabla III.12. Flujo no permanente. <math>t = 14 \text{ h}</math>. <math>Q = 1900 \text{ m}^3/\text{s}</math>.</i> | 66 |
| <i>Tabla III.13. Flujo no permanente. <math>t = 21 \text{ h}</math>. <math>Q = 1900 \text{ m}^3/\text{s}</math>.</i> | 67 |
| <i>Tabla III.14. Flujo no permanente. <math>t = 28 \text{ h}</math>. <math>Q = 1900 \text{ m}^3/\text{s}</math>.</i> | 67 |
| <i>Tabla III.15. Flujo no permanente. <math>t = 35 \text{ h}</math>. <math>Q = 1900 \text{ m}^3/\text{s}</math>.</i> | 67 |
| <i>Tabla III.16. Tramos de inundación. <math>t = 1 \text{ h}</math>.</i>   | 70 |
| <i>Tabla III.17. Tramos de inundación. <math>t = 7 \text{ h}</math>.</i>   | 70 |



|  |    |
|--|----|
| <i>Tabla III.18. Tramos de inundación. t = 14 h.</i> | 71 |
| <i>Tabla III.19. Tramos de inundación. t = 21 h.</i> | 71 |
| <i>Tabla III.20. Tramos de inundación. t = 28 h.</i> | 71 |
| <i>Tabla III.21. Tramos de inundación. t = 35 h.</i> | 71 |

#### CAPITULO IV

|  |     |
|--|-----|
| <i>Tabla IV.1. Principales satélites de percepción remota.</i>         | 84  |
| <i>Tabla IV.2. Principales satélites del medio ambiente y radar.</i>   | 85  |
| <i>Tabla IV.3. Comparación entre tratamiento visual y digital.</i>     | 86  |
| <i>Tabla IV.4. Combinación entre bandas.</i>                           | 98  |
| <i>Tabla IV.5. Clases definidas para la clasificación supervisada.</i> | 100 |

#### CAPITULO V

|   |     |
|---|-----|
| <i>Tabla V.1. Niveles de peligro. Criterio hidrológico.</i>         | 108 |
| <i>Tabla V.2. Probabilidad de peligro.</i>                          | 109 |
| <i>Tabla V.3. Criterio geomorfológico.</i>                          | 109 |
| <i>Tabla V.4. Velocidades promedio, máximas y mínimas.</i>          | 110 |
| <i>Tabla V.6. Niveles de peligro para niveles de agua.</i>          | 111 |
| <i>Tabla V.7. Áreas y volúmenes de inundación.</i>                  | 112 |
| <i>Tabla V.8. Determinación del volumen esperado de inundación.</i> | 112 |
| <i>Tabla V.9. Niveles de peligro por volumen acumulado.</i>         | 113 |
| <i>Tabla V.10. Niveles de vulnerabilidad.</i>                       | 122 |
| <i>Tabla V.11. Riesgo propuesto.</i>                                | 122 |



## CAPITULO VI

|  |     |
|--|-----|
| <i>Tabla VI.1. Niveles de peligro por inundación.</i>          | 134 |
| <i>Tabla VI.2. Niveles de inundación en calles y colonias.</i> | 135 |

## CAPITULO VII

|  |     |
|--|-----|
| <i>Tabla VII.1. Pesos asignados por peligro de inundación.</i>                 | 142 |
| <i>Tabla VII.2. Pesos asignados por peligro en el río.</i>                     | 142 |
| <i>Tabla VII.3. Pesos asignados por peligro por relieves.</i>                  | 142 |
| <i>Tabla VII.4. Niveles de peligro propuestos.</i>                             | 143 |
| <i>Tabla VII.5. Vulnerabilidad en los caminos.</i>                             | 144 |
| <i>Tabla VII.6. Vulnerabilidad en las ciudades.</i>                            | 144 |
| <i>Tabla VII.7. Niveles generales de vulnerabilidad.</i>                       | 144 |
| <i>Tabla VII.8. Niveles de riesgo propuestos por la autora.</i>                | 147 |
| <i>Tabla VII.9. Peso que identifica el tipo de zona en la imagen.</i>          | 151 |
| <i>Tabla VII.10. Pesos en la imagen para identificar el río.</i>               | 154 |
| <i>Tabla VII.11. Resultados obtenidos en los censos poblacionales.</i>         | 156 |
| <i>Tabla VII.12. Población interpolada del registro histórico.</i>             | 157 |
| <i>Tabla VII.13. Superficies obtenidas de la imagen de satélite procesada.</i> | 158 |
| <i>Tabla VII.14. Densidad de población en la Comarca Lagunera.</i>             | 158 |
| <i>Tabla VII.15. Cambio en porcentaje de la zona urbana de 1972 a 1992.</i>    | 158 |
| <i>Tabla VII.16. Cambio en el crecimiento urbano.</i>                          | 159 |
| <i>Tabla VII.17. Tendencia de crecimiento con método aritmético al 2010.</i>   | 159 |
| <i>Tabla VII.18. Tendencia de crecimiento con método geométrico al 2010.</i>   | 159 |



## INDICE DE FOTOS.

### CAPITULO III

|                    |                                  |    |
|--------------------|----------------------------------|----|
| <i>Foto III.1.</i> | <i>Sitio Puente-ferrocarril.</i> | 51 |
| <i>Foto III.2.</i> | <i>Puente Ferrocarril.</i>       | 55 |
| <i>Foto III.3.</i> | <i>Puente Doble.</i>             | 56 |
| <i>Foto III.4.</i> | <i>Puente Ramos Arispe.</i>      | 57 |
| <i>Foto III.5.</i> | <i>Puente Solidaridad.</i>       | 58 |
| <i>Foto III.6.</i> | <i>Puente Salvador Creel.</i>    | 59 |

### CAPITULO V

|                   |   |     |
|-------------------|---|-----|
| <i>Foto V.1..</i> | <i>Zona de inundación cercana al puente Doble. Q = 550 m<sup>3</sup>/s.</i> | 117 |
| <i>Foto V.2.</i>  | <i>Otra vista de la zona de inundación.</i>                                 | 118 |
| <i>Foto V.3.</i>  | <i>Zona de inundación vista desde Gómez Palacio, Durango.</i>               | 119 |

## INDICE DE PLANOS.

### CAPITULO V

|                   |   |     |
|-------------------|---|-----|
| <i>Plano V.1.</i> | <i>Mapa general de peligro de inundación.</i>         | 115 |
| <i>Plano V.2.</i> | <i>Mapa local de peligro de inundación.</i>           | 116 |
| <i>Plano V.3.</i> | <i>Mapa general de vulnerabilidad por inundación.</i> | 123 |
| <i>Plano V.4.</i> | <i>Mapa local de vulnerabilidad por inundación.</i>   | 124 |
| <i>Plano V.5.</i> | <i>Mapa general de riesgo por inundación.</i>         | 126 |
| <i>Plano V.6.</i> | <i>Mapa local de riesgo por inundación.</i>           | 127 |

## INTRODUCCIÓN.

*El estudio de las inundaciones, sobre todo en zonas pobladas, es de gran importancia, pues permite tomar medidas que salven vidas humanas y que disminuyan sustancialmente las pérdidas materiales que causan. Por lo anterior dentro de los planes de desarrollo de cada entidad se deben de hacer este tipo de estudios para así desarrollar los recursos técnicos y humanos que se requieran.*

*Este trabajo desarrolla una metodología para la mitigación de daños por inundación a través de la técnica de la zonificación, utilizando tecnología de vanguardia a través de las imágenes fotográficas tradicionales, digitalizadas y satelitales. También comprende un análisis regional de los atributos necesarios como crecimiento de la mancha urbana, zonas de peligro, vulnerabilidad y riesgo en la región en estudio y cambios en la geomorfología del río.*

*El trabajo se presenta en ocho capítulos que van desde los antecedentes del tema hasta un análisis multitemporal incluyendo el peligro, vulnerabilidad y riesgo de la región.*

*El primer capítulo incluye los antecedentes que existen en relación a las inundaciones en el último siglo así como los objetivos finales y específicos de la tesis.*

*La presentación de la propuesta metodológica que se sugiere para resolver un problema de zonificación de áreas de inundación que contempla un enlace entre los resultados del análisis hidrológico e hidráulico con las técnicas de percepción remota, se presenta en el capítulo II. Asimismo, incluye el esquema metodológico con recomendaciones generales al mismo.*

*Los capítulos III y IV denominados "Análisis Hidrológico e Hidráulico y Percepción Remota" respectivamente presentan la teoría utilizada en el estudio así como su aplicación a un ejemplo práctico como es el caso de la Comarca Lagunera.*

*El estudio hidrológico basado en los datos de las estaciones hidrométricas de la región se llevó a cabo con el método de Análisis de Frecuencia para identificar claramente los eventos de diseño en diferentes periodos de retorno que van de 2 a 100 años, para después considerar a aquellos que pueden causar problemas de inundación. Dicha información se utilizó para realizar el análisis hidráulico utilizando un paquete de programación denominado "Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS)" que permite determinar los niveles de la superficie libre en flujo permanente, para después utilizar el programa RED-RIOS y hacer una corrida en flujo no permanente, para después definir las zonas de inundación de acuerdo con su probabilidad de ocurrencia.*

*El capítulo IV "Percepción Remota", presenta las bases teóricas del tema así como el procesamiento de las imágenes de satélite Landsat MSS (Multispectral Scanner), que se*

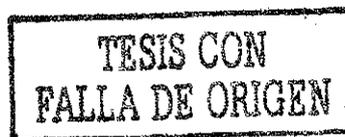
dispusieron para el caso de la Comarca Lagunera. Dicho procesamiento consistió en una interpretación visual, supervisada y no supervisada, de las imágenes de satélite, diferenciándolas de acuerdo con su respuesta a distintas porciones del espectro electromagnético y clasificándolas a partir de sus afinidades, realzando así los atributos a estudiar.

El capítulo V "Zonificación de áreas de inundación" presenta los planos topográficos digitalizados de la zona de estudio y, con el resultado de los perfiles obtenidos en el análisis hidráulico, la zonificación por inundación de la región. La información obtenida en este capítulo sirvió para presentar los resultados cuantitativos de peligro, vulnerabilidad y riesgo en la zona urbana, con base en criterios hidrológicos y geomorfológicos propuestos, obteniendo así sus planos correspondientes.

Definidos los escenarios de inundación se proponen las medidas de protección tanto estructurales como no estructurales (institucionales), presentando en el capítulo VI un plan para la atención de emergencias en la Comarca Lagunera.

El capítulo VII contempla la utilización de las imágenes de satélite para presentar un análisis de peligro, vulnerabilidad y riesgo en forma cualitativa, así como un análisis multitemporal de la región considerando los siguientes atributos: geomorfología del río y tendencias en el crecimiento de la zona urbana.

Finalmente, el capítulo VIII presenta las conclusiones y recomendaciones del estudio.



## **APORTACIÓN DE LA TESIS**

*Dado el riesgo a las vidas humanas y la cuantía de los daños que se deben a las inundaciones, de zonas altamente urbanizadas, es importante desarrollar métodos que utilicen técnicas e información lo más actualizada posible y que ataquen el problema en forma integral sin dejar fuera efectos que podrían tener consecuencias catastróficas*

*Esta tesis aporta una metodología general para resolver problemas de inundaciones y propone una base para continuar estudios de más detalle, identificando las zonas de más riesgo y las componentes principales del problema*

*Esta metodología, integra diferentes disciplinas como la Hidrología, la Hidráulica, la Percepción Remota y la Cartografía para obtener tanto una solución general como particular del problema, siendo entonces importante para efectos de planeación regional, utilizando la información disponible y proponiendo una solución para la toma de decisiones adecuadas y oportunas.*

*El esquema metodológico propuesto, puede ser ajustado de acuerdo a las necesidades del proyecto en cualquier región geográfica del país*

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## CAPITULO I

### ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.

#### 1.1. ANTECEDENTES.

*Un aspecto importante con que cuenta México son los recursos hidráulicos, el uso indiscriminado de éstos da como resultado una serie de daños que perjudican el medio ambiente y la población. Esto puede ser evitado o al menos disminuido, al hacer uso de técnicas hidrológicas e hidráulicas basadas en estudios formales que puedan asegurar que los recursos naturales y humanos no se encuentren en riesgo.*

*Por otro lado, para llevar a cabo una buena planeación de recursos, es necesario realizar un análisis que nos permita entender entre otras cosas, los cambios producidos en el tiempo, para poder predecir su comportamiento y contar con los elementos necesarios para tomar decisiones acertadas.*

*Se ha observado que para tener una estimación adecuada de los recursos existentes por medios tradicionales, como son los estudios de campo y el uso de la cartografía, se requiere más dinero y personal calificado que utilizando imágenes de satélite ya que estas son una caracterización digital de terreno y cubren grandes áreas. Además los satélites recientes cuentan con instrumentos de alta resolución espacial, en algunos casos comparables a la de una fotografía aérea, con la ventaja de analizarse a través de la computadora.*

*En México, las imágenes de satélite han tenido un uso limitado pues han sido vistas como un producto que requiere de grandes y poderosos centros de cómputo para su almacenamiento y manejo. Sin embargo, con la llegada de las computadoras personales cada vez más económicas y poderosas, se dio auge al desarrollo de sistemas de procesamiento digital de imágenes.*

*México tiene una gran necesidad de analizar profundamente los problemas de inundación que aquejan nuestros estados, es por ello que reviste una gran importancia el hecho de obtener respuestas confiables y a corto plazo, para agilizar la planeación de esas zonas.*

*La combinación propuesta entre análisis tradicional y el uso de técnicas de percepción remota nos proporciona una respuesta rápida y actualizada con la ventaja de seguirla alimentando para futuras contingencias.*

*México tiene una gran variedad de artículos técnicos publicados en revistas y libros especializados que hablan de la importancia de estudiar las inundaciones, sin embargo, se ha visto que muchas investigaciones se han quedado detenidas exclusivamente en el*

contexto teórico de análisis. Se han presentado estudios a nivel regional de las consecuencias de las inundaciones y se proponen medidas para mitigar dichos efectos

Este trabajo pretende dar el paso siguiente entre el análisis técnico de la inundación y su zonificación presentando los resultados en un esquema que hoy en día representa una de las herramientas que serán explotadas en un futuro muy cercano los sistemas de información geográfica

A continuación se presenta una breve reseña de los principales desastres ocurridos por inundaciones, ciclones y huracanes en el presente siglo por décadas

**Primera década**, se tienen registrados dos fuertes huracanes que azotaron en 1902 y 1903, a Salina Cruz y Yucatán. La tromba que en 1907 destruye la población de San José del Cabo en Baja California, y dos fuertes sismos que se presentaron en 1909 en la ciudad de México y que ocasionaran muchos derrumbes, algunos muertos y gran alarma entre la población

**Segunda década**, de 1910 a 1919 pueden mencionarse once graves inundaciones, destacándose por su magnitud la ocurrida en 1911 que destruyó media población de la Piedad Michoacán y aquella que en 1917, provocó el desbordamiento del río Nazas

De los ciclones que azotaron las costas destacan por su intensidad el de 1912 que destruyó el puerto de Acapulco, el de 1916 que azotó la Península de Yucatán, el de 1917 que devastó Colima, el de 1918 que hizo lo mismo con Baja California y el de 1919 que causó estragos en Sinaloa

**Tercera década**, Con respecto a las inundaciones se registraron 123 de cierta gravedad, destacando aquellas que produjeron la ruptura de la presa de Sotol, en Pachuca en 1921 y la que en 1926, ocasionó como producto del desbordamiento del río Santiago en Nayarit la muerte de 2000 personas, nueve mil damnificados y numerosas pérdidas materiales. En esta década 17 ciclones de diversas magnitudes azotaron las costas del país

**Cuarta década**. En la década de 1930 a 1939 las catástrofes por inundación abundaron tanto en número como en magnitud.

Se registraron 46 inundaciones graves, entre las que sobresalen la de Nogales en 1930, la del Río Bravo en 1931 y especialmente la de 1935 provocada por la ruptura de la presa San José de San Luis Potosí, que provocó cientos de víctimas y la tromba que ocasionó más de 130 muertos en Milpa Alta en 1935.

De los 31 ciclones de dimensiones considerables, se recuerda especialmente el de 1930, que produjo estragos en Manzanillo y otros lugares de Colima, así como el de 1932 en la misma región, el de Tampico en 1933, fue tan fuerte que sus víctimas se contaron por miles y gran parte de la ciudad quedó destruida

**Quinta década.** Hubo 29 ciclones de cierta intensidad, destacando los que azotaron Orizaba, Baja California, Cozumel y Mazatlán en 1940, 1941, 1942 y 1948 respectivamente

Las inundaciones de mayores consecuencias fueron las de 1941, en Angangueo, Michoacán, así como la provocada por el Nazas en Parral, que produjo 100 muertos y 5000 personas sin hogar.

**Sexta década** De 1950 a 1959 se reportaron numerosas inundaciones que produjeron graves consecuencias especialmente en la cuenca del río Papaloapan en 1950, en 1955 al desbordarse el Panuco, el puerto de Tampico quedó bajo las aguas, en 1957 desaparecieron bajo las aguas de Coixtla en Puebla, dos poblados, y el de los últimos años se mencionan las inundaciones del bajo y el occidente en 1958 y 1959

Entre los huracanes destacaron muy especialmente el Janet en 1955, que destruyó las poblaciones de Chetumal y Xcalac y ocasionó la muerte de 200 personas

**Séptima década** De 1960 a 1969 se tiene noticia de numerosas inundaciones severas entre las cuales las más importantes fueron en 1964, una que afectó en centro y occidente del país y otras en 1967, que dejaron más de un millón de damnificados, afectando principalmente los estados de Tamaulipas, Durango y Tabasco, por último cabe mencionar el desborde del río Papaloapan que dejó muchos damnificados y obligó a dinamitar la barra del río.

De los doce ciclones más importantes se recuerda el nombre del Tara, que en 1961 destruyó Nuxco en Guerrero, el Kristen que azotó Sinaloa y el Ines, la península de Yucatán en 1966, el Katherine que destruyó San Felipe, Baja California y el Beulah que golpeó Matamoros, Tamaulipas en 1967.

**Octava década** De 1970 a 1979 tuvieron lugar 41 inundaciones de graves proporciones, entre ellas la de 1970 en la Ciudad de México que dejó un saldo de 100,000 personas sin hogar, las de 1971 a 1973 en que se reventaron dos presas, una en Jalisco y otra en el Distrito Federal y especialmente la inundación en Irapuato que provocó más de 100 muertos y 150,000 afectados

En los ciclones destacan el Lilly, que azotó las costas de Colima en 1971, originando 5000 damnificados, el Carmen que devastó Chetumal, El Fifi y el Orleona que afectaron a Chihuahua y Veracruz y especialmente el Lisa que entró en la Paz en 1976 causando 600 muertos, 14,000 heridos y 100,000 personas sin hogar, por último cabe mencionar el huracán David, uno de los más fuertes que se recuerda que golpeó Yucatán y el Caribe en 1979

**Novena década.** En los últimos años, se han presentado varios huracanes destacando el Olivia que afectó la Costa del Pacífico, en 1982; el Paul que arrasó varios pueblos de

*Sinaloa y Baja California en 1982, el Rosa que azotó las costas de Guerrero y el Tico que causó graves daños en Mazatlán*

*En cuanto a las inundaciones sobresalen las de Arandas, Jalisco, en 1980, que causaron la muerte de 100 personas, la de 1984 que causó 12,300 damnificados en el área del Panuco afectando principalmente a Veracruz y Tamaulipas y, por último la del río de los Remedios, cercano a la capital que daño a mas de 100,000 personas*

*En 1988 el huracán Gilberto produjo 272 muertes e innumerables inundaciones a lo largo del territorio Nacional*

***Décima década.*** *En el año de 1993 destac an las lluvias de Tijuana con 47 muertos, los huracanes Gert y Calvin en el sureste del territorio nacional con 92 muertes y daños incuantificables en la zona de cultivo y a la industria ganadera, la tormenta Hilary y el huracán Lidia en el noroeste de la República con un saldo de 90 muertos*

*En 1997, el huracán Paulina que dejó una gran cantidad de muertes y de damnificados, provocando graves daños en diversas zonas del país.*

*Las inundaciones, producto de lluvias torrenciales que azotaron la Costa de Chiapas y el Pacífico Sur en septiembre de 1998, causaron graves daños y lamentables pérdidas de vidas humanas Las comunidades más afectadas fueron: Belisario Dominguez, Huixtla, Motozintla, Libertad Frontera, Loma Grande, Cabañas, Horizonte, Jagüey, Chalaca y Colonia Hidalgo Se observó que el lecho del río Toliman, se agrandó por lo menos tres veces su tamaño normal*

*En noviembre de 1998, las inundaciones en municipios de Campeche y Yucatán a causa de la tormenta Mitch, provocaron muerte y miles de damnificados, así como puentes destruídos a su paso*

*Finalmente, en octubre de 1999 fueron devastadores los efectos de las inundaciones por causa de las desmedidas lluvias que azotaron los estados de Veracruz, Tabasco, Hidalgo, Puebla y Oaxaca*

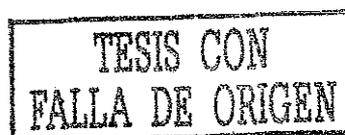
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 1.2. OBJETIVO.

*Proponer una metodología para determinar la zonificación por inundación, presentando los diferentes niveles de peligro, vulnerabilidad y riesgo en una zona urbana y realizar un análisis multitemporal de la región, utilizando la vinculación entre análisis hidrológico e hidráulico con técnicas de percepción remota*

### 1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- 1 - *Presentar la metodología propuesta para vincular el problema de inundación con técnicas de percepción remota*
- 2 - *Establecer recomendaciones para la utilización de la metodología propuesta*
- 3 - *Determinar los gastos pico y sus hidrogramas de diseño para distintos periodos de retorno.*
- 4 - *Estimar los perfiles de agua correspondientes tanto en flujo permanente como no permanente.*
- 5 - *Digitalizar las cartas nacionales necesarias para la zona de estudio.*
- 6 - *Interpretar las imágenes de satélite y/o fotografías aéreas para su aplicación en el análisis multitemporal*
- 7 - *Determinar la extensión de las llanuras de inundación con ayuda de los sistemas de información geográfica.*
- 8 - *Evaluar los daños producidos por la inundación*
- 9 - *Estimar cuantitativamente las zonas de peligro, vulnerabilidad y riesgo por inundación en una zona urbana*
- 10 - *Generar un plan para la atención de emergencias causadas por inundaciones*
- 11 - *Mostrar un análisis cualitativo del peligro, vulnerabilidad y riesgo de una región bajo condiciones de crecimiento demográfico, zonas de inundación, vías de comunicación importantes, topografía, ríos existentes, utilizando la información de las imágenes de satélite.*
- 12 - *Realizar el análisis multitemporal de la zona para señalar la afectación causada por el crecimiento urbano y el cambio geomorfológico del río en el tiempo y generar propuestas y/o recomendaciones de planeación.*



## CAPITULO II

### ESQUEMA METODOLÓGICO PROPUESTO.

#### II.1. INTRODUCCIÓN.

*Se iniciará este trabajo con la presentación de la metodología propuesta para vincular el análisis hidrológico e hidráulico con el uso de las imágenes de satélite, considerando que las aplicaciones de la teledetección espacial son muy numerosas, por lo que resulta complejo establecer un marco general, que pueda ser válido para todas ellas. No obstante, es conveniente introducir algunas ideas sobre el proceso de trabajo con las imágenes considerando que no será difícil que cada persona pueda ajustar este esquema a sus propios intereses*

*El proceso propuesto contempla en principio, una fase de definición expresa y concreta de objetivos, señalando las limitaciones que se presentan, ya sea derivados del área de estudio, del tiempo o de la escala requeridos en el trabajo de acuerdo con los medios disponibles*

*Hecho lo anterior, el esquema general se presenta en seis niveles de desarrollo (Fig II 1)*

- 1er Nivel.** *En el primer nivel se contempla la ubicación geográfica de la zona de estudio*
- 2º Nivel.** *Se trabaja simultáneamente en el análisis hidrológico de la cuenca y en la adquisición de las imágenes de percepción remota*
- 3er Nivel** *Corresponde al análisis hidráulico, así como el estudio y procesamiento de las imágenes de percepción remota*
- 4º Nivel.** *Se establece la superposición de imágenes de percepción remota con la información obtenida del análisis hidrológico e hidráulico.*
- 5º Nivel.** *Se hace un análisis multitemporal de atributos de la región*
- 6º Nivel.** *Se plantean las conclusiones y recomendaciones para futuros eventos hidrológicos y de desarrollo regional.*

#### II.2. METODOLOGÍA.

*A continuación, se presenta el procedimiento sugerido para cada uno de los niveles descritos anteriormente. Vale la pena mencionar que cada uno de los contenidos sugeridos por nivel se desarrollará en el ejemplo de aplicación al caso de la Comarca Lagunera, contemplando su aplicación de acuerdo con los datos correspondientes al problema.*

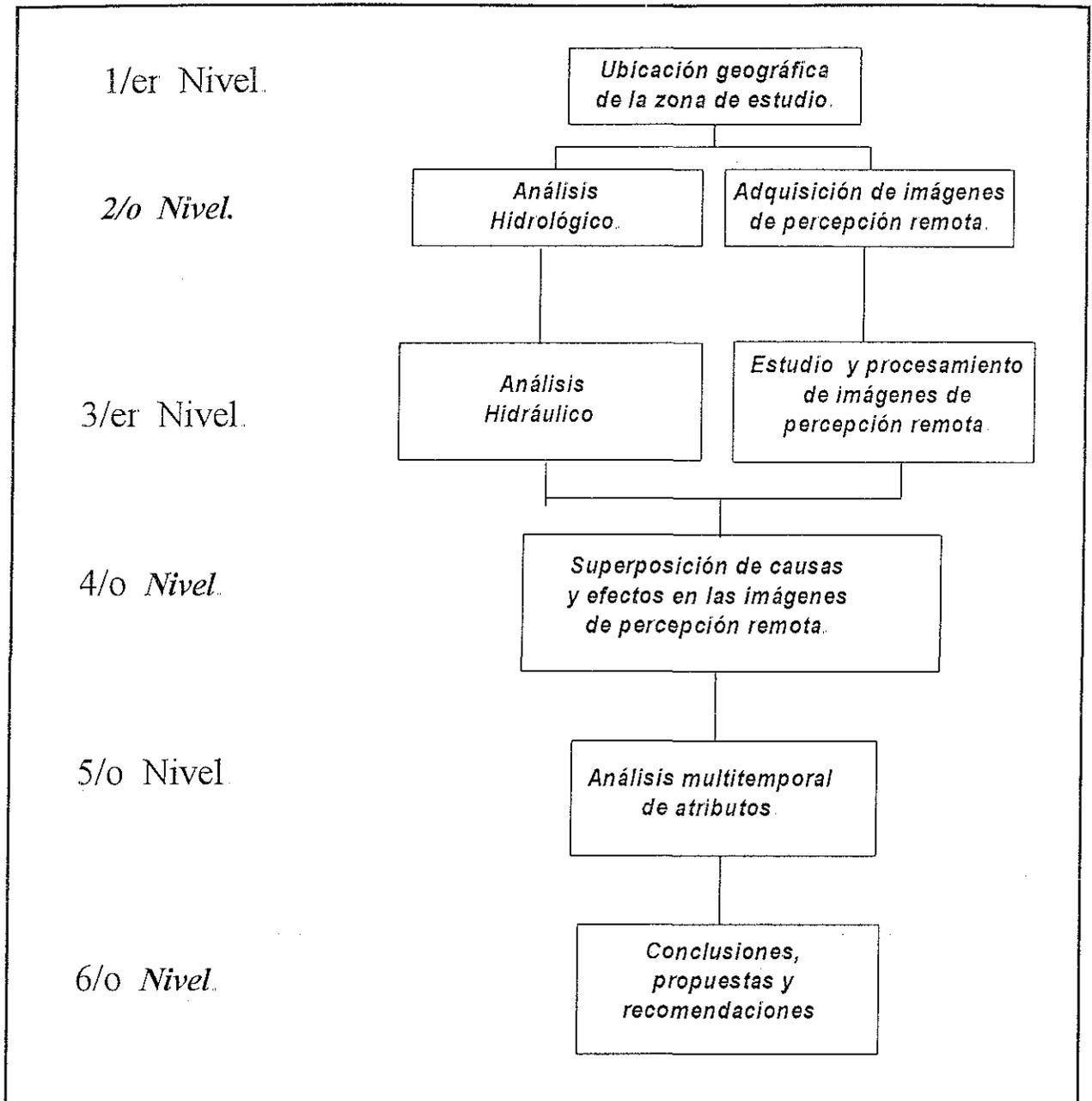


Fig. II.1 Esquema metodológico general.

**Primer Nivel. Ubicación geográfica de la zona de estudio. (Fig. II.2).**

La metodología, mostrada esquemáticamente en la figura II 2, presenta en forma de actividades particulares desde la adquisición y estudio de información existente hasta una visión general cartográfica hidrológica, hidráulica y topográfica incluyendo la descripción de la zona con respecto a su situación actual demográfica, de infraestructura etc

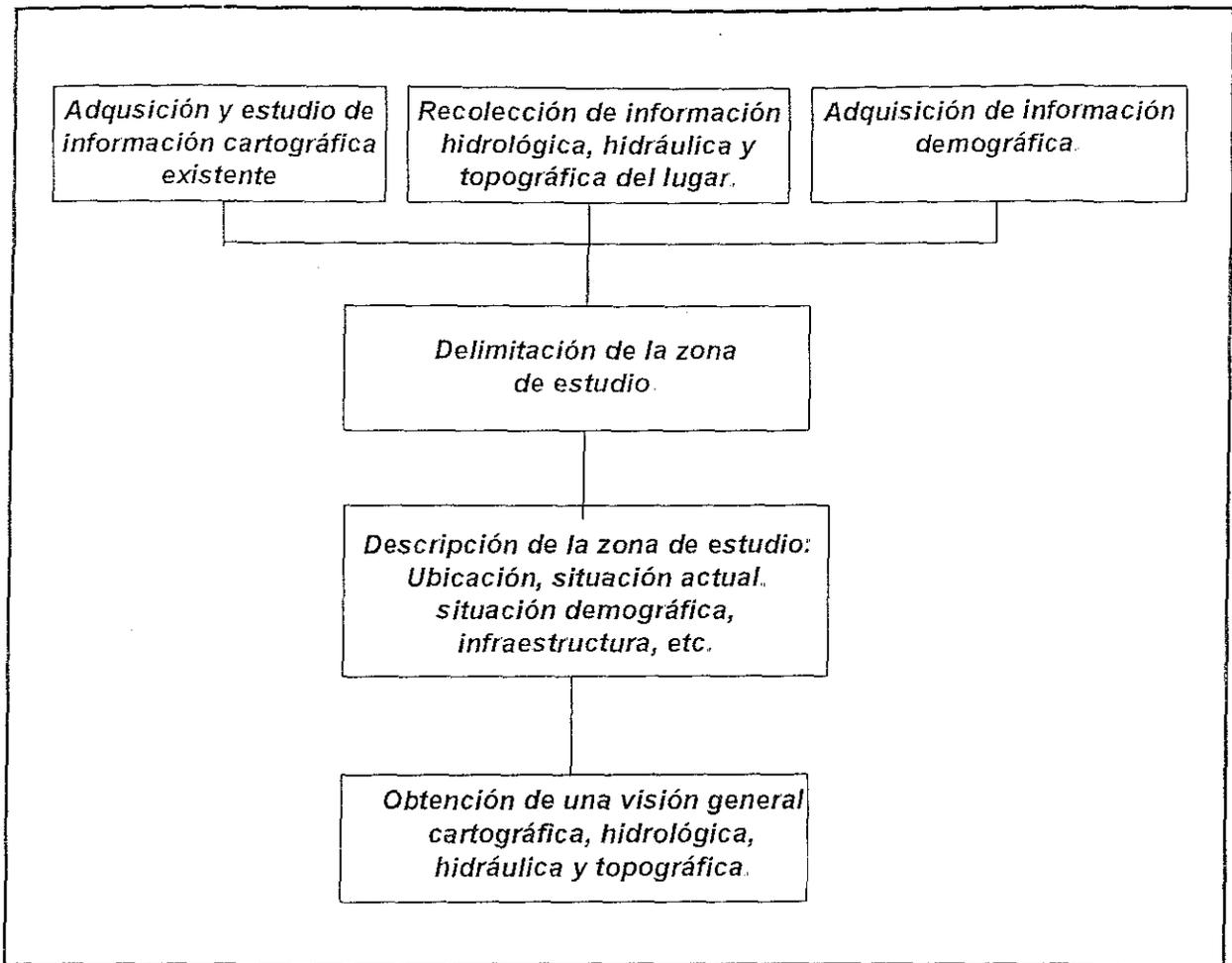


Fig. II 2 Proceso de la ubicación geográfica de la zona de estudio.

**Segundo Nivel. Análisis hidrológico y adquisición de imágenes de percepción remota.**

La metodología que se propone esquemáticamente en la figuras II.3 y II.4 incluyen el estudio hidrológico y la adquisición de imágenes de percepción remota en forma simultánea respectivamente

El análisis hidrológico presenta las actividades propuestas de acuerdo con la información disponible en cada región, de tal manera que puedan elegirse los modelos adecuados a cada caso. Esta información puede clasificarse en dos grandes grupos. Pluviográfica, e hidrométrica

El grupo de información pluviográfica, consiste en la recopilación de datos, selección de tormentas históricas más importantes, análisis de frecuencia de lluvias máximas anuales aplicación de modelos lluvia - escurrimiento hasta la determinación de la avenida máxima

probable.

El grupo de información hidrométrica requiere la recopilación de datos, discusión de información, análisis de frecuencia de gastos máximos anuales hasta la obtención del hidrograma de diseño, en este caso se definen las actividades que deben de seguirse para cuando no existe información hidrométrica, tal es el caso de la aplicación del análisis regional mas conveniente para la zona.

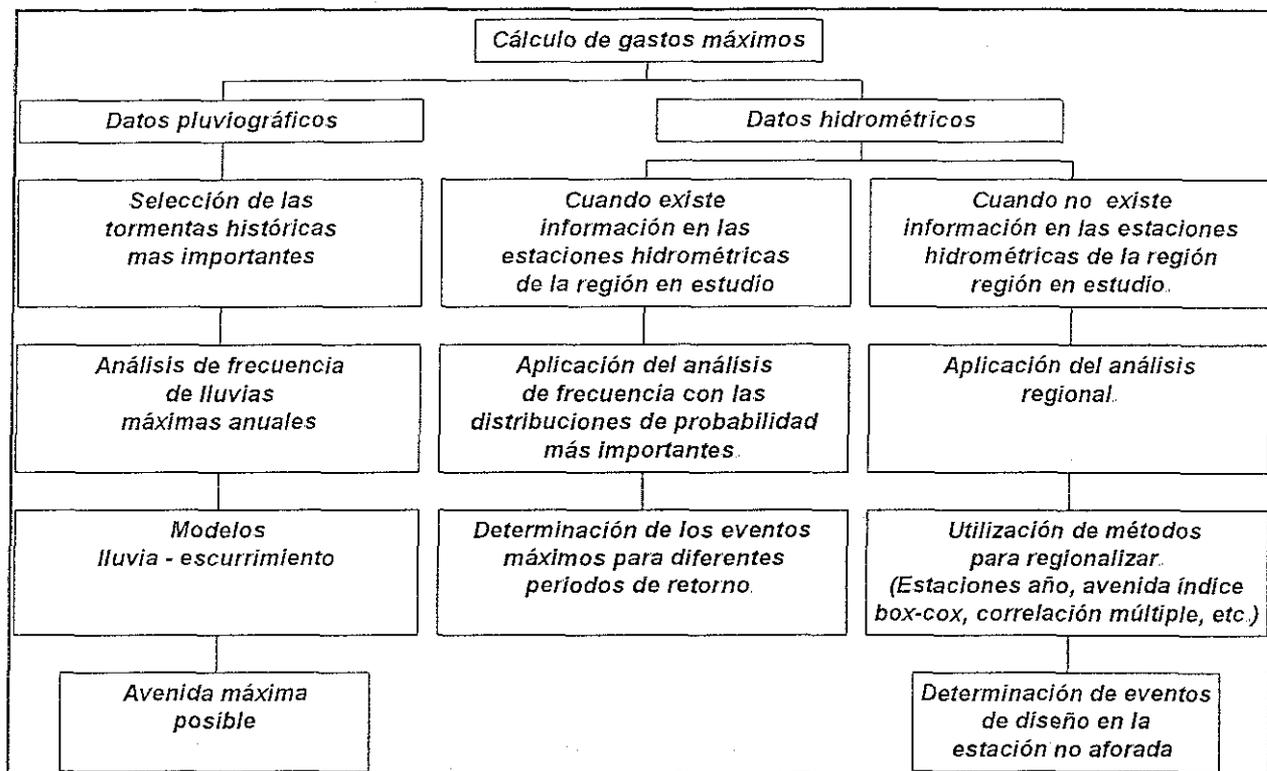


Fig II.3 Esquema del análisis hidrológico.

Con respecto a la adquisición de imágenes de percepción remota se presentan las actividades sugeridas que van desde la consulta en el catálogo de proveedores de imágenes de satélite hasta el procedimiento propuesto para trabajar con fotografía aérea

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

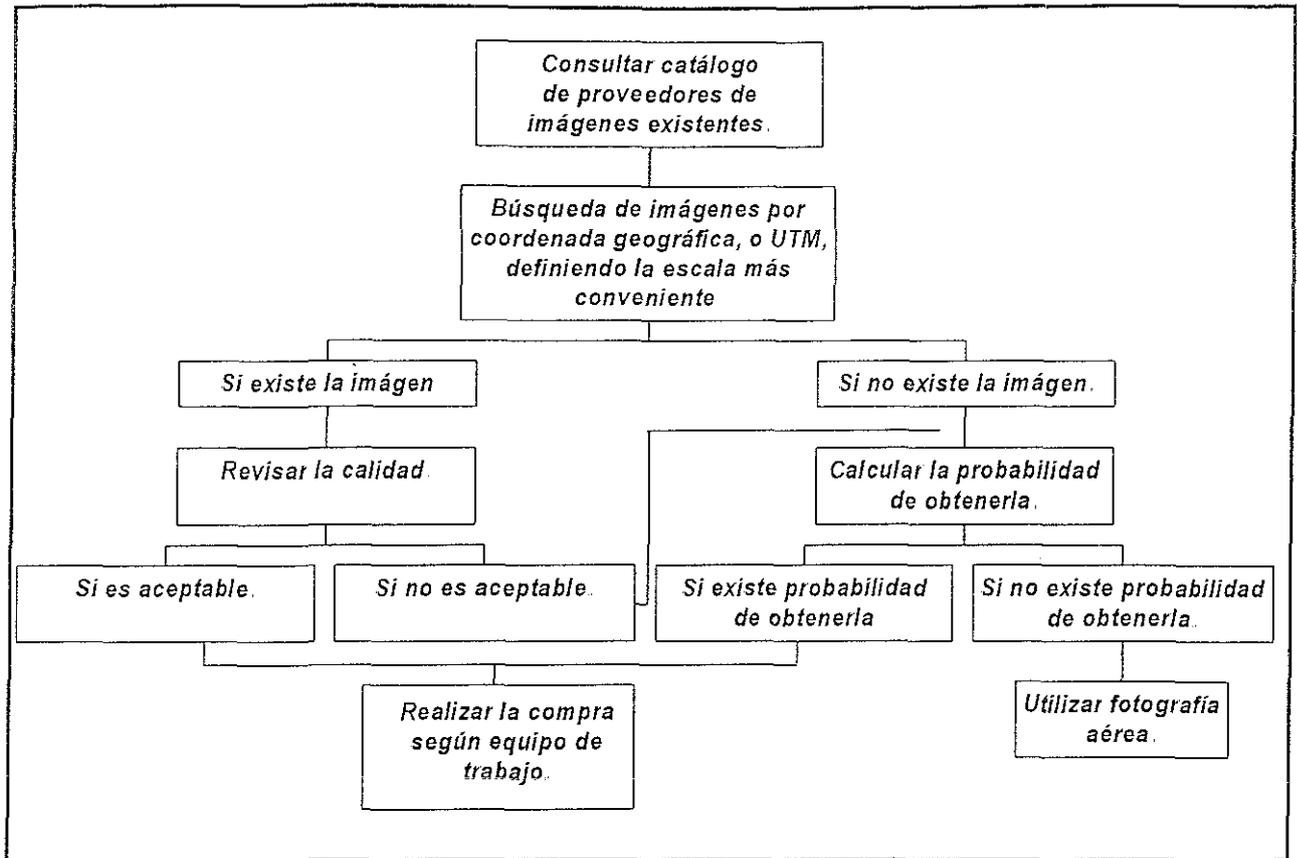


Fig. II.4 Proceso de la adquisición de imágenes de percepción remota.

### Tercer Nivel. Análisis Hidráulico y Estudio y procesamiento de las imágenes.

En este nivel se sugiere llevar a cabo en forma simultánea las actividades correspondientes al análisis hidráulico y procesamiento de imágenes, cuya representación esquemática aparece en la figura II.5 y II.6 respectivamente.

En el análisis hidráulico se contemplan las opciones de analizar los perfiles de la superficie libre del agua en el cauce natural bajo la hipótesis de flujo permanente y no permanente así como la determinación de las llanuras de inundación considerando un flujo bidimensional

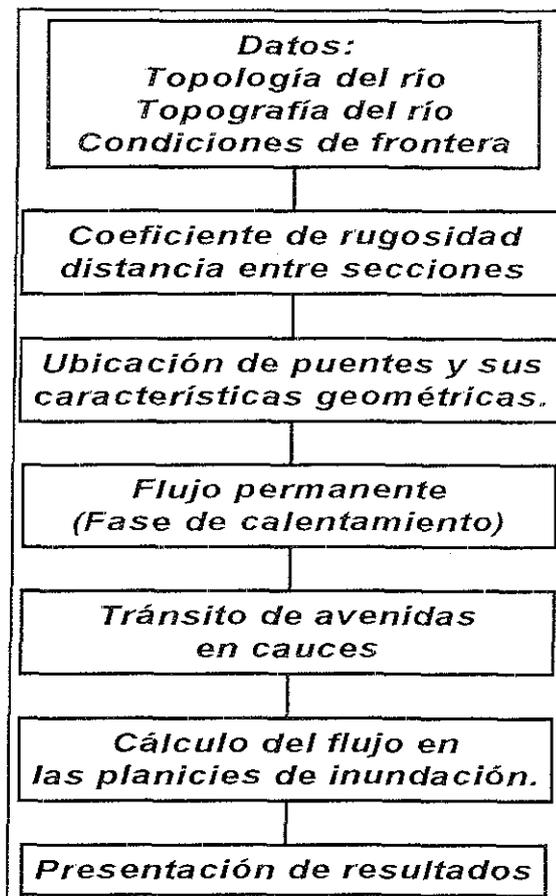


Fig. II.5 Esquema del análisis hidráulico.

Una vez obtenidas las imágenes de satélite o digitalizadas las fotografías aéreas deberá realizarse el procesamiento de la imágenes, dicha metodología se inicia con las correcciones geométrica y radiométrica, la aplicación de filtros y transformaciones para realce de características hasta el procesamiento digital de la imagen, todo esto para decidir finalmente el uso que deberá dársele.

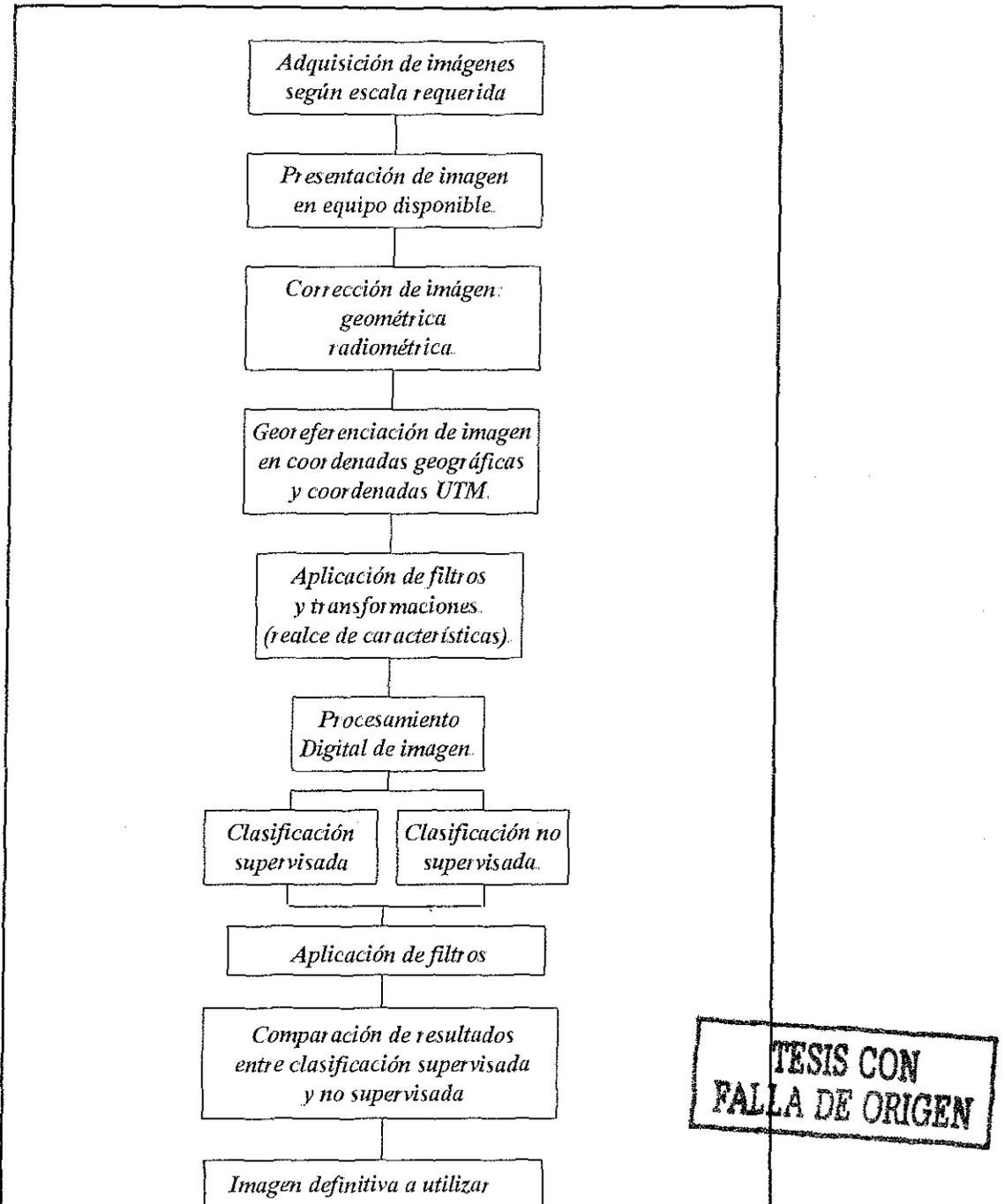


Fig II.6 Diagrama general del estudio y procesamiento de las imágenes

#### Cuarto Nivel. Llanuras de inundación (Fig. II.7).

En este nivel se contempla la metodología a seguir para la generación de llanuras de inundación utilizando la información disponible desde cartografía y/o fotografía aérea digitalizada hasta la superposición de planos entre imágenes de satélite con la finalidad de generar las zonas de peligro, vulnerabilidad y riesgo por inundación, estableciendo las medidas estructurales y no estructurales correspondientes.

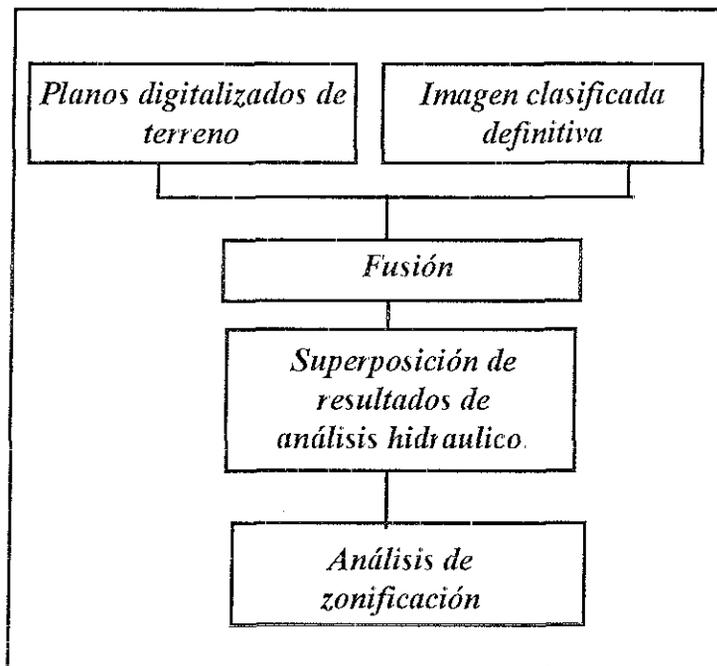


Fig. II.7 Esquema del análisis de zonificación.

#### Quinto nivel. Análisis Multitemporal (Fig. II.8).

La evaluación de imágenes adquiridas en diferentes tiempos recibe el nombre de análisis multitemporal. En este nivel se sugieren las actividades que se deberán seguir para el manejo de las imágenes de satélite clasificadas.

Esta metodología está dividida en tres grupos

- a) Cambio de área en la zona urbana (Fig. II.9).
- b) Cambio geomorfológico del río (Fig. II.10).
- c) Análisis de peligro vulnerabilidad y riesgo regional (Fig. II.11)

Cada uno de estos grupos presenta el manejo que debe de seguirse para el uso de imágenes de satélite clasificadas.

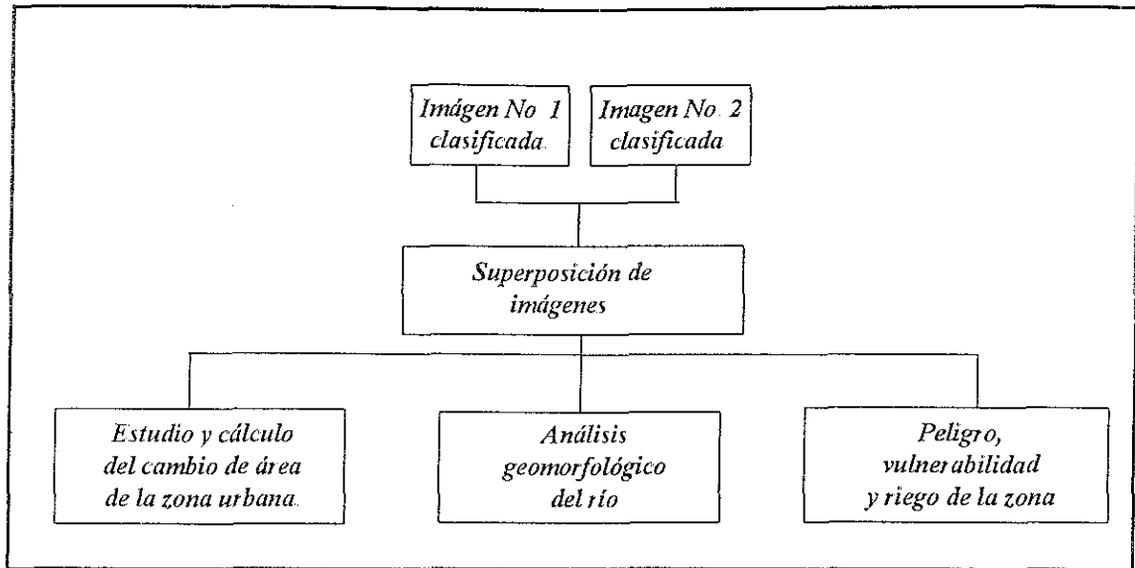


Fig. II.8 Esquema del análisis multitemporal.

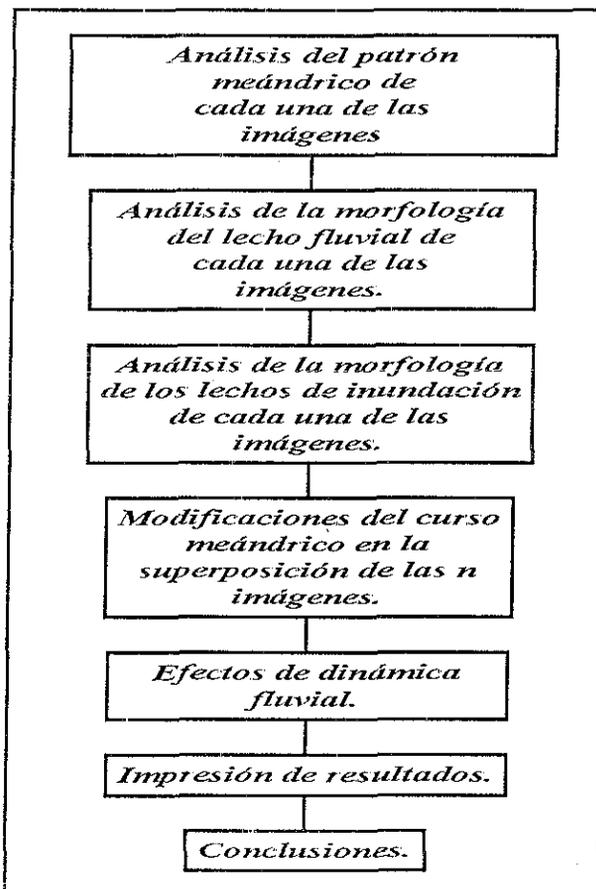


Fig. II.9 Modelación del cambio geomorfológico del río.

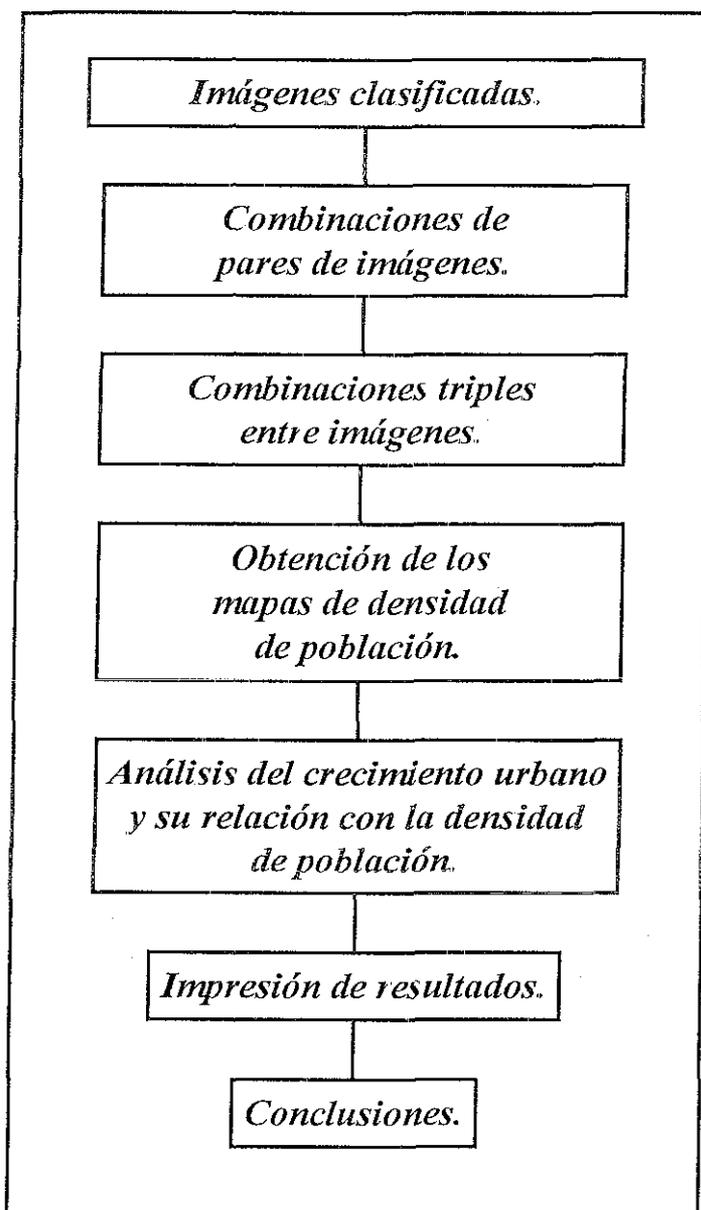


Fig. II.10 Modelación del cambio de área de la zona urbana.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

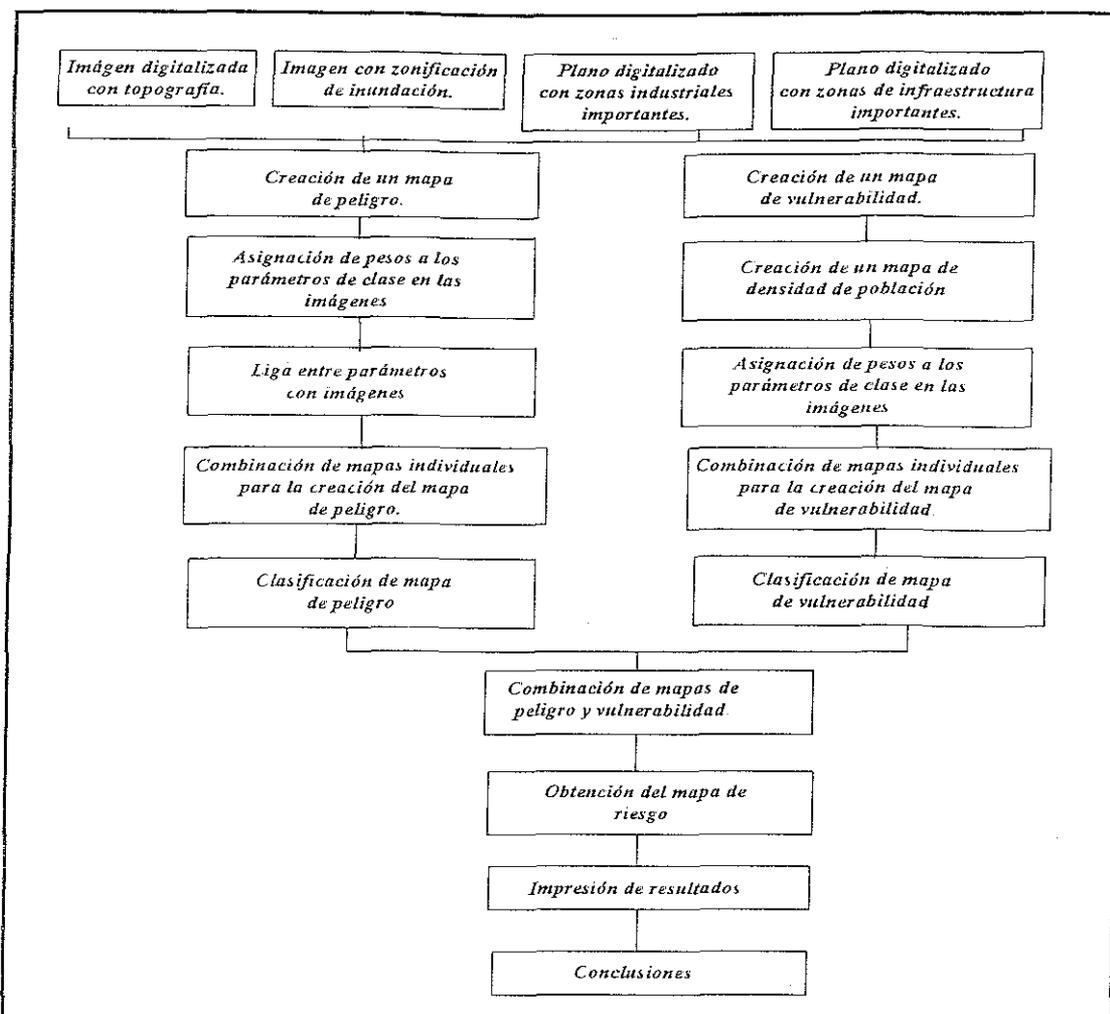


Fig. II.11 Esquema del peligro, vulnerabilidad y riesgo utilizando imágenes de satélite.

### II.3. RECOMENDACIONES GENERALES SOBRE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

En la metodología aquí expuesta se presentan algunas alternativas de análisis con las diferentes opciones que ofrecen las imágenes de percepción remota, por tal motivo se hacen unas recomendaciones generales.

- 1 - Seleccionar y definir el área de trabajo para calcular su cubrimiento en las diferentes imágenes de percepción remota
- 2 - Antes de pensar en comprar se deben calcular los rendimientos y justificar la inversión para adquirir las imágenes
- 3 - Asegurarse del tamaño y la capacidad del equipo disponible, así como verificar el software para realizar el procesamiento digital de imágenes.

- 4 - Definir después del estudio económico sobre el tipo de imágenes con las que se va a trabajar teniendo en cuenta tiempos de adquisición de las mismas.
- 5 - Si el área de trabajo es de gran extensión, se recomienda realizar la inversión en la imagen de satélite de alta resolución espacial, si por el contrario el área de análisis es pequeña se recomienda el empleo de fotografías aéreas, es más probable encontrar el cubrimiento del área de estudio en ésta última herramienta de la percepción remota, si se desea, se puede emplear como producto raster para la generación de recorridos sobre ellas en un sistema de información geográfico. Aunque hay que señalar que actualmente se cuenta ya con un satélite que envía imágenes a color con resolución en pixel de 4x4 m, y en blanco y negro de 1x1 m.
- 6 - Una observación al respecto de las fotografías aéreas rasterizadas es el espacio de almacenamiento que requieren, pero tienen la ventaja de tener una mejor resolución espacial para la realización de estudios urbanos.
- 7 - Si la opción es una imagen de satélite, se debe tener en cuenta fecha de toma, de acuerdo con la época de lluvias para evitar en lo posible las nubes en la escena,
- 8 - Se recomienda diseñar el muestreo para la verificación de los procesos de fotointerpretación y clasificación de imágenes de sensores remotos es en esta parte donde se minimiza el tamaño de la muestra para reducir los costos del trabajo de campo sin perder la representatividad del conjunto
- 9 - Capacitar personal en el manejo de las imágenes de percepción remota para aprender a fotointerpretar y fotoidentificar los objetos tanto urbanos como rurales que se presentan con sus propias características en la respuesta espectral
- 10 - Se recomienda desarrollar cada fase de la metodología hasta el final y en forma paralela las etapas que así estén diseñadas, para conjuntar esfuerzos cuando ésta lo requiera sin sufrir atrasos en el tiempo de comparación y análisis de resultados

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO III.

### ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO.

#### III.1 ANÁLISIS HIDROLÓGICO.

*El diseño y la planeación de obras hidráulicas están siempre relacionadas con eventos hidrológicos futuros. La complejidad de los procesos físicos que tienen lugar en la generación de una avenida hace, en la mayoría de los casos, imposible una estimación confiable de la misma por métodos basados en leyes determinísticas, ya sea porque estos métodos son insuficientes, o porque el modelo matemático sería exageradamente grande, complicado y difícil de manejar.*

*Por ello, y como sucede en la mayoría de las ciencias, con mucha frecuencia es necesario un enfoque estadístico para la solución de los problemas. En particular, en el análisis hidrológico la probabilidad y la estadística juegan un papel de primer orden.*

*En este capítulo, se plantean los conceptos fundamentales y métodos más utilizados para la determinación de gastos de diseño máximo, así como su aplicación a un problema práctico.*

#### **Análisis de Frecuencia de eventos hidrológicos extremos.**

*Uno de los problemas más importantes en la hidrología consiste en obtener una interpretación de eventos probabilísticos a futuro, asociados a un registro en el pasado.*

*Ejemplo de este caso, es la estimación de gastos máximos y su procedimiento se conoce con el nombre de análisis de frecuencia.*

*En este tema, se presenta la teoría asociada al cálculo de gastos máximos, procesando la información hidrométrica recabada.*

*Muchos procesos en Hidrología deben ser analizados y explicados con base a la ciencia probabilística, por su inherente aleatoriedad. Por lo tanto, no es posible predecir una avenida o una precipitación con base únicamente determinística. Afortunadamente, los métodos estadísticos permiten presentar, organizar y reducir datos para facilitar su interpretación y evaluación. Esta parte del trabajo presenta los gastos máximos anuales cuantificados y presentados con distribuciones de probabilidad continua.*

*Las funciones de densidad de probabilidad continuas usadas en la Hidrología, más comunes, son*

**Distribución Normal.**

**Distribución Log-Normal.**

**Distribución General de Valores Extremos I. (Gumbel)**

**Distribución Doble Gumbel.**

**Distribución Gamma de dos parámetros.**

**Distribución Exponencial con dos parámetros.**

Los métodos de estimación de parámetros que se conocen son

**Momentos.** Igualar momentos poblacionales con muestrales.

**Máxima Verosimilitud.** Supone que el mejor parámetro de una función debe ser aquel que maximiza la probabilidad de ocurrencia de la muestra observada

**Mínimos cuadrados.** Minimiza la suma de los cuadrados de todas las desviaciones entre los valores calculados y observados

**Probabilidad Pesada.** Deriva expresiones para los parámetros de distribuciones cuyas formas inversas se pueden definir inversamente

**Sextiles.** El rango de la variable es dividida en 6 intervalos, tal que la probabilidad acumulada en cada intervalo es de un sexto

**Momentos L.** Define una combinación lineal de momentos de probabilidad pesada

### **Análisis Regional.**

La Regionalización es empleada en la Hidrología para facilitar la transferencia de información desde lugares con un mayor número de registros, a sitios cuyos registros son escasos o nulos. El proceso de regionalizar abarca una serie de detalles que deben cuidarse para lograr una confiable y exitosa estimación de los eventos a predecir. Algunos de los métodos existentes para regionalizar son:

**Método de las estaciones año.** El objetivo de este método es obtener una ecuación regional que mejore la estimación en los sitios base del análisis o inferir información en una cuenca no aforada

Este es un método de extensión de longitud de registro asociada a una curva de frecuencia en la estación, basado en la hipótesis de que el número de datos registrados en cada estación pueden ser sumados, dicho en otras palabras, si se tiene un registro de 50 datos en 100 estaciones diferentes, eso equivale a generar un registro total de 5,000 datos en una simple estación.

Sin embargo, se tienen que considerar 2 importantes objeciones. La primera es que no se pueden tener registros demasiado grandes, tales como de miles de años, y segunda todas las estaciones en estudio deberán tener la misma distribución de frecuencias.

Finalmente, las estaciones deberán corresponder a una región meteorológicamente homogénea

**Método de la avenida índice.** Consiste en una correlación regional de los intervalos de recurrencia con sus gastos pico. Para aplicar la técnica a una cuenca hidrológica, se determinará la avenida media anual, definida como aquella con magnitud correspondiente a un periodo de retorno de 2.33 años, generando así una ecuación de regresión. Este método se recomienda para cuencas pequeñas con superficies menores a 300 km<sup>2</sup>.

**Análisis de correlación múltiple.** Es un método que consiste en generar una correlación lineal múltiple de una variedad de parámetros independientes con sus correspondientes gastos pico.

En este método se requiere identificar las características fisiográficas más significativas en la cuenca, para obtener la ecuación de regresión correspondiente. Se recomienda para cuencas con superficies menores a 30,000 km<sup>2</sup>.

### III.2 ANÁLISIS HIDRÁULICO.

Para analizar el comportamiento de la superficie libre del agua de un río, asociado a diferentes periodos de retorno, y poder determinar las zonas de inundación en el tramo del río en estudio se realizó un análisis de sistemas de ríos bajo la hipótesis de flujo permanente y no permanente. A continuación se presenta la teoría relacionada.

#### III.2.1. Flujo Permanente. Introducción al análisis de los sistemas de ríos (HEC-RAS).

El modelo HEC-RAS fue desarrollado en la década de los 70's por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de Norteamérica. El programa fue diseñado para calcular los perfiles de la superficie libre para flujo establecido y gradualmente variado en cauces naturales o construidos por el hombre. El procedimiento de cálculo está basado en la solución de la ecuación unidimensional de la energía, utilizando el método del paso estándar.

El programa puede ser aplicado al manejo de zonas de inundación, evaluación de bordos longitudinales y al delineamiento de zonas de peligro por inundación. El modelo puede utilizarse para evaluar los efectos en la superficie libre del agua en canales o cauces naturales que presenten la existencia de puentes y/o alcantarillas.

El principal objetivo del HEC-RAS es calcular las elevaciones de la superficie libre del agua en todas las secciones de interés dadas por el usuario. Los datos de entrada requieren el régimen del flujo, elevación inicial, gasto, coeficientes de pérdida, geometría de la sección transversal y longitudes entre secciones.

El cálculo del perfil se inicia con una sección transversal en donde se conocen condiciones iniciales, realizando el cálculo hacia aguas arriba en el caso de tener un régimen subcrítico y hacia aguas abajo si es supercrítico. El régimen subcrítico está obligado a valores por encima del tirante crítico, y el régimen supercrítico a valores por abajo del tirante crítico. El programa no permite el cálculo para secciones en donde se presenta el tirante crítico,



porque la ecuación que gobierna no es aplicable para tirantes iguales al crítico.

El HEC-RAS es un programa de computo, diseñado para manejar una considerable cantidad de cálculos hidráulicos en una sola corrida. El programa base y los requerimientos de entrada son relativamente fáciles de aprender.

El HEC-RAS es capaz de calcular perfiles de la superficie libre del agua en una dimensión para flujo gradualmente variado en canales naturales y artificiales, con regímenes subcríticos, supercríticos y mixtos.

Los perfiles son calculados resolviendo la siguiente ecuación

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (III.1)$$

Donde:

$Y_1, Y_2$ , Tirante del agua en las secciones transversales 1 y 2

$Z_1, Z_2$  Elevación de la plantilla.

$V_1, V_2$ , Velocidad promedio

$\alpha_1, \alpha_2$ , Coeficientes de Coriolis

$g$ , Aceleración de la gravedad

$h_e$ , Pérdida de energía

La fig. III 1 muestra un diagrama en términos de la ecuación de la energía

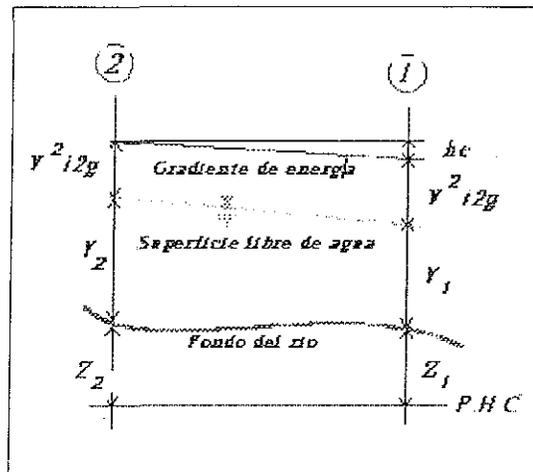


Fig. III 1 Representación en términos de la ecuación de la energía.

La pérdida de energía ( $h_e$ ) entre dos secciones está compuesta por la pérdida por fricción y la pérdida por contracción o expansión en el río y tiene el siguiente modelo matemático

$$h_e = L \bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (\text{III } 2)$$

$C$  coeficiente de pérdida por contracción o expansión.

$S_f$ , pendiente de fricción representativa entre dos secciones

$L$ , factor de peso en función de las longitudes y gastos entre secciones:

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (\text{III } 3)$$

$lob$ ,  $ch$  y  $rob$  corresponden a margen izquierda, canal central y margen derecha, respectivamente.

Por otro lado, la determinación del factor de conducción total y el coeficiente de velocidad para una sección transversal, requiere que la sección transversal sea dividida, de tal forma que la velocidad quede distribuida uniformemente. La base para dividir la sección es a través del cambio de rugosidad en la misma. Ver figura III.2.

La evaluación de la carga de energía cinética representativa, se realiza, considerando un promedio pesado entre las tres subsecciones de la sección transversal (margen izquierda, canal central y margen derecha). La figura III.3 muestra como se obtiene dicha carga.

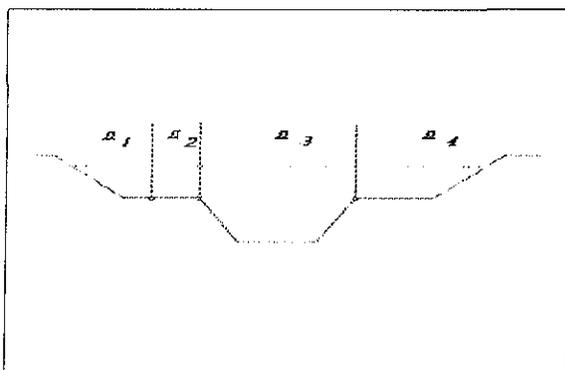


Fig. III.2 División de la sección transversal para cálculo del factor de conducción.

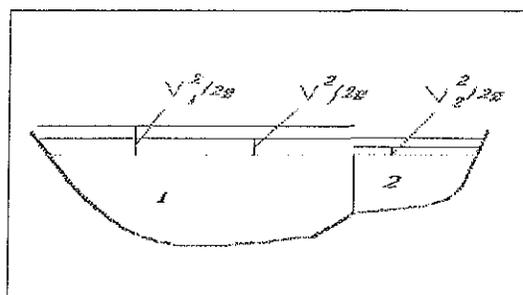


Fig. III.3 Ejemplo de carga de energía cinética representativa.

Para obtener la carga de energía cinética representativa, se requiere conocer el coeficiente de Coriolis alfa ( $\alpha$ ), y se calcula a través de esta expresión:

El coeficiente de velocidad  $\alpha$ , es calculado con base en el factor de conducción de las tres subsecciones, margen izquierda, canal central y margen derecha

$$\alpha \frac{\bar{V}^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \quad (III.4)$$

$$\alpha = \frac{Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2}{(Q_1 + Q_2) \bar{V}^2} \quad (III.5)$$

$$\alpha = \frac{2g [Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}]}{(Q_1 + Q_2) \bar{V}^2} \quad (III.6)$$

La pérdida por fricción es el producto entre la pendiente de fricción representativa entre dos secciones y su longitud. La pendiente de fricción se calcula con la ecuación de Manning, como sigue:

$$S_f = \left( \frac{Q}{K} \right)^2 \quad (III.7)$$

o también, con las ecuaciones alternativas siguientes:  
Ecuación de factor de conducción promedio:

$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (III.8)$$

donde  $K_1$  y  $K_2$  representan el factor de conducción de cada sección.  
Ecuación de pendiente de fricción promedio:

$$\bar{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \quad (III.9)$$

Ecuación de pendiente de fricción con promedio geométrico:

$$\bar{S}_f = \frac{2 S_{f1} * S_{f2}}{S_{f1} + S_{f2}} \quad (III.10)$$

Finalmente, la pérdida por contracción y expansión se evalúa a través de la siguiente expresión

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (III.11)$$

donde  $C$  representa el valor del coeficiente de contracción o expansión

El programa asume que una contracción ocurre cuando la carga de velocidad aguas abajo es mayor que la carga de velocidad arriba del río y viceversa para el coeficiente de expansión.

La tabla III 1 presenta los coeficientes de expansión y de contracción típicamente utilizados

| Nombre                        | Contracción | Expansión. |
|-------------------------------|-------------|------------|
| Sin transición                | 0.0         | 0.0        |
| Transición gradual            | 0.1         | 0.3        |
| Secciones típicas de puentes. | 0.3         | 0.5        |
| Transición brusca.            | 0.6         | 0.8        |

Tabla III.1 Factores de pérdida por contracción y expansión

### Procedimiento de cálculo.

El conocimiento de la elevación de la superficie libre del agua en una sección se basa en un procedimiento de cálculo iterativo y es como sigue

- 1 Supone una elevación de la superficie del agua, aguas arriba o aguas abajo según corresponda
- 2 Basada en la elevación, calcula el factor de conducción total y las velocidades representativas
- 3 Con los valores del paso 2, calcula la pendiente de fricción y resuelve la ecuación de pérdida por fricción.
- 4 Con los valores de los pasos 2 y 3 resuelve la ecuación para calcular las superficie libre en la sección 2
- 5 Compara los valores calculados de la superficie libre en la sección 2 con los valores supuestos en el paso 1 repitiendo los pasos 1 a 5 hasta una aproximación de 0.01 m.

El primer procedimiento iterativo esta basado en la pendiente de fricción de las 2 secciones transversales previas El segundo procedimiento es un promedio de las elevaciones calculadas y supuestas del primer procedimiento

Las siguientes aseveraciones están implícitas en las ecuaciones y procedimientos utilizados en el programa

1. El flujo es establecido porque la ecuación de la energía se considera independiente del tiempo.
2. El flujo es gradualmente variado, porque se considera que la distribución de presión en cualquier sección del cauce es hidrostática, excepto para las estructuras hidráulicas tales como: puentes, alcantarillas y vertedores. En estas estructuras donde el flujo puede ser rápidamente variado se utiliza la ecuación de momentum o alguna otra empírica.
3. El flujo es unidimensional, basado en la premisa de que la carga de energía total es la misma para todos los puntos en una sección transversal.
4. El río es de pendiente de plantilla pequeña (menor que 1.10).

### **Requerimientos básicos de datos.**

Los datos necesarios para el cálculo de perfiles están divididos en dos grupos: Datos geométricos y datos de gasto

El primer grupo consiste en establecer las características geométricas y de conectividad del sistema de río, tales como datos de la sección transversal, longitudes entre secciones,, coeficientes de pérdida de energía (por fricción, por contracción o expansión); bifurcaciones, datos de estructuras hidráulicas como puentes o alcantarillas etc

El segundo grupo se refiere a datos que definen el régimen del flujo, condiciones de frontera e información de gastos pico

El esquema del sistema de ríos se define para conocer como están conectados los ríos y así poder nombrarlos de acuerdo con alguna convención. Por ejemplo, cada sección transversal deberá estar asociado a un río, a un tributario y a una estación.

Las condiciones geométricas para el análisis del flujo se especifican en términos de las secciones transversales, de tal forma que el programa asume que las primeras secciones están asociadas al flujo aguas abajo del cauce y las últimas están referidas al flujo aguas arriba. Se pueden utilizar hasta 500 puntos para describir la sección definida, mirando siempre en dirección aguas abajo

El programa incluye ciertas capacidades opcionales asociadas a las secciones transversales, tales como: áreas de flujo no efectivas, diques y obstáculos

El programa considera varios tipos de coeficientes de pérdida de energía, tales como Los valores de la "n" de Manning o su rugosidad equivalente "k" para determinar la pérdida por

fricción, coeficientes de pérdida por contracción y expansión para evaluar pérdida por transición y por último los coeficientes de pérdida para puentes y alcantarillas para evaluar pérdidas relacionadas a su forma, configuración de las pilas, condiciones de entrada y salida, etc.

Finalmente, dentro del grupo de los datos geométricos se puede incluir la posibilidad de la unión de varios ríos o la división de varios de ellos

Para el segundo grupo de datos, nos referiremos al régimen del flujo. El cálculo del perfil empieza con una elevación de flujo conocida o asume una condición, realizando el cálculo hacia aguas arriba para régimen subcrítico y hacia aguas abajo para régimen supercrítico. El tipo de régimen deberá ser definido por el usuario, considerando que el programa restringe el régimen subcrítico para valores por arriba del tirante crítico y el régimen supercrítico para valores por debajo del mismo. En casos donde el régimen del flujo pasa de subcrítico a supercrítico o viceversa el programa deberá correr en régimen de flujo mixto.

Las condiciones de frontera serán necesarias para establecer la superficie de agua inicial o final según sea el régimen de flujo, para flujo mixto es necesario establecer al inicio y al final del perfil. El usuario puede utilizar como dato cuatro tipos diferentes de condiciones de frontera: Elevación conocida de la superficie libre del agua, tirante crítico, tirante normal y curva de gastos.

Por último, será necesario para el cálculo del perfil el o los datos de gasto aguas arriba o aguas abajo de la sección. El dato de gasto puede cambiar en cualquier sección transversal pero no podrá hacerlo a la mitad de un puente, alcantarilla, unión o bifurcación del río.

HEC-RAS cuenta con numerosas capacidades opcionales que el usuario quisiera modelar. Estas capacidades son entre otras: Análisis de múltiples perfiles, Análisis de planes múltiples, Ecuaciones opcionales para el cálculo de pérdida por fricción, interpolación de secciones transversales, cálculo de regímenes de flujo mixto, Uniones y bifurcaciones.

### **Modelado de puentes en el HEC-RAS.**

El HEC-RAS calcula la pérdida de energía causada por puentes y alcantarillas en tres partes. Una parte consiste en evaluar las pérdidas inmediatamente aguas abajo de la estructura, donde ocurre una expansión del flujo.

La segunda parte son las pérdidas de energía en la estructura misma y la tercera parte consiste en determinar la pérdida de energía inmediatamente aguas arriba de la estructura, donde el flujo generalmente se contrae.

Para calcular la superficie libre del agua se deberá iniciar definiendo la ubicación de las secciones transversales correspondientes al puente en cuestión.

La rutina de puentes utiliza para el cálculo cuatro secciones transversales.

La sección 1, localizada lo suficientemente aguas abajo de la estructura de tal forma que el flujo este completamente expandido La Corporación de Ingenieros de los Estados Unidos Americanos propone el criterio de localizar la sección en una posición a cuatro veces la longitud promedio de las longitudes AB y CD (Fig III 4)

Sección 2: localizada inmediatamente aguas abajo del puente y que tendrá que representar el área hidráulica efectiva justo a la salida del puente

Sección 3 localizada inmediatamente aguas arriba del puente y que tendrá que representar el área hidráulica efectiva justo a la entrada del puente

Sección 4: Es una sección aguas arriba del puente y que deberá cumplir con el criterio de localizarse a una distancia igual a la abertura del puente en cuestión o bien, una vez el promedio de las longitudes AB y CD.

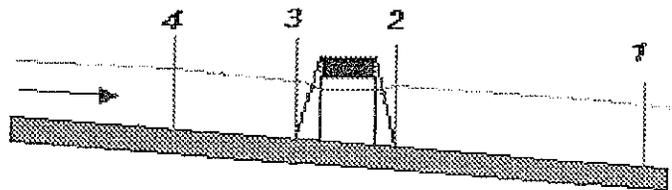


Fig. III.4 Secciones transversales en un puente.

El cálculo hidráulico que realiza el HEC-RAS a través del puente se basa en modelar el comportamiento del flujo en el mismo, es decir, se pueden tener las siguientes condiciones:

- Flujo subcrítico, supercrítico o mixto por debajo del puente.
- Flujo subcrítico por arriba del puente trabajando como vertedor.
- Flujo a presión trabajando como orificio
- Flujo trabajando a presión y como vertedor
- Puente totalmente ahogado

De acuerdo con el tipo de flujo que se tenga, el programa puede utilizar las siguientes ecuaciones, en algunas ocasiones puede probar dos o más de ellas

- Ecuación de la Energía (Método del paso estándar)
- Ecuación del balance de Momentum
- Ecuación empírica de Yarnell
- Método del FHWA. (Federal Highway Administration)
- Ecuaciones hidráulicas para flujo a presión o como vertedor.

Finalmente, HEC-RAS puede calcular perfiles considerando puentes más complejos como por ejemplo:

- a) Puentes asimétricos
- b) Puentes paralelos
- c) Puentes con aberturas múltiples.

Las figuras III.5 a la III.7 muestran esquemas de estos tipos de puentes

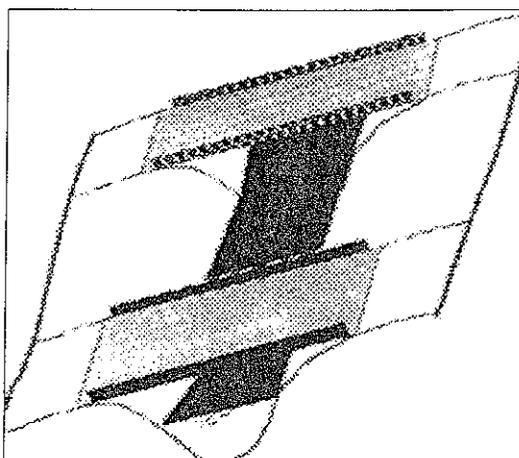


Fig. III.5. Puentes paralelos.

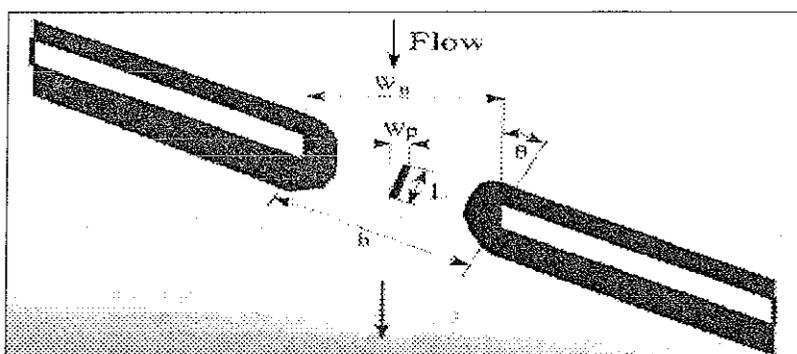


Fig. III.6. Puente asimétrico

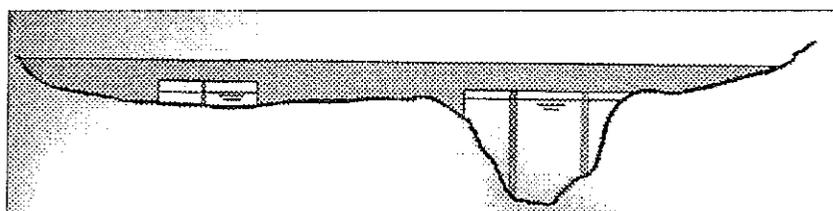


Fig. III.7 Puente con aberturas múltiples

### III.2.2 Flujo No permanente. Descripción del modelo matemático. Ecuaciones fundamentales.

Para realizar una aproximación suficiente y representativa del flujo no permanente en ríos, se aceptan las siguientes hipótesis:

- a) La curvatura de las líneas de corriente es pequeña por lo que la distribución de presiones es hidrostática, no hay aceleraciones verticales importantes
- b) El flujo en los ríos es unidimensional, de manera que se aplica el concepto de velocidad media en la sección transversal
- c) El nivel del agua en dirección normal o transversal al flujo es prácticamente horizontal
- d) la pendiente del fondo es pequeña
- e) La densidad del agua es constante
- f) Además, dado que el problema de resolver una red de ríos es de por sí complejo, se impone como condición adicional que el flujo sea subcrítico en todos los ríos de la red y en todo instante

Las hipótesis (a) a (e) son las llamadas hipótesis de Saint-Venant, la (f) se incluye por razones prácticas y es esencial en el algoritmo de solución que aquí se presenta

En hidráulica existen tres ecuaciones fundamentales (continuidad, energía y cantidad de movimiento), pero para analizar el flujo no permanente en ríos son suficientes dos variables (por ejemplo, tirante y gasto), por lo tanto sólo se requieren dos ecuaciones fundamentales, las que se usan en el modelo son la de continuidad (ec. III 12)

$$B \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q^* \quad (\text{III. 12})$$

y la conservación de cantidad de movimiento o dinámica (ec. III. 13)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + Q \frac{\partial U}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (\text{III 13})$$

donde

$$H = z + h$$

H cota de la superficie libre del agua, en m

h tirante, en m

z cota del fondo del canal, en m

$$Q = A U$$

Q gasto, en m<sup>3</sup>/s

|       |  |
|-------|--|
| $U$   | velocidad media, en m/s  |
| $A$   | área de la sección transversal, en $m^2$                               |
| $q^*$ | gasto lateral (por unidad de longitud del cauce), en $m^2/s$           |
| $g$   | constante gravitatoria, en $m^2/s$                                     |
| $B$   | ancho de superficie libre, en m  |
| $S_f$ | gradiente de la línea de energía o pendiente de fricción, adimensional |
| $x$   | coordenada a lo largo del río, en m                                    |
| $t$   | tiempo, en s.  |

La ec III.13 se obtiene a partir de la ecuación de cantidad de movimiento. Se considera como sentido positivo del eje  $x$  hacia aguas abajo, por ello, las velocidades son positivas en esta dirección, y negativas cuando el flujo va en sentido contrario.

La pendiente de fricción se calcula con la ecuación de Manning.

$$S_f = n^2 \frac{U|U|}{R^{4/3}} = n^2 \frac{Q|Q|}{A^2 R^{4/3}} \quad (\text{III.14})$$

donde

|     |                                     |
|-----|-------------------------------------|
| $n$ | coeficiente de rugosidad de Manning |
| $R$ | radio hidráulico, en m              |
| $P$ | perímetro mojado, en m              |

En la ec III.14 se escribe el valor absoluto para considerar el cambio de signo de  $S_f$ , si cambia de signo de la velocidad.

### **Esquema en diferencias finitas.**

Para resolver las ecuaciones III.12 y III.13 se emplea el esquema en diferencias finitas implícito de Cruickshank-Berezowsky. Se utiliza la variable  $j$  como subíndice para indicar el tramo (o la sección), y el superíndice  $n$  para indicar el instante en el tiempo.

En el modelo, el usuario solo define los tipos de frontera que se tienen en los extremos de cada río de la red, éste los clasifica en cuatro tipos, que son los más comunes que se presentan en la práctica. La clasificación de los ríos es la siguiente:

**Tipo A.** Es un río en el cual se tiene como condición de frontera en el primer tramo aguas arriba un hidrograma, en el último tramo aguas abajo, se conoce un limnograma (es decir, la variación del nivel de la superficie libre del agua con el tiempo). Es el caso más simple y corresponde al del tránsito de una avenida por río.

**Tipo B** Es un río en el cual en el primer tramo aguas arriba se da como condición de frontera un hidrograma, en el último tramo aguas abajo se tiene un tramo conector o nudo (se define como un conector a aquel tramo al que llegan dos o más tramos)

**Tipo C** En el primer tramo aguas arriba se tiene un nudo o tramo conector. En el último tramo aguas abajo se tiene un tramo de cota del agua conocida.

**Tipo D** En este caso, el primer tramo aguas arriba es un nudo o tramo conector; el último tramo aguas abajo es también un nudo o tramo conector, es decir, es un río entre dos tramos conectores.

En los nudos o tramos conectores se utiliza como condición de compatibilidad que la cota del agua es común para todos los ríos que llegan o salen de dicho nudo.

De acuerdo con el tipo de río, el algoritmo de solución cambia en algunos términos

**Tramo general (intermedios).**

La ec III. 12 se discretiza en un volumen de control con la cota del agua,  $H$ , al centro y los flujos en las orillas, fig 2.1:

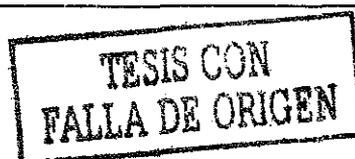
$$B_j^n \frac{H_j^{n+1} - H_j^n}{\Delta t} + \frac{Q_j^{n+1} - Q_{j-1}^{n+1}}{\Delta x_j} = q_{*j}^n \quad (III 15)$$

La ecuación dinámica (ec III 13) tiene los gastos al centro del volumen de control y las cotas del agua en la orillas, fig 2.2

$$\frac{Q_j^{n+1} - Q_j^n}{\Delta t} + Q_j^{n+1} \frac{U_{j+1}^n - U_{j-1}^n}{\Delta x_j + \Delta x_{j+1}} + gA_j^n \left[ \psi \frac{H_{j+1}^{n+1} - H_j^{n+1}}{\Delta \bar{x}_j} + (1 - \psi) \frac{H_{j+1}^n - H_j^n}{\Delta \bar{x}_j} \right] +$$

$$g n_j^2 \frac{Q_j^{n+1} |Q_j^n|}{A_j^n (R_j^n)^{4/3}} = 0 \quad (III 16)$$

donde  $\psi$  es un factor de peso del esquema,  $0 \leq \psi \leq 1$ , para que el esquema sea



incondicionalmente estable,  $\psi \geq 0.5$  Se recomienda emplear  $\psi = 0.6$  En la ec III 16

$$\Delta x_j = \frac{(\Delta x_j + \Delta x_{j-1})}{2} \quad (III 17)$$

Factorizando  $Q_j^{n+1}$  en la ec III 16 se llega a

$$Q_j^{n+1} = CD_j(H_j^{n+1} - H_{j+1}^{n+1}) + CE_j \quad (III 18)$$

donde  $CD_j$ ,  $CE_j$  y otras variables semejantes que se definen más adelante, deben entenderse como una variable (y no el producto de  $C D$ , etc) Estas variables dependen de valores del instante  $n$ , por ello, se les omite el superíndice, deben calcularse en cada instante y para cada tramo Se definen como.

$$CD_j = \psi DTGX_j A_j^n CC_j \quad (III 19)$$

$$CE_j = CC_j CH_j \quad (III 20)$$

donde

$$DTGX_j = \frac{g\Delta t}{\Delta x_j} \quad (III 21)$$

y además

$$CC_j = \frac{1}{1 + cux_j + fric_j} \quad (III 22)$$

$$CH_j = Q_j^n + DTGX_j(1 - \psi)A_j^n(H_j^n - H_{j+1}^n) \quad (III 23)$$

$$cux_j = DTX_j(U_{j+1}^n - U_{j-1}^n) \quad (III 24)$$

$$fric_j = g\Delta t \frac{n_j^2 |U_j^n|}{(R_j^n)^{4/3}} \quad (III 25)$$

$$DTX = \frac{\Delta t}{\Delta x_j + \Delta x_{j+1}} \quad (III 26)$$

De manera semejante puede obtenerse una ecuación para el gasto pero ahora para el volumen de control centrado en  $Q_{j-1}$  si se sigue la secuela anterior de aplicar la ecuación dinámica en dicho volumen (o lo que es lo mismo, recorriendo los subíndices al tramo correspondiente en la ec III 16) se tiene

$$Q_{j-1}^{n+1} = CD_{j-1}(H_{j-1}^{n+1} - H_j^{n+1}) + CE_{j-1} \quad (III 27)$$

donde las variables  $CD_{j-1}$ , etc se definen restando una unidad a los subíndices correspondientes de las ecs III 17 y III 18 a III 26) Sustituyendo las ecs III 18 y III 27 en la ecuación de continuidad, ec III 15, se eliminan los gastos y resulta una ecuación en función únicamente de las cotas del agua en el tramo, en su antecesor y su sucesor

$$\begin{aligned} -CD_{j-1}H_{j-1}^{n+1} + (S_j + CD_{j-1} + CD_j)H_j^{n+1} - CD_jH_{j+1}^{n+1} = \\ S_jH_j^n + CE_{j-1} - CE_j + q_j^n \Delta x_j \end{aligned} \quad (III 28)$$

donde

$$S_j = \frac{B_j^n \Delta x_j}{\Delta t} \quad (III 29)$$

### Tramos de fronteras.

Aunque se conserva la estructura general de la ec III 28, en las fronteras algunos términos de las ecuaciones anteriores se calculan de manera diferente; de acuerdo con el tipo de frontera la solución sería como sigue

**a) Tramo aguas arriba con hidrograma conocido**

La ec III.13 se escribe como

$$B_1^n \frac{H_1^{n+1} - H_1^n}{\Delta t} + \frac{Q_1^{n+1} - Q_o^{n+1}}{\Delta x_1} = q_1^{*n} \quad (III 30)$$

donde  $Q_o^{n+1}$  es el gasto que entra aguas arriba al tramo en el instante  $n+1$ , este gasto se obtiene del hidrograma dado (por ejemplo, por interpolación). Al sustituir la ec III 18 para el gasto que sale del tramo 1 (lo que equivale a emplear el subíndice 1) resulta (ver ec III 28)

$$(S_1 + CD_1)H_1^{n+1} - CD_1H_2^{n+1} = S_1H_1^n - CE_1 + q_1^{*n}\Delta x_1 + Q_o^{n+1} \quad (III 31)$$

en la que quedan únicamente dos incógnitas, puesto que se ha pasado el gasto  $Q_o$  al lado derecho por ser conocido. En este caso, dado que no existe un tramo precedente, la ec III 24 se calcula como:

$$cux_1 = DTX_1 \left[ U_2^n - \left( \frac{Q_o^{n+1}}{A_1^n} \right) \right] \quad (III 32)$$

**b) tramo aguas abajo con nivel conocido**

Si en el último tramo se conoce el nivel del agua en cada instante,  $H_F$ , (por ejemplo, por ser un lago, o bien por interpolación de un limnigrama), esta ya no es incógnita y no se requiere ecuación para ese tramo, para el tramo inmediato aguas arriba (tramo  $jj-1$ ), la ec III 28 se escribe en este caso como:

$$\begin{aligned} & - CD_{jj-2}H_{jj-2}^{n+1} + (S_{jj-1} + CD_{jj-2} + CD_{jj-1})H_{jj-1}^{n+1} = \\ & CD_{jj-1}H_F^{n+1} + S_{jj-1}H_{jj-1}^n + CE_{jj-2} - CE_{jj-1} + q_{jj-1}^{*n}\Delta x_{jj-1} \end{aligned} \quad (III 33)$$

donde ahora

$$cux_{jj} = DTX_{jj} (U_{jj}^n - U_{jj-1}^n) \quad (III 34)$$



$$DTX_{jj} = \frac{\Delta t}{\Delta x_{jj}} \quad (III 35)$$

por no tenerse información de la velocidad aguas abajo del tramo.

**c) tramo con conector aguas arriba**

Sea el tramo c el del conector y el tramo j el del primer tramo aguas abajo; la ecuación para este tramo es:

$$-CD_c H_c^{n+1} + \left( S_j + CD_c CD_j \right) H_j^{n+1} - CD_j H_{j+1}^{n+1} = S_j H_j^n + CE_c - CE_j + q_*^n \Delta x_j \quad (III 36)$$

donde

$$CC_c = \frac{1}{1 + cuc_c + fric_c} \quad (III 37)$$

$$cuc_c = DTX_c (U_j - U_c) \quad (III 38)$$

$$fric_c = g \Delta t \frac{n_c^2 |U_c^n|}{(R_c^n)^{4/3}} \quad (III 39)$$

$$DTX_c = \frac{\Delta t}{\Delta x_c} \quad (III 40)$$

**d) tramo con conector aguas abajo**

Este caso es semejante al de un tramo con nivel conocido aguas abajo, solo que ahora el nivel del agua en el conector es desconocido; si el penúltimo tramo del río es j y el siguiente es un conector, c, la ec III 28 se escribe como

$$- CD_{j-1}H_{j-1}^n + (S_j + CD_{j-1} + CD_j)H_j^{n+1} - CD_jH_c^{n+1} = S_jH_j^n + CE_{j-1} - CE_j + q_j^n \Delta x_j \quad (III 41)$$

donde

$$cux_j = DTX_j (U_j^n - U_{j-1}^n) \quad (III 42)$$

$$DTX_j = \frac{\Delta t}{\Delta x_j} \quad (III 43)$$

En general, el cambio más importante es en el cálculo de los términos convectivos ya que en las fronteras se hace descentrado

### Método de solución.

El algoritmo que se presenta se ha adaptado del descrito en Berezowsky y Ríos (1982) y Cunge et al (1980) para una red de ríos de grandes dimensiones. La solución depende del tipo de río que se tenga y es de la siguiente forma:

#### Ríos tipo A

Sea un río con  $jj$  tramos; en el tramo 1 entra un hidrograma, el tramo  $jj$  es de nivel conocido,  $H_F$ . En este caso, se tienen tres tipos de ecuaciones:

- Primer tramo aguas arriba, gasto conocido; ec III.31
- Tramos intermedios (hasta el antepenúltimo); para cada uno de ellos se utiliza directamente la ec III.28.
- Último tramo aguas abajo de nivel conocido; la ecuación del penúltimo tramo es la ec III.34

De esta manera, se forma un sistema de  $jj-1$  ecuaciones y  $jj-1$  incógnitas (que corresponden a los niveles del agua,  $H^{n+1}$ ), en el caso de este tipo de ríos el sistema está completo, después de resolverlo, se calculan los gastos para todos los tramos con la ec III.18 ( $j=1, 2, \dots, jj-1$ ), las velocidades resultan de dividir el gasto en cada sección entre su área respectiva



### **Ríos tipo B**

Sea un río tipo B con  $jj$  tramos, en el tramo 1 entra un hidrograma; el tramo  $jj$  corresponde a un conector,  $H_c$ . En este caso, las ecuaciones tipo son:

- a) Primer tramo aguas arriba, gasto conocido: ec III 31
- b) Tramos intermedios (hasta el antepenúltimo); para cada uno de ellos se utiliza directamente la ec III 28
- c) Dado que el último tramo aguas abajo es un conector, la ecuación del penúltimo tramo es la ec III 41

Como el nivel del agua en el nudo conector no es conocido, el sistema de ecuaciones no queda completo y debe resolverse con toda la red, tal como se discute más adelante

### **Ríos tipo C**

Sea un río tipo C con  $jj$  tramos; el primer tramo tiene aguas arriba un conector; el tramo  $jj$  es de nivel conocido,  $H_F$ . En este caso, se tienen tres tipos de ecuaciones

- a) Primer tramo aguas arriba; ec III 36
- b) Tramos intermedios (hasta el antepenúltimo); para cada uno de ellos se utiliza directamente la III 28
- c) Último tramo aguas abajo de nivel conocido; la ecuación del penúltimo tramo es la ec III 34

### **Ríos tipo D**

Sea un río con  $jj$  tramos, el primer tramo tiene aguas arriba un conector, el tramo  $jj$  es un conector,  $H_c$ . En este caso, se tienen tres tipos de ecuaciones:

- a) Primer tramo aguas arriba, ec III 41
- b) Tramos intermedios (hasta el antepenúltimo); para cada uno de ellos se utiliza directamente la ec III 28
- c) Dado que el último tramo aguas abajo es un conector, la ecuación del penúltimo tramo es la ec III 41

En este caso resulta un sistema de  $jj-1$  ecuaciones y  $jj+1$  incógnitas (ya que hay dos conectores).

### **Cálculo en la llanura de inundación.**

Comúnmente una avenida se genera en las partes altas de la cuenca, donde las pendientes son pronunciadas y la velocidades son grandes por lo que en esta zona el agua fluye hacia las zonas más bajas, transportando material que se sedimenta formando planicies; es por ésto que los daños causados por las avenidas no son considerables en las partes altas sino al entrar a la parte baja, donde la pendiente del río disminuye y por lo tanto su capacidad de conducción, facilitando el desbordamiento de los ríos, de esta forma el agua fluye hacia las planicies de inundación. Las superficies inundadas pueden estar confinadas (lagunas de inundación) o bien pueden comunicarse con otros cauces de la llanura o con tramos aguas abajo del mismo río



Los efectos de los dos casos anteriores son distintos, en el primero el principal efecto es el de un almacenamiento del agua desbordada del río que no puede regresar al cauce con el fin de evitar que el río se vacíe, en el segundo caso el agua vertida puede ingresar a otra llanura vecina de nivel igual o inferior.

Para establecer la liga entre el cauce y una llanura de inundación, se considera que el gasto que fluye de un elemento a otro, o viceversa, sigue la ley de descarga de un vertedor de cresta ancha, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = S\phi L(H - E)^{\frac{3}{2}} \quad (III.44)$$

donde

- $E$  Elevación media del bordo que separa el cauce de la planicie.  
 $L$  Longitud de vertido entre los dos elementos.  
 $Q$  Gasto o caudal de aportación del río a la planicie  
 $\phi$  Coeficiente de descarga, en función del ahogamiento del flujo

Además

$$\begin{aligned} H &= HR, & \text{si} & HR > HL & \text{y} & S &= 1 \\ H &= HL, & \text{si} & HR < HL & \text{y} & S &= -1 \end{aligned}$$

donde

- $HL$  Elevación de la superficie del agua en la planicie  
 $HR$  Elevación de la superficie del agua en el río

Debido a que el coeficiente de descarga  $\phi$  depende del ahogamiento, la variación de éste se define con la siguiente relación

$$\zeta = \frac{|HR - HL|}{(H - E)} \quad (III.45)$$

La relación entre el coeficiente de descarga y el ahogamiento, ajustando leyes exponenciales a la curva que relaciona estos valores, es

$$\phi = 0.669\zeta^{0.3481} \quad \text{Si} \quad 0 < \zeta \leq 0.1 \quad (III.46)$$

$$\phi = 0.471\zeta^{0.1887} \quad \text{Si} \quad 0.1 < \zeta \leq 1.0 \quad (III.47)$$

$$\varphi = 0.446 \quad \text{Si } 1.0 < \zeta \quad (III\ 48)$$

Para realizar el análisis del flujo del cauce a una o varias llanuras de inundación, se considera que se forman volúmenes de control que en planta son superficies irregulares, y basándose en que el flujo por sus fronteras sea aproximadamente normal a éstas es posible representar este fenómeno por medio de las ecuaciones de continuidad y en algunos casos dinámica. En la figura III.7a, se muestra el volumen de control para éstas

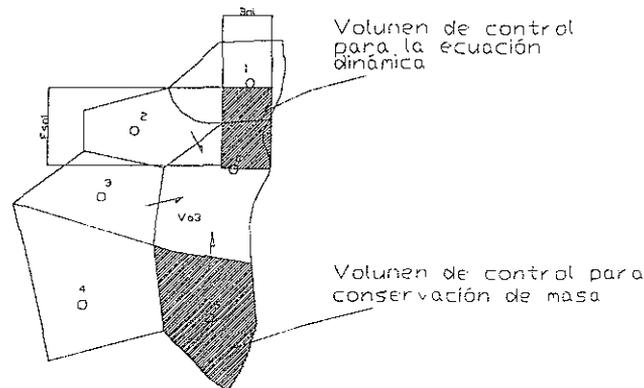


Fig. III.7a Volumen de control en las llanuras

La ecuación de continuidad expresa que el cambio de almacenamiento en el volumen de control es debido a los flujos netos que entran al volumen de control. Si se acepta que el área en planta del elemento permanece prácticamente constante, entonces:

$$a_i^n \frac{H_i^{n+1} - H_i^n}{\Delta t} = \left[ \sum_{j=1}^m B_{i,j} h_{i,j}^n U_{i,j}^{n+1} - \sum_{j=1}^m QE_{i,j} \right] \quad (III\ b49)$$

donde

- $a_i^n$  área en planta
- $H_i$  cota o elevación del agua al centro del elemento  $i$
- $m$  número de volúmenes de control adyacentes al volumen  $i$  con los cuales hay flujo con velocidad  $U_{i,j}$
- $U_{i,j}^{n+1}$  velocidad en la frontera entre los elementos  $i$  y  $j$ , positiva cuando sale del volumen de control
- $QE_{i,j}$  gasto de entrada al elemento  $i$  que no se ha considerado (como por ejemplo

$B_{i,j}$  los que vienen de un río)  
 ancho de frontera entre los elementos  $i$  y  $j$ , en  $m$

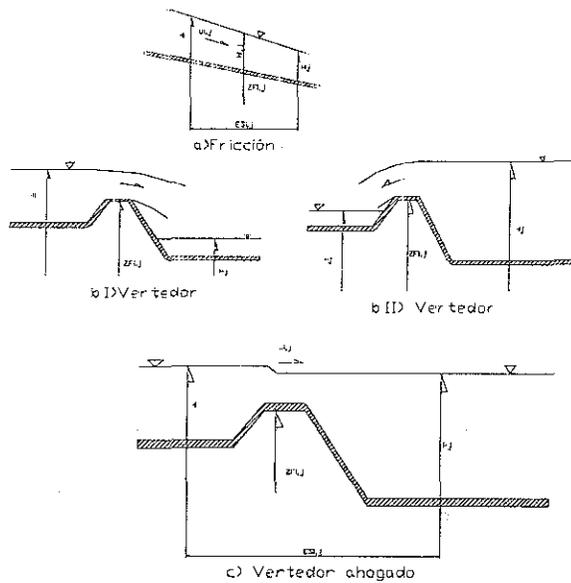
y además

$$h_{i,j}^n = \frac{H_1^n + H_j^n}{2} - ZF_{i,j} \quad (III.50)$$

$h_{i,j}$  tirante medio de flujo entre los elementos  $i$  y  $j$   
 $ZF_{i,j}$  cota en la frontera entre el elemento  $i$  y el  $j$

$h$

De acuerdo con lo anterior se tienen cuatro formas de flujos entre elementos, como puede verse en la figura III 7b, que son:



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. III 7b Tipos de flujo entre elementos de la llanura.

**Flujo dominado por fricción.**

Este tipo de flujo se presenta cuando no hay fronteras internas y es en general el más común. En la figura III 7b, se muestra este tipo de flujo.

Se calcula con la ecuación dinámica simplificada. Los volúmenes de control para aplicar esta ecuación son aproximadamente rectangulares en planta, su longitud es igual a la distancia de centro a centro entre elementos y su ancho es el de la frontera entre los

mismos. Se supone que la aceleración convectiva es pequeña comparada con los otros términos entonces la ecuación dinámica quedaría

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + g S_f = 0 \quad (III.51)$$

El gradiente hidráulico, para el cálculo del flujo en la llanura, se obtiene con la ecuación de Chezy. En diferencias finitas, utilizando un esquema del tipo de Cruickshank para el flujo en cauces, la ecuación III.51 se expresa como:

$$\frac{U_{i,j}^{n+1} - U_{j,1}^n}{\Delta t} + g \frac{H_j^{n+1} - H_i^{n+1}}{ES_{i,j}} + g \frac{U_{i,j}^{n+1} |U_{i,j}^n|}{C_{i,j}^2 h_{i,j}^n} = 0 \quad (III.52)$$

donde

$ES_{i,j}$  distancia de centro a centro entre los elementos  $i$  y  $j$

$C_{i,j}$  coeficiente de Chezy

Factorizando  $U_{i,j}^{n+1}$  y ordenando

$$U_{i,j}^{n+1} = -S_{i,j} [H_j^{n+1} - H_i^{n+1}] + \frac{U_{i,j}^n}{1 + R_{i,j}} \quad (III.53)$$

donde

$$S_{i,j} = g \frac{\Delta t}{ES_{i,j} (1 + R_{i,j})} \quad (III.54)$$

En el caso c de la figura III.7b, el flujo por vertido se ahoga, y por ello se calcula con este mismo procedimiento.

Puede suceder que durante la etapa de vaciado o de llenado de un elemento se presenten condiciones de flujo crítico, por lo que las condiciones cambian realizando el resto del cálculo en condiciones críticas, esto constituye una frontera interna que se resuelve obligando una sección de control, en la que el flujo es crítico.

### Flujo por vertido.

El caso de flujo por vertido, casos b de la figura III.7b, se calcula como

$$Q_{i,j} = 1.90 S B_{i,j} \left( H_m^n - Z_{F_{i,j}} \right)^{3/2} \quad (III.55)$$

donde

signo = -1 y  $m=1$  en el caso I

signo = 1 y  $m=j$  en el caso II.

### III.3 CALCULO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO PARA EL CASO DE LA COMARCA LAGUNERA.

Los diversos problemas que presentan los asentamientos urbanos, en especial en zonas de planicie, se presenta frecuentemente en la literatura sobre la materia, pero se ha acostumbrado dar sólo las descripciones y las estadísticas de los daños presentados, identificando, a la vez, algunas de las causas más obvias del desastre.

Sin embargo, el reciente crecimiento en la magnitud y la cobertura de las inundaciones, que en los últimos años se han presentado como una tendencia permanente y amenazante en todo el país, ha provocado un interés especial, no solo en la indagación sobre sus causas, sino, además, en la búsqueda de las medidas eficientes para combatirlas

De este interés originado por la necesidad apremiante de brindar protección a los habitantes de los asentamientos urbanos, ha surgido la necesidad de planificar zonas urbanas expuestas a inundaciones desde un enfoque global, que implique realizar un análisis serio y objetivo del problema

La Comarca Lagunera es un ejemplo de zona urbana (Torreón, Coahuila, Ciudad Lerdo y Gómez Palacio, Durango), desarrollada en la zona de planicie del río Nazas encontrándose ubicada dentro de la región hidrológica No. 36

La región Lagunera por su ubicación se encuentra protegida de las perturbaciones ciclónicas que se generan tanto en el Golfo de México como en el Océano Pacífico, por la Sierra Madre Oriental y por la Sierra Madre Occidental respectivamente. Esta protección es relativa ya que en algunas ocasiones las perturbaciones del Océano Pacífico han pasado al otro lado de la Sierra Madre Occidental y han afectado la cuenca del río Nazas con alguna intensidad (Ver fig. III.8)

#### **Río Nazas.**

La cuenca del río Nazas se encuentra situada en su mayor parte en el estado de Durango y una pequeña parte en el estado de Coahuila, hacia su desembocadura en la laguna de Mayrán. Nace de la confluencia de dos ríos en las estribaciones del norte y del este de la Sierra Madre Occidental a una elevación que oscila entre los 2647 y los 3022 m s.n.m. y recibe el nombre de río Santiago por un lado y río Tepehuanes por otro. Estos dos ríos dan lugar al río Ramos. El río Ramos confluye con el río Sextín o del Oro. En la confluencia del río Ramos y el río Sextín se construyó la presa Lázaro Cárdenas. Después continúa el río su rumbo pero ya con el nombre de río Nazas, el cual se aprovecha en el Distrito de Riego de la Región Lagunera, este río desemboca en la laguna de Mayrán

La región hidrológica no. 36 se ubica al norte de la República Mexicana entre los paralelos 22° 40' y 26° 35' de latitud norte y los meridianos 101° 30' y 106° 20' de longitud. Esta región corresponde a las cuencas cerradas de los ríos Nazas y Aguanaval, principalmente

Su superficie total es de 98,372 km<sup>2</sup>, de los cuales, 59,632 km<sup>2</sup> (63.2 %) corresponden a la cuenca de la Laguna de Mayrán, donde descargaba el río Nazas y 34,740 km<sup>2</sup> (36.8%) a la cuenca de la laguna de Viesca, donde descargaba el río Aguanaval (Fig. III.9).

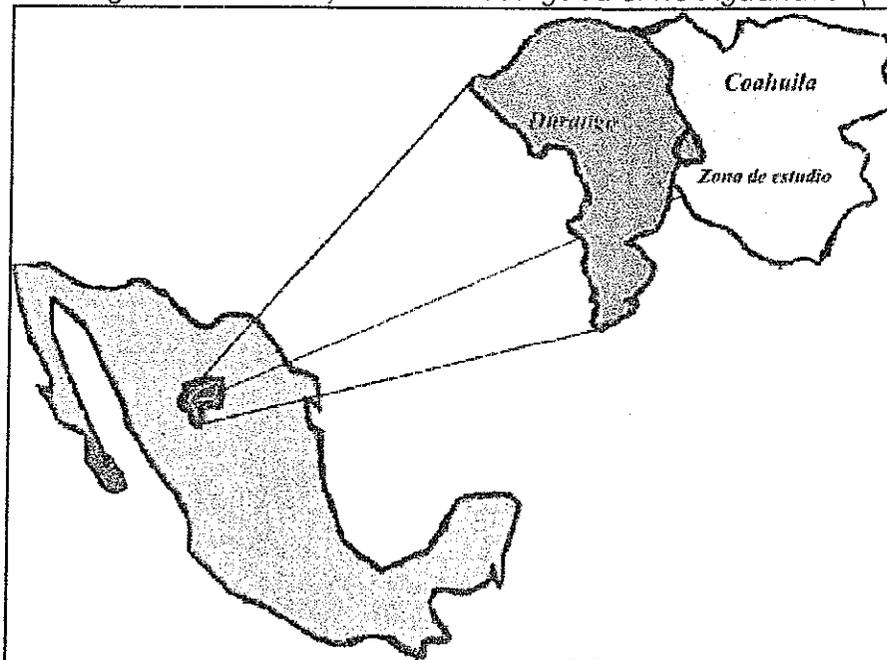


Fig. III.8 Localización de la Comarca Lagunera.



Fig. III.9 Localización de la Región Hidrológica No 36

### **Distribución de la precipitación.**

La precipitación media anual de la cuenca es de 369 mm durante el período 1931-1970. Las lluvias máximas se presentan en las partes altas de la cuenca, al sur y al oeste en los estados de Zacatecas y Durango, siendo el máximo el ocurrido en la estación Saín Alto, aguas arriba de la presa el Cazadero, que fue de 1043 mm en 1958. Las lluvias mínimas se presentan en la parte central de la cuenca. La temporada de lluvia queda comprendida entre los meses de junio a octubre, en los que se acumula del 80 al 85% del total anual, con máximos en los meses de julio y agosto. La época del estiaje abarca de noviembre a mayo, con mínimos en los meses de febrero a abril. En los inicios de los ríos Nazas y Aguanaval el clima se clasifica como frío estepario, mientras que en sus desembocaduras a las lagunas de Mayrán y de Viesca, respectivamente, el clima se clasifica como caliente desértico.

### **Crecientes del río Nazas.**

En el mes de septiembre de 1917, llovió intensamente en la cuenca alta del río Nazas, provocando una creciente con un gasto de  $3,453 \text{ m}^3/\text{s}$  que al no encontrar alguna obra reguladora de agua en el río, se desbordó, llegando a la ciudad de Gómez Palacio, causando destrozos, afectaciones a sembradíos, poblados y vías de ferrocarril.

En septiembre de 1944, se presentó un período de lluvias intensas, provocando una creciente extraordinaria cuyo gasto máximo registrado fue de  $6,128 \text{ m}^3/\text{s}$ .

De los registros existentes, la Laguna de Mayrán ha recibido agua del Nazas sólo en los años de 1936, 1938, 1941, 1944, 1958, 1968, 1991 y 1992.

Con posterioridad a la construcción de la presa Lázaro Cárdenas (1936 a 1946), ha habido 8 crecientes de cierta peligrosidad, siendo la de 1968 definitivamente extraordinaria. Por lo que toca a la presa Francisco Zarco (terminada en 1968), recibió la avenida de 1968 con un gasto de  $3360 \text{ m}^3/\text{s}$ , quedando reducida a  $1738 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### **Cálculo de los gastos máximos de diseño**

Con base en la metodología propuesta en el capítulo II, se inicia el cálculo de las avenidas máximas de diseño con ayuda de los datos registrados en las estaciones hidrométricas en la región hidrológica 36. (Tabla III 2).

| Cuenca        | Subcuenca                | Entidad   | Coordenada geo. |               |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------|---------------|
|               |                          |           | Lat. (° ' ")    | Long. (° ' ") |
| Río Nazas     | Salome.                  | Durango   | 25 14 00        | 105 27 30     |
|               | Sardinas I y II          | Durango   | 26 05 00        | 105 34 12     |
|               | Palmito I y II           | Durango   | 25 35 32        | 105 00 16     |
|               | Agustín Melgar           | Durango   | 25 15 51        | 104 04 05     |
|               | Cañon Fernández. I y II. | Durango   | 25 16 30        | 103 45 48     |
|               | Los Angeles              | Durango   | 25 30 08        | 103 34 03     |
|               | Coyote.                  | Coahuila  | 25 32 31        | 103 28 42     |
|               | Cuije.                   | Coahuila  | 25 41 37        | 103 20 09     |
| Río Aguanaval | La Flor                  | Coahuila  | 25 04 00        | 103 16 58     |
|               | Cazadero                 | Zacatecas | 23 43 38        | 103 06 32     |
|               | El Sauz I y II.          | Zacatecas | 23 10 48        | 103 12 28     |

Tabla III.2. Estaciones hidrométricas en la Región Hidrológica 36

La representación gráfica de las estaciones se presenta en la figura III 10.

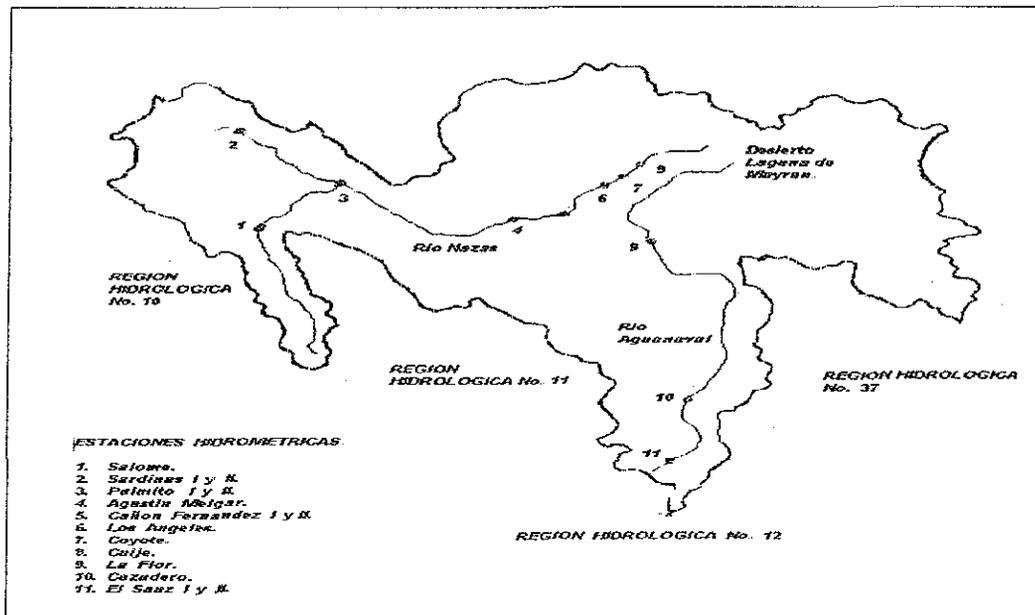


Fig. III.10 Representación gráfica de las estaciones hidrométricas en la Región.

Dichas estaciones tienen longitudes de registro que van de 14 hasta 68 años, como aparece en la tabla III 3

| Estación hidrométrica | Periodo     | No. de años |
|-----------------------|-------------|-------------|
| El Sauz I             | 1928 - 1949 | 22          |
| El Sauz II            | 1949 - 1977 | 22          |
| Salome Acosta         | 1969 - 1995 | 27          |
| El Palmito I          | 1929 - 1946 | 18          |
| El Palmito II         | 1946 - 1995 | 50          |
| Agustín Melgar        | 1970 - 1995 | 26          |
| Cañon Fernández I     | 1936 - 1968 | 33          |
| Cañon Fernández II    | 1968 - 1995 | 28          |
| Angeles               | 1964 - 1977 | 14          |
| Coyote                | 1910 - 1977 | 68          |
| Cuije                 | 1936 - 1977 | 42          |
| Sardinas I            | 1970 - 1995 | 26          |
| Sardinas II           | 1970 - 1977 | 8           |
| Cazadero              | 1961 - 1977 | 17          |
| La Flor               | 1941 - 1977 | 37          |

Tabla III.3 Número de años de registro de las estaciones hidrométricas en estudio.

En la zona de estudio, se encuentran ubicadas tres estaciones hidrométricas; Cañon Fernández a 22 km aguas arriba de Torreón, Coyote a 33 km aguas abajo de Cañon Fernández y Cuije a 25 km aguas abajo de Coyote.

A continuación se presentan los datos registrados de gastos, máximos anuales en esas tres estaciones, para tener una idea del comportamiento de los escurrimientos en la zona (Tabla III 3a)

| Año  | Q (m <sup>3</sup> /s) |
|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|
| 1968 | 1738                  | 1972 | 118                   | 1976 | 131                   | 1980 | 107.2                 | 1984 | 80.9                  | 1988 | 127.5                 | 1992 | 324.3                 |
| 1969 | 138                   | 1973 | 153                   | 1977 | 125                   | 1981 | 124.7                 | 1985 | 111.4                 | 1989 | 125.5                 | 1993 | 118.1                 |
| 1970 | 120                   | 1974 | 126                   | 1978 | 126.4                 | 1982 | 130.0                 | 1986 | 124.2                 | 1990 | 116.7                 | 1994 | 132.3                 |
| 1971 | 118                   | 1975 | 117                   | 1979 | 127.7                 | 1983 | 80.2                  | 1987 | 114.9                 | 1991 | 453.1                 | 1995 | 104.9                 |

Cañon Fernández.

| Año  | Q (m <sup>3</sup> /s) |
|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|
| 1910 | 276                   | 1920 | 1677                  | 1930 | 519                   | 1940 | 260                   | 1950 | 124                   | 1960 | 99                    | 1970 | 0                     |
| 1911 | 338                   | 1921 | 44                    | 1931 | 844                   | 1941 | 1432                  | 1951 | 104                   | 1961 | 54                    | 1971 | 0                     |
| 1912 | 992                   | 1922 | 86                    | 1932 | 2077                  | 1942 | 585                   | 1952 | 35                    | 1962 | 60                    | 1972 | 0                     |
| 1913 | 745                   | 1923 | 1592                  | 1933 | 205                   | 1943 | 871                   | 1953 | 566                   | 1963 | 57                    | 1973 | 34                    |

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |      |      |   |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|---|
| 1914 | 289  | 1924 | 864  | 1934 | 264  | 1944 | 1722 | 1954 | 113 | 1964 | 273  | 1974 | 0 |
| 1915 | 970  | 1925 | 1014 | 1935 | 1797 | 1945 | 156  | 1955 | 38  | 1965 | 93   | 1975 | 0 |
| 1916 | 1707 | 1926 | 3166 | 1936 | 2519 | 1946 | 89   | 1956 | 74  | 1966 | 531  | 1976 | 0 |
| 1917 | 3453 | 1927 | 726  | 1937 | 1143 | 1947 | 183  | 1957 | 66  | 1967 | 183  | 1977 | 0 |
| 1918 | 461  | 1928 | 3889 | 1938 | 1620 | 1948 | 141  | 1958 | 580 | 1968 | 1745 |      |   |
| 1919 | 2663 | 1929 | 1313 | 1939 | 636  | 1949 | 110  | 1959 | 59  | 1969 | 41   |      |   |

Coyote

| Año  | Q (m <sup>3</sup> /s) |
|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|
| 1937 | 862                   | 1944 | 1199                  | 1951 | 100                   | 1958 | 583                   | 1965 | 0                     | 1972 | 0                     | 1979 | 0                     |
| 1938 | 1396                  | 1945 | 102                   | 1952 | 0                     | 1959 | 0                     | 1966 | 438.5                 | 1973 | 0                     | 1980 | 0                     |
| 1939 | 468                   | 1946 | 77                    | 1953 | 520                   | 1960 | 0                     | 1967 | 143                   | 1974 | 0                     | 1981 | 0                     |
| 1940 | 232                   | 1947 | 124                   | 1954 | 44.7                  | 1961 | 0                     | 1968 | 1253                  | 1975 | 0                     | 1982 | 0                     |
| 1941 | 1266                  | 1948 | 141                   | 1955 | 0                     | 1962 | 0                     | 1969 | 0                     | 1976 | 0                     | 1983 | 0                     |
| 1942 | 647                   | 1949 | 101                   | 1956 | 51.7                  | 1963 | 0                     | 1970 | 0                     | 1977 | 0                     | 1984 | 0                     |
| 1943 | 893                   | 1950 | 127                   | 1957 | 0                     | 1964 | 314                   | 1971 | 0                     | 1978 | 0                     | 1985 | 0                     |

Cuije

Tabla III 3a Registro histórico en las estaciones hidrométricas.

De la información de estos registros se puede comentar lo siguiente:

Después de la construcción de la presa Francisco Zarco, se reubicó la estación Cañon Fernández para poder tomar las mediciones de gasto a la salida de la presa, razón por la cual el año de inicio de registro coincide con 1968, después de esa fecha se observan gastos con un valor promedio de 196.9 m<sup>3</sup>/s, con valores máximos en los años de 1992 y 1993 con 453.11 m<sup>3</sup>/s y 324.3 m<sup>3</sup>/s, fecha que coincide con inundaciones en la zona urbana de la Comarca Lagunera

La estación Coyote, que representa una muestra con longitud de registro considerable (68 años), presenta los escurrimientos antes y después de la construcción de la presa Francisco Zarco (1968), con un valor máximo de 3889 m<sup>3</sup>/s en 1928 y un valor promedio de 712.4 m<sup>3</sup>/s. Sin embargo, a partir de 1969 el escurrimiento fue nulo excepto para el año de 1973, lo que se debe de entender que ya no representa una muestra significativa dada la operación de la presa aguas arriba.

Finalmente, la estación Cuije, ubicada fuera de la zona urbana, muestra un registro considerable, pero prácticamente con el mismo comportamiento de la estación Coyote. En esta estación, se puede observar que para el año de 1968, la avenida que recibió la presa Francisco Zarco de más de 3360 m<sup>3</sup>/s, la redujo primeramente a 1745 m<sup>3</sup>/s y llegó con una magnitud a Cuije de 1253 m<sup>3</sup>/s.

Tomando en consideración los comentarios anteriores, se realizó el análisis de frecuencia

de gastos máximos a la estación Cañon Fernández (1968-1995)

A este registro se le ajustaron las distribuciones de probabilidad continuas comentadas anteriormente (tabla 3b), y de acuerdo con el criterio de los mínimos cuadrados, la distribución de probabilidad Gumbel de dos poblaciones fue la de mejor ajuste

| <b>Distribución de Probabilidad</b> | <b>Error</b> |
|-------------------------------------|--------------|
| Exponencial                         | 9336.3       |
| Gamma 2p                            | 1018.7       |
| Gumbel                              | 1216.5       |
| Doble Gumbel                        | 815.5        |
| LogNormal                           | 940.7        |
| Nash                                | 1242.4       |
| Normal                              | 1353.4       |
| Pearson III                         | 1604.4       |

*Tabla 3b. Resumen de errores en la estación Cañon Fernández*

La tabla III 4, muestra los resultados de los gastos calculados con la distribución Doble Gumbel para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años, así como los datos históricos obtenidos por interpolación de acuerdo con su longitud de registro.

Su representación gráfica aparece en la figura III.11.

| Periodo retorno (años) | Registro histórico (Q en m <sup>3</sup> /s) | Doble Gumbel. (Q en m <sup>3</sup> /s) |
|------------------------|---|--|
| 2                      | 127.4                                       | 124.8                                  |
| 5                      | 133.3                                       | 159.6                                  |
| 10                     | 333.3                                       | 714.5                                  |
| 20                     | 940.5                                       | 1126.7                                 |
| 50                     |   | 1616.9                                 |
| 100                    |   | 1927.1                                 |

*Tabla III 4 Resultados del análisis de frecuencia Mejor ajuste Distribución Doble Gumbel.*

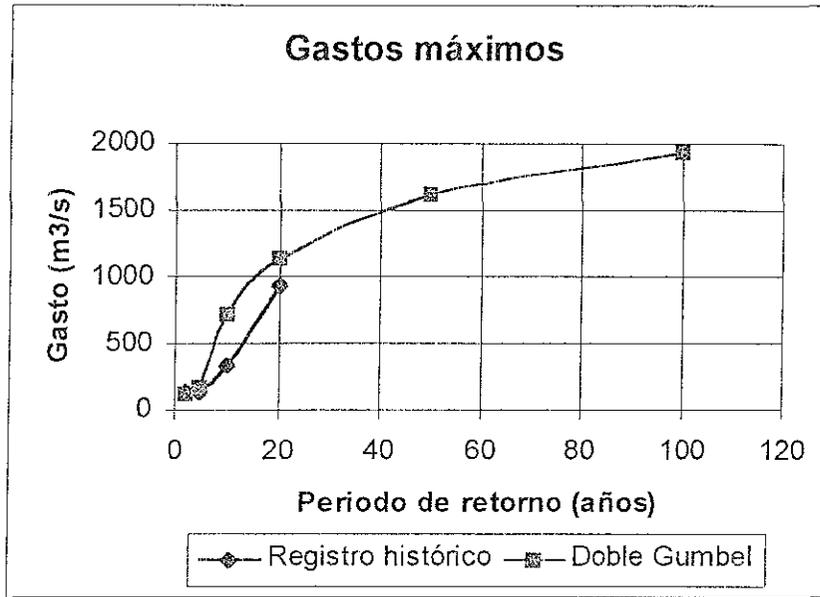


Fig. III.11 Comparación de gastos máximos.

Finalmente, la Fig III. 12 presenta un hidrograma de diseño para periodo de retorno de 100 años, utilizando el método del hidrograma adimensional del Soil Conservation Service. Considerando los siguientes datos:

| $Q = 1927.10 \text{ m}^3/\text{s}$ |                        | $T = 100 \text{ años.}$ |                 |
|------------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------|
| Tiempo de concentración (h)        | Duración en exceso (h) | Tiempo pico (h)         | Tiempo base (h) |
| 7.31                               | 5.4                    | 7.09                    | 35.4            |

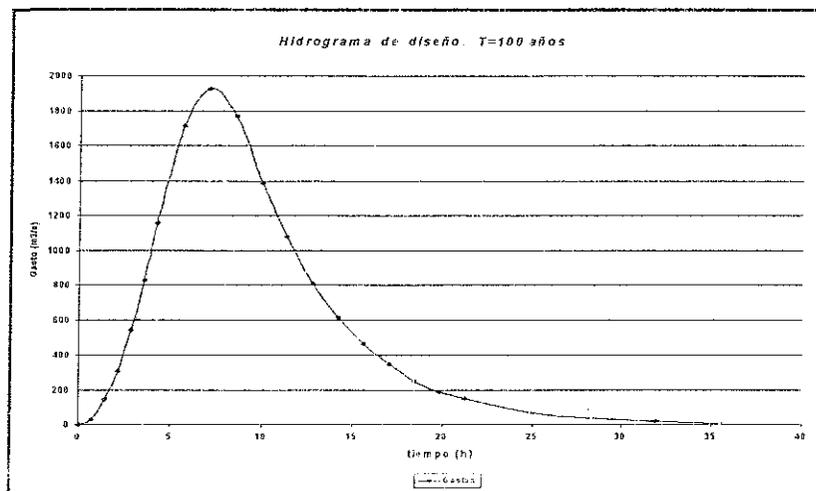


Fig. III.12 Hidrograma de diseño para  $T = 100$  años.

### **Cálculo de Perfiles en el río Nazas.**

**Flujo permanente.** Siguiendo con la metodología del capítulo II, se determinaron los niveles de la superficie libre del agua para los diferentes periodos de retorno. Este cálculo se realizó con el paquete de programación HEC-RAS.

Antes de obtener resultados es importante tomar las siguientes consideraciones

En el tramo del río Nazas que se encuentra entre la presa Francisco Zarco y la Laguna de Mayrán se localiza el objeto de este estudio, que inicia 10 km aguas arriba del puente Torreón-Durango y queda comprendido dentro del distrito de riego No 17 de la región Lagunera, con un alto potencial agrícola (Fig III 13)



*Fig. III 13 Fotografía aérea de la zona de estudio.*

Con base en información proporcionada por la C.N.A., se plantean las siguientes observaciones en la zona de proyecto

- a) En la margen derecha del río, aguas abajo de la presa San Fernando, se ubican los poblados Álvaro Obregón y Carlos Real, los cuales sufren afectaciones al presentarse avenidas de cierta magnitud por lo que deberá analizarse esa zona para evitar inundaciones en los mismos
- b) Sitio Puente-Ferrocarril. Esta estructura no presenta problemas por capacidad hidráulica, sin embargo, se ha observado que al pasar una avenida se erosiona el estribo de la margen izquierda. (Foto III.1).



*Foto III.1 Sitio puente-ferrocarril.*

- c) Estación el Coyote. Esta estructura representa un obstáculo en el flujo de agua al presentarse una avenida, ya que se encuentra parcialmente destruida y fuera de servicio provocando remanso y desviación del flujo hacia los municipios de Torreón y Gómez Palacio.

El tramo en estudio atraviesa las ciudades de Lerdo y Gómez Palacio, Durango y Torreón Coahuila, así como una parte de zonas agrícolas ubicadas en sus márgenes. De las observaciones hechas en los párrafos anteriores, se deduce que los desbordamientos se originan por la falta de capacidad hidráulica del río, debido entre otras cosas a un cauce bien definido, así como a la existencia de estructuras hidráulicas dentro del mismo, algunas de ellas antiguas que producen sobre elevaciones en los tirantes del agua

Por otro lado, el cauce del río se ubica en una zona árida y de baja precipitación pluvial, por lo que el cauce pierde su capacidad de conducción, y los asentamientos humanos invadan o lo reducen.

Como puede verse, existen varias situaciones que obstaculizan y alteran el escurrimiento en el río Nazas, requiriéndose por lo tanto llevar a cabo un estudio hidráulico que permita definir las áreas inundables con los gastos y periodos de retorno

La longitud analizada tiene 22 km, dividida en 110 secciones transversales a cada 200 m aproximadamente, incluyendo un total de 5 puentes.

La información obtenida de las secciones transversales se hizo con base en planos proporcionados por la C.N.A. producto de un levantamiento topográfico de 1994, en los cuales se dibujó la planta a una escala 1:2000 con curvas de nivel a cada metro

Las secciones transversales fueron obtenidas directamente de los planos e ingresadas al programa HEC-RAS. En la figura III 14 se muestra un tramo donde se marca la posición de algunas secciones transversales

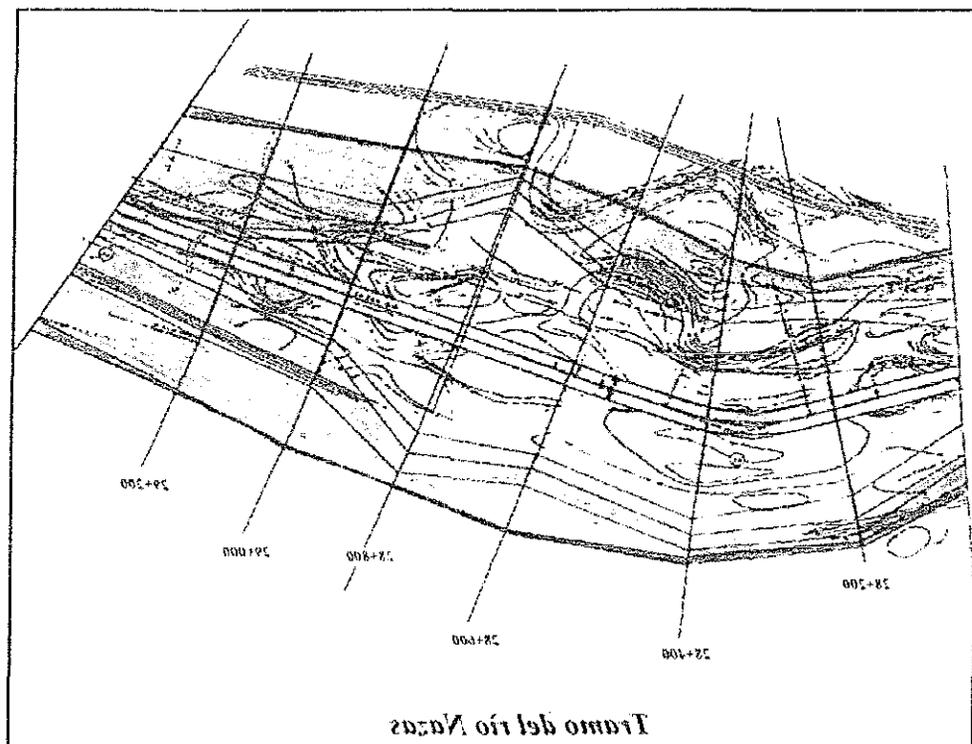


Fig. III.14 Algunas secciones transversales en el río.

Las figuras III.15 y III.16 muestran ejemplos de datos ingresados al HEC-RAS así como su correspondiente gráfico.

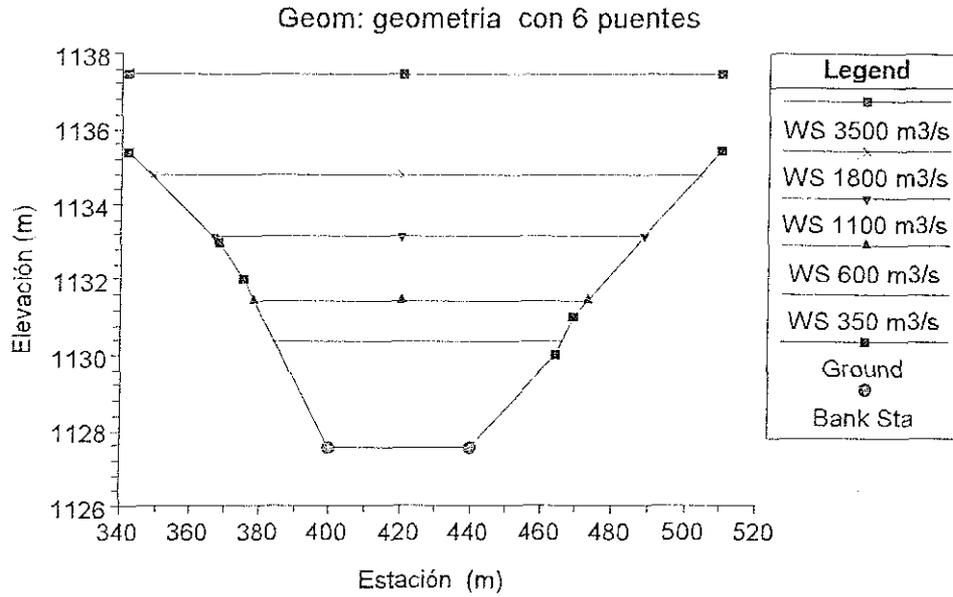


Fig. III.15 Sección transversal del río. Estación 22+000

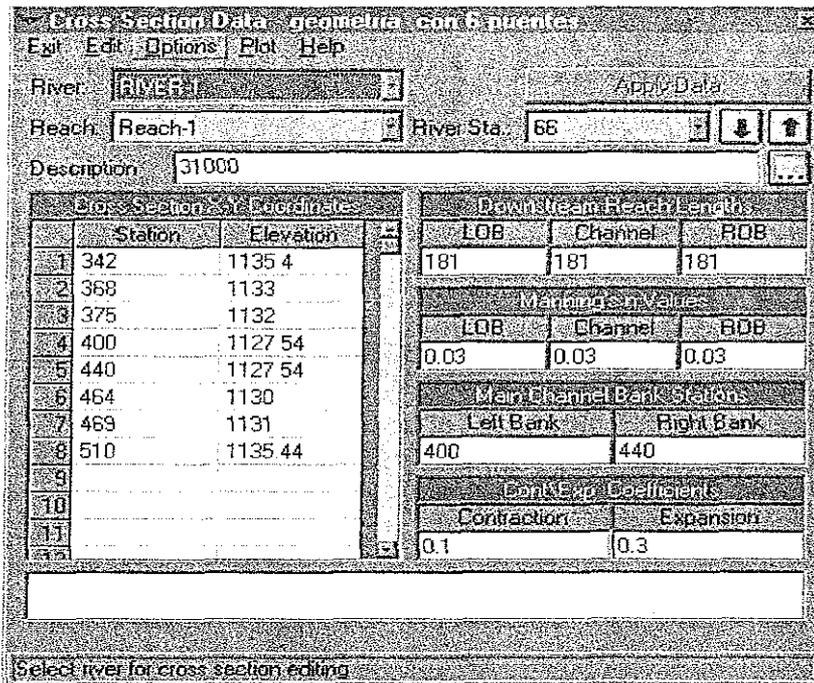


Fig. III.16 Datos de una sección transversal en HEC-RAS

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Los valores del coeficiente de rugosidad de Manning utilizados en el cálculo, fueron considerados con base en la propuesta de Chow, para cauces naturales con ancho de superficie libre del agua en avenidas mayor a 30 m.

Considerando secciones regulares sin cantos rodados ni arbustos se tomo el valor promedio de 0.030

Los coeficientes hidráulicos de conducción y expansión se contemplaron de acuerdo con los valores medios propuestos por el mismo programa para transiciones graduales de 0.1 y 0.3 respectivamente.

El cálculo de los perfiles se realizó, considerando los gastos máximos anuales obtenidos a través de un promedio aritmético entre los gastos máximos registrados y los calculados según la distribución de probabilidad doble Gumbel, para periodos de retorno de 10, 20 50 y 100 años (Tabla III.4)

| <i>T</i><br>(años) | Registro histórico<br>(m <sup>3</sup> /s) | Dist. Doble<br>Gumbel<br>Q (m <sup>3</sup> /s) | Gasto<br>promediado<br>(m <sup>3</sup> /s) |
|--------------------|---|--|--|
| 10                 | 333.3                                     | 714.5  | 550  |
| 20                 | 940.5                                     | 1126.7   | 1000                                       |
| 50                 |   | 1616.9   | 1600                                       |
| 100                |   | 1927.1   | 1900                                       |

Tabla III.4 Comparación de gastos medidos y calculados

Asimismo, se contemplaron 5 puentes, incluyendo uno doble y su ubicación fue la siguiente Tomando la dirección de flujo de aguas arriba hacia aguas abajo:

| Nombre             | Ubicación entre<br>estaciones |
|--------------------|-------------------------------|
| 1 - Ferrocarril    | 31550 y 31600                 |
| 2 - Puente Doble.  | 32400 y 32600                 |
| 3 - Ramos Arispe   | 34505 y 34600                 |
| 4 - Santiago Creel | 35400 y 35600                 |
| 5 - Solidaridad.   | 36400 y 36800                 |

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Las figuras siguientes presentan el modelado de los puentes en el HEC-RAS y sus correspondientes fotografías

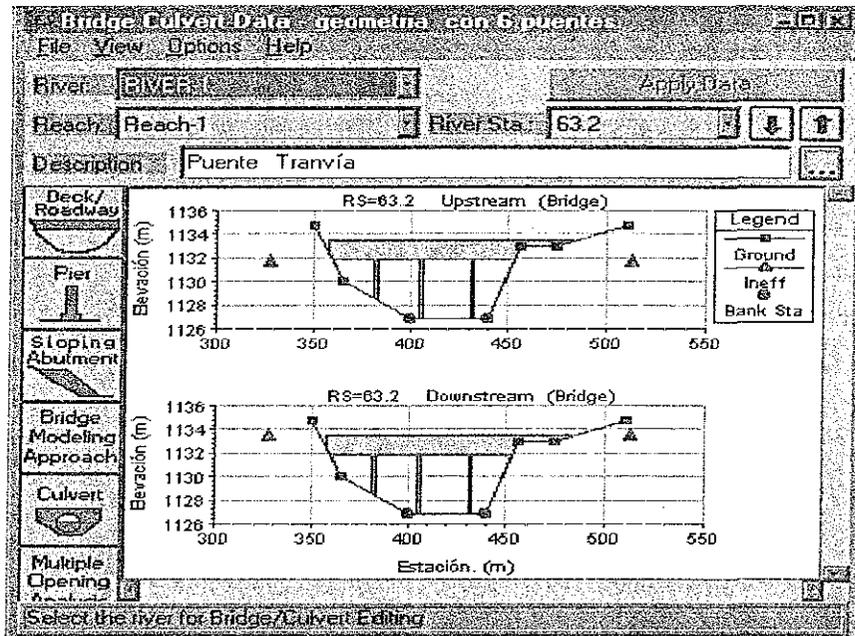


Fig. III.17 Puenete Ferrocarril.

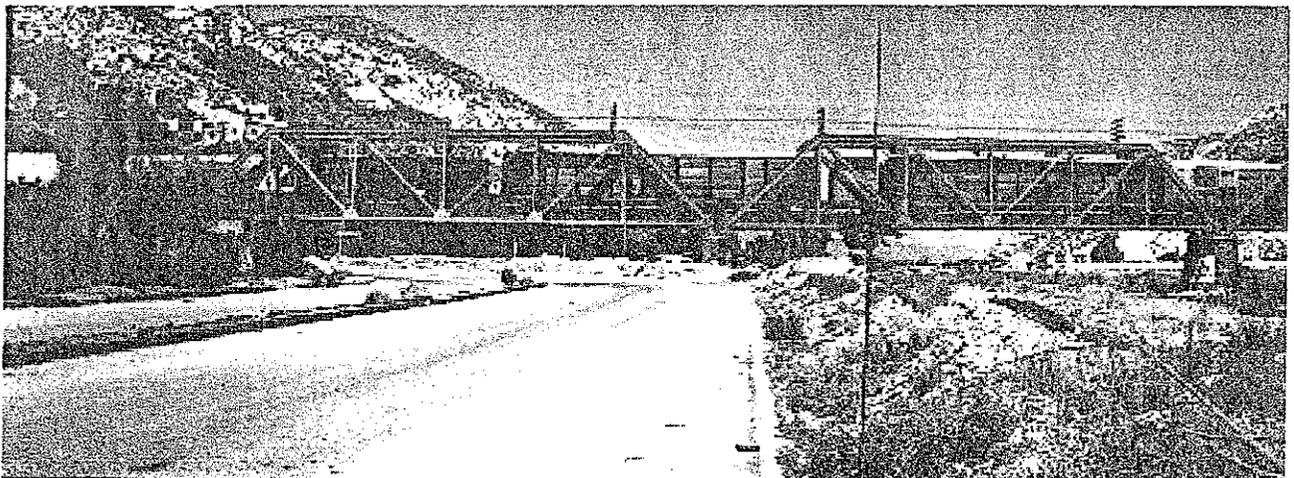


Foto III.2 Puenete Ferrocarril.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

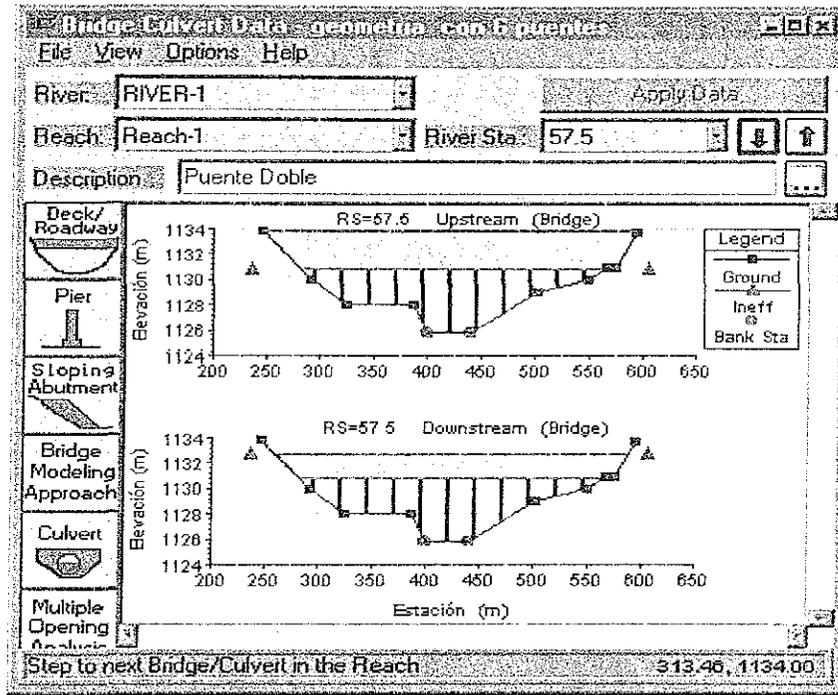


Fig. III.18 Modelación del puente doble.

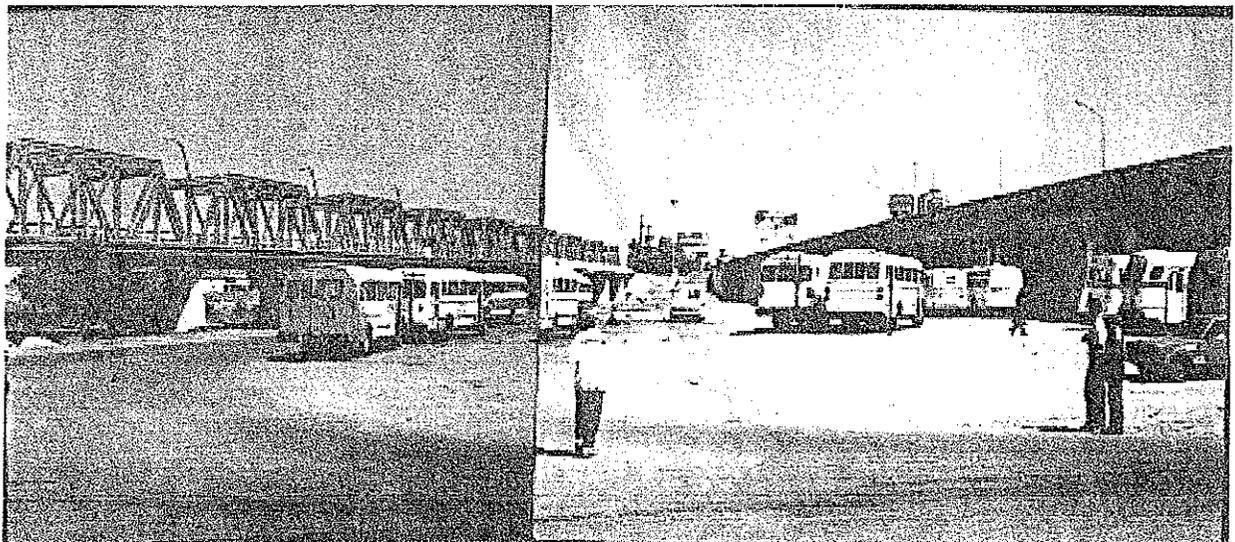


Foto III.3 Puente Doble.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

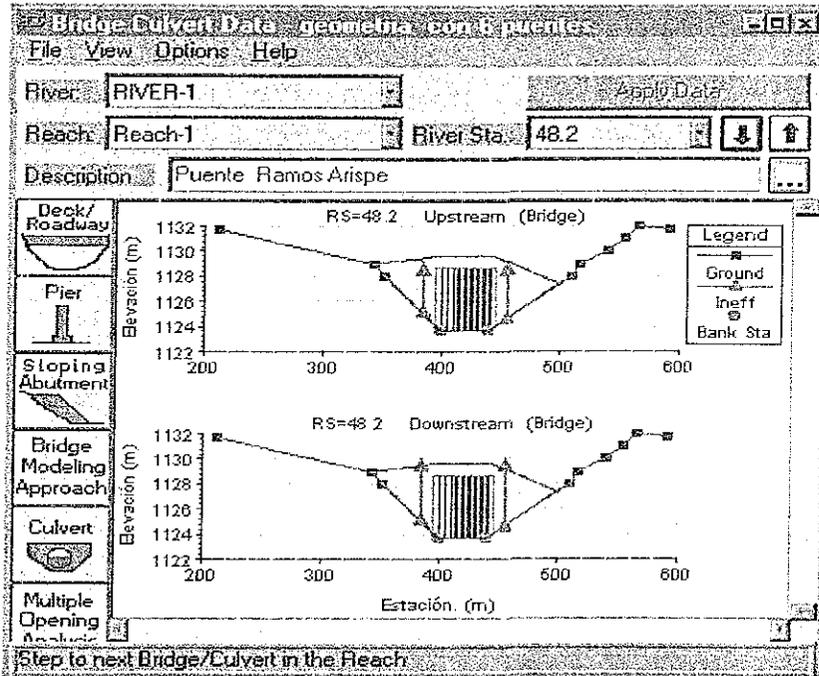


Fig. III 19 Puente Ramos Arispe.

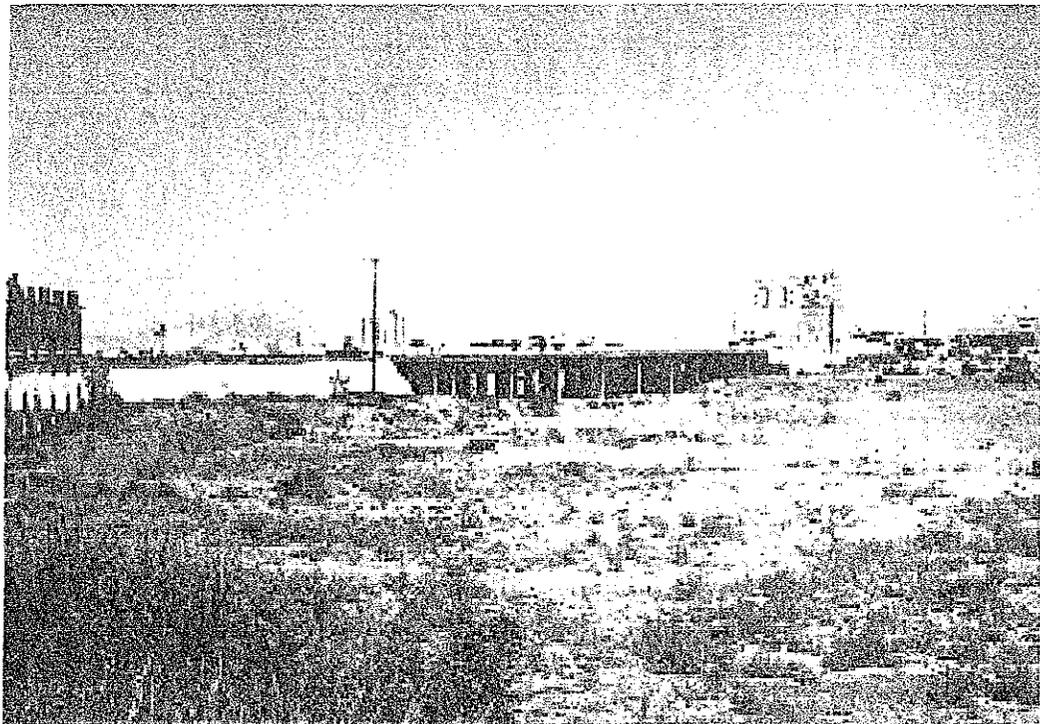


Foto III 4 Puente Ramos Arispe.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

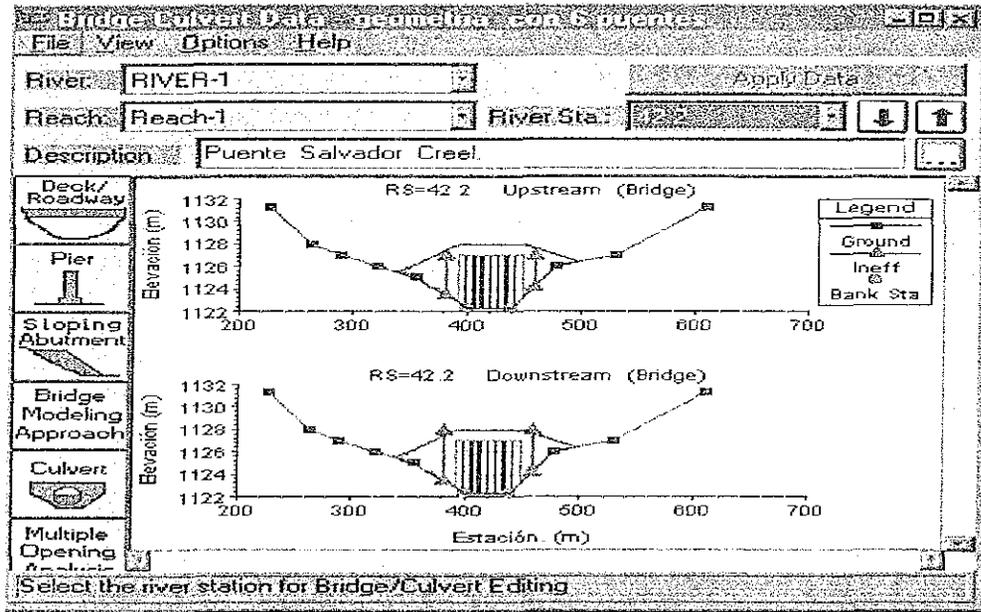


Fig. III.20 Puente Solidaridad

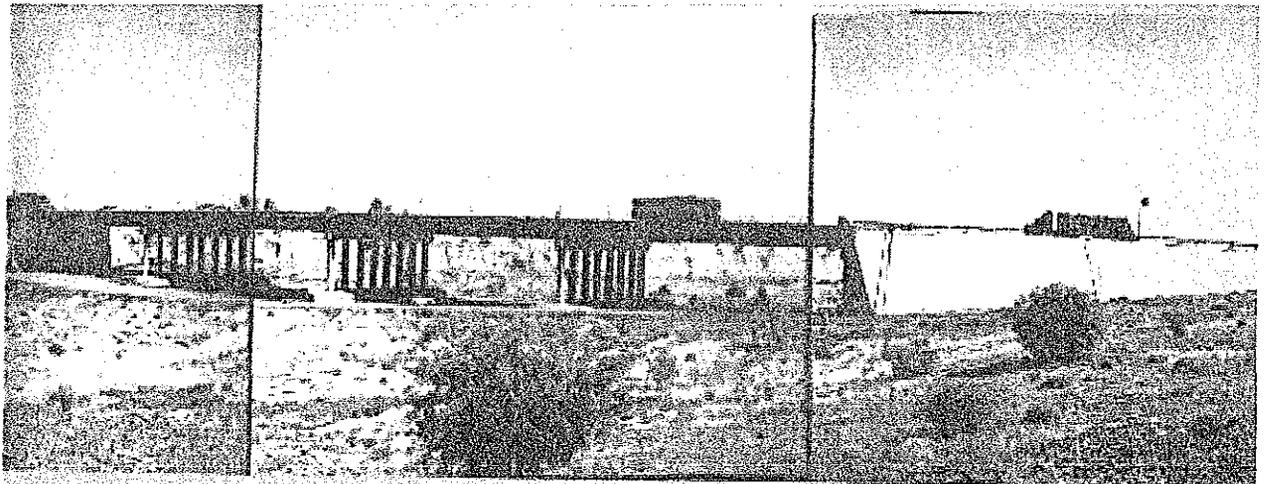


Foto III 5 Puente Solidaridad

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

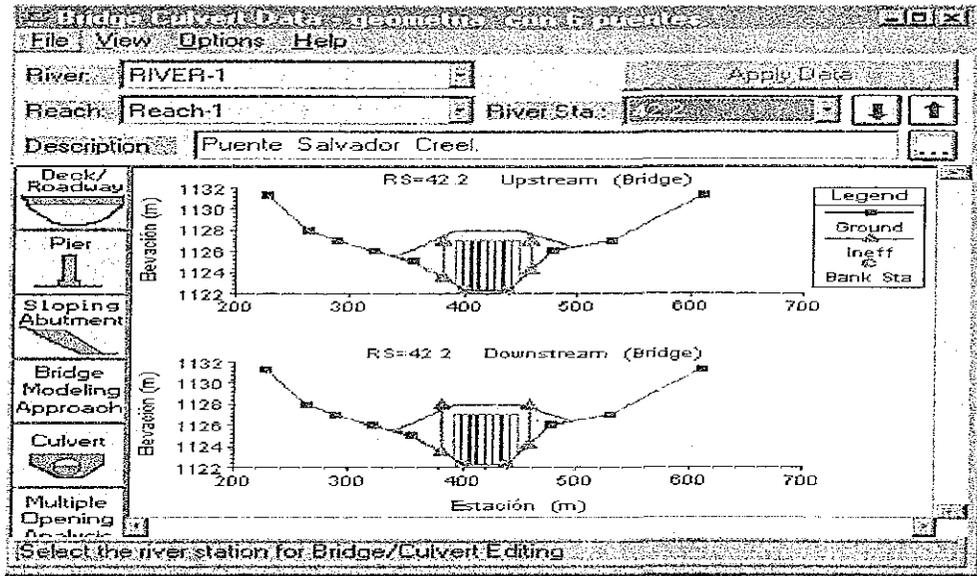


Fig. III.21 Puente Salvador Creel.

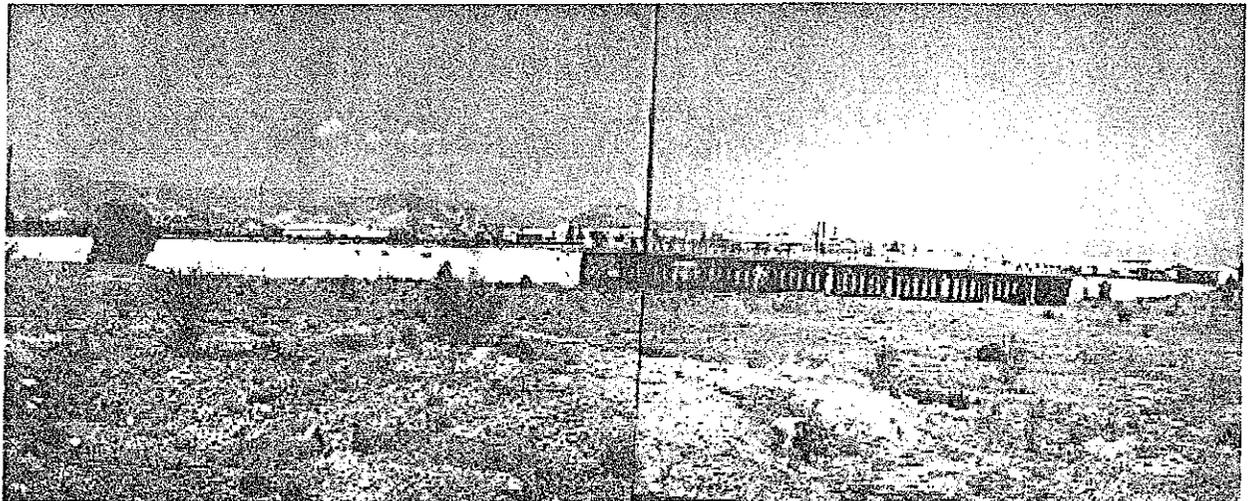


Foto III.6 Puente Salvador Creel.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Por las condiciones predominantes de flujo en el sistema, el cálculo de perfiles se llevo a cabo considerando un régimen subcrítico en toda su extensión. Eligiéndose como condición inicial la elevación de la superficie libre de agua conocida. Dato proporcionado por la Gerencia de proyectos hidráulicos de Torreón Coahuila, en función de los niveles medidos en la estación 44+000.

De los resultados obtenidos por el HEC-RAS se presentan las tablas III 5, III 6, III 7 y III 8 donde aparecen los resultados de los perfiles de agua, su velocidad, así como su ancho de superficie y la Fig III 22 nos muestra su representación gráfica. De lo anterior, se obtienen las siguientes conclusiones:

(i) Para gastos pequeños, el efecto debido a los puentes es relativamente pequeño, incrementándose con el gasto hasta llegar a un valor máximo asociado a 600 m<sup>3</sup>/s, posteriormente, las diferencias entre niveles vuelven a disminuir lo que implica que para gastos muy grandes el obstáculo que representa el puente no afecta el comportamiento del perfil.

(ii) Las diferencias entre perfiles para gastos pequeños son prácticamente constantes en los 5 puentes, sin embargo, cuando el gasto se incrementa las diferencias entre secciones empiezan a disminuir en el último puente y los efectos se empiezan a sentir en los puentes anteriores. A medida de que aumenta el gasto las diferencias son mínimas en los tres últimos puentes y las perturbaciones viajan hacia aguas arriba.

(iii) Existen diferencias en los niveles del agua con y sin puentes, tanto positivas como negativas, debido a que en ciertas zonas el aumento del tirante debido al remanso del agua por el obstáculo, se compensa y aún se excede, por la disminución del tirante debido a las pérdidas adicionales ya que el régimen es subcrítico.

En este caso, la diferencia de niveles puede ser importante, ya que se acerca a dos metros de diferencia, y la particularidad de que alcanza una diferencia máxima para gasto asociado a los niveles de agua que chocan de lleno con el o los puentes y que va disminuyendo esta influencia, ya que el área hidráulica crece tanto, que el obstáculo que representan los puentes pierde significancia relativa.

Por lo tanto, los puentes modifican sustancialmente los niveles de agua en el río por lo que es importante considerarlos.

Finalmente, los resultados encontrados, muestran la importancia de tomar en cuenta no solo a cada puente en forma individual sino a los sistemas de puentes que pueden encontrarse, y en general a cualquier obstáculo en la corriente para definir zonas de peligro por inundación mismas que pueden variar sino se contempla su existencia.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla III.5 Perfiles de agua.  $Q = 550 \text{ m}^3/\text{s}$   $T = 10 \text{ años}$ 

| Estación | Plantilla<br>msnm | Elev. Agua<br>msnm | Tirante<br>m | Velocidad<br>m/s | Ancho sup.<br>m |
|----------|-------------------|--------------------|--------------|------------------|-----------------|
| 1        | 1117              | 1123.8             | 6.8          | 1.21             | 108.89          |
| 11       | 1118.3            | 1124.11            | 5.81         | 1.47             | 93              |
| 16       | 1118.95           | 1124.48            | 5.53         | 0.77             | 168.92          |
| 21       | 1119.7            | 1124.53            | 4.83         | 0.29             | 262.92          |
| 26       | 1120.38           | 1124.64            | 4.26         | 0.23             | 224.83          |
| 31       | 1121              | 1124.65            | 3.65         | 0.21             | 341.76          |
| 37       | 1121.5            | 1124.66            | 3.16         | 0.52             | 326.68          |
| 42       | 1122.3            | 1125.44            | 3.14         | 2.76             | 131.57          |
| 47       | 1123.4            | 1126.56            | 3.16         | 3.93             | 54.53           |
| 51       | 1124.28           | 1128.1             | 3.82         | 1.92             | 122.94          |
| 56       | 1125.36           | 1128.95            | 3.59         | 2.37             | 118.68          |
| 60       | 1126.24           | 1129.32            | 3.08         | 3.66             | 100.03          |
| 65       | 1127.32           | 1130.7             | 3.38         | 3.35             | 79.28           |
| 70       | 1128.4            | 1132.12            | 3.72         | 2.54             | 94.22           |
| 80       | 1130.6            | 1133.86            | 3.26         | 0.37             | 384.15          |
| 85       | 1131.68           | 1134.38            | 2.7          | 3.79             | 84.33           |
| 90       | 1132.8            | 1136.32            | 3.52         | 1.04             | 229.18          |
| 95       | 1133.45           | 1137.27            | 3.82         | 3.05             | 72.73           |
| 100      | 1134              | 1138.4             | 4.4          | 1.53             | 157.66          |
| 105      | 1134.54           | 1139.08            | 4.54         | 2.05             | 115.28          |
| 110      | 1135.2            | 1139.6             | 4.4          | 2.46             | 95.62           |

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla III.6 Perfiles de agua.  $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$   $T = 20 \text{ años}$ 

| Estación | Plantilla<br>m.s.n.m. | Elev. Agua<br>m.s.n.m. | Tirante<br>m | Velocidad<br>m/s | Ancho sup.<br>m |
|----------|-----------------------|------------------------|--------------|------------------|-----------------|
| 1        | 1117                  | 1125.2                 | 8.2          | 1.73             | 120.62          |
| 11       | 1118.3                | 1125.68                | 7.38         | 2.04             | 108.74          |
| 16       | 1118.95               | 1126.19                | 7.24         | 1.03             | 178.8           |
| 21       | 1119.7                | 1126.26                | 6.56         | 0.45             | 283.78          |
| 26       | 1120.38               | 1126.37                | 5.99         | 0.38             | 235.93          |
| 31       | 1121                  | 1126.39                | 5.39         | 0.33             | 384.38          |
| 37       | 1121.5                | 1126.4                 | 4.9          | 0.7              | 376.89          |
| 42       | 1122.3                | 1126.55                | 4.25         | 3.54             | 201.72          |
| 47       | 1123.4                | 1127.72                | 4.32         | 4.81             | 179.94          |
| 51       | 1124.28               | 1130.09                | 5.81         | 2.07             | 196.07          |
| 56       | 1125.36               | 1130.56                | 5.2          | 2.54             | 153.83          |
| 60       | 1126.24               | 1130.87                | 4.63         | 3.47             | 153.99          |
| 65       | 1127.32               | 1132.7                 | 5.38         | 3.17             | 141.68          |
| 70       | 1128.4                | 1133.62                | 5.22         | 2.96             | 109.3           |
| 80       | 1130.6                | 1135.29                | 4.69         | 0.51             | 485.68          |
| 85       | 1131.68               | 1135.18                | 3.5          | 5.04             | 116.82          |
| 90       | 1132.8                | 1137.69                | 4.89         | 1.24             | 263.99          |
| 95       | 1133.45               | 1138.58                | 5.13         | 3.88             | 101.27          |
| 100      | 1134                  | 1139.91                | 5.91         | 1.77             | 174.84          |
| 105      | 1134.54               | 1140.62                | 6.08         | 2.38             | 130.48          |
| 110      | 1135.2                | 1141.13                | 5.93         | 2.85             | 107.75          |

Tabla III.7 Perfiles de agua.  $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$   $T = 50 \text{ años}$ 

| Estación | Plantilla<br>m.s.n.m. | Elev. Agua<br>m.s.n.m. | Tirante<br>m | Velocidad<br>m/s | Ancho sup.<br>m |
|----------|-----------------------|------------------------|--------------|------------------|-----------------|
| 1        | 1117                  | 1127.1                 | 10.1         | 2.13             | 145.38          |
| 11       | 1118.3                | 1127.65                | 9.35         | 2.46             | 143.63          |
| 16       | 1118.95               | 1128.19                | 9.24         | 1.25             | 190.38          |
| 21       | 1119.7                | 1128.27                | 8.57         | 0.6              | 308.15          |
| 26       | 1120.38               | 1128.38                | 8            | 0.54             | 318.23          |
| 31       | 1121                  | 1128.4                 | 7.4          | 0.44             | 433.87          |
| 37       | 1121.5                | 1128.43                | 6.93         | 0.64             | 443.39          |
| 42       | 1122.3                | 1128.7                 | 6.4          | 2.31             | 306.24          |
| 47       | 1123.4                | 1128.69                | 5.29         | 4.96             | 234.26          |
| 51       | 1124.28               | 1130.88                | 6.6          | 2.65             | 205.42          |
| 56       | 1125.36               | 1131.51                | 6.15         | 3.15             | 171.04          |
| 60       | 1126.24               | 1132.2                 | 5.96         | 3.51             | 203.73          |
| 65       | 1127.32               | 1134.23                | 6.91         | 3.32             | 186.26          |
| 70       | 1128.4                | 1135                   | 6.6          | 3.55             | 141.65          |
| 75       | 1129.6                | 1135.98                | 6.38         | 3.21             | 393.59          |
| 80       | 1130.6                | 1136.41                | 5.81         | 0.67             | 537.72          |
| 85       | 1131.68               | 1136.02                | 4.34         | 5.79             | 132.06          |
| 90       | 1132.8                | 1138.9                 | 6.1          | 1.48             | 289.6           |
| 95       | 1133.45               | 1139.77                | 6.32         | 4.56             | 140.09          |
| 100      | 1134                  | 1141.31                | 7.31         | 2.07             | 190.74          |
| 105      | 1134.54               | 1142.08                | 7.54         | 2.76             | 144.77          |
| 110      | 1135.2                | 1142.62                | 7.42         | 3.26             | 109.99          |

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Tabla III.8 Perfiles de agua.  $Q = 1900 \text{ m}^3/\text{s}$   $T = 100 \text{ años}$ 

| Estación | Plantilla<br>m.s.n.m. | Elev. Agua<br>m.s.n.m. | Tirante<br>m | Velocidad<br>m/s | Ancho sup.<br>m |
|----------|-----------------------|------------------------|--------------|------------------|-----------------|
| 1        | 1117                  | 1128.2                 | 11.2         | 2.15             | 148             |
| 11       | 1118.3                | 1128.7                 | 10.4         | 2.47             | 152             |
| 16       | 1118.95               | 1129.18                | 10.23        | 1.31             | 194             |
| 21       | 1119.7                | 1129.27                | 9.57         | 0.65             | 320.15          |
| 26       | 1120.38               | 1129.37                | 8.99         | 0.59             | 362.15          |
| 31       | 1121                  | 1129.4                 | 8.4          | 0.48             | 458.2           |
| 37       | 1121.5                | 1129.42                | 7.92         | 0.67             | 475.9           |
| 42       | 1122.3                | 1129.5                 | 7.2          | 2.17             | 330.27          |
| 47       | 1123.4                | 1129.73                | 6.33         | 3.89             | 372.58          |
| 51       | 1124.28               | 1131.28                | 7            | 2.85             | 210.14          |
| 56       | 1125.36               | 1131.94                | 6.58         | 3.37             | 178.95          |
| 60       | 1126.24               | 1132.84                | 6.6          | 3.45             | 229.7           |
| 65       | 1127.32               | 1134.85                | 7.53         | 3.33             | 193.81          |
| 70       | 1128.4                | 1135.57                | 7.17         | 3.77             | 171.01          |
| 75       | 1129.6                | 1136.58                | 6.98         | 2.99             | 450             |
| 80       | 1130.6                | 1136.92                | 6.32         | 0.72             | 550.03          |
| 85       | 1131.68               | 1136.47                | 4.79         | 5.92             | 140.05          |
| 90       | 1132.8                | 1139.35                | 6.55         | 1.58             | 290             |
| 95       | 1133.45               | 1140.25                | 6.8          | 4.73             | 141             |
| 100      | 1134                  | 1141.83                | 7.83         | 2.22             | 194             |
| 105      | 1134.54               | 1142.63                | 8.09         | 2.94             | 149             |
| 110      | 1135.2                | 1143.21                | 8.01         | 3.48             | 110             |

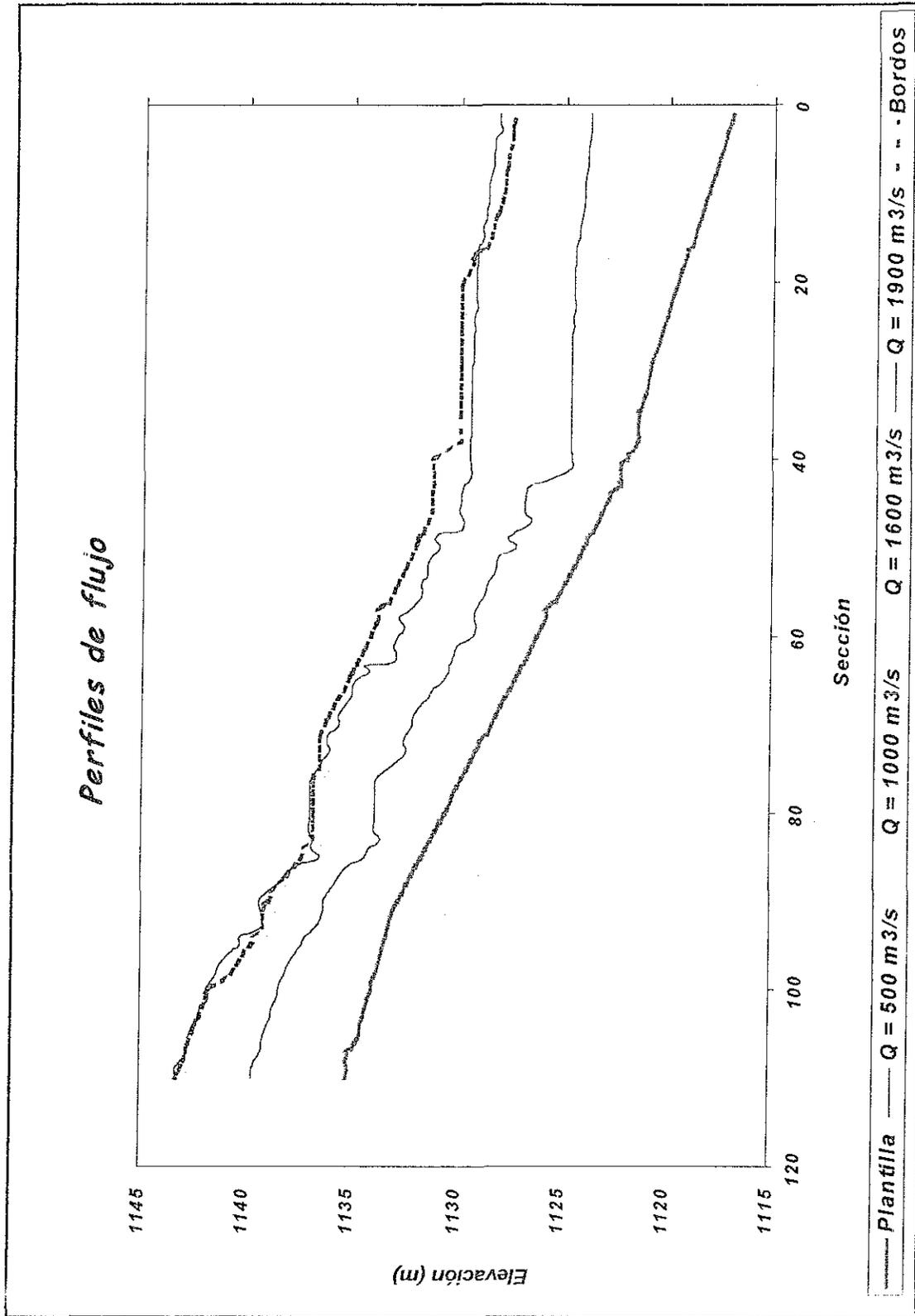


Fig. III.22 Perfiles de flujo obtenidos con el HEC-RAS

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

**Cálculo del flujo no permanente.**

Con base en el modelo matemático, explicado en este capítulo, se tiene un programa escrito en Fortran denominado RED-RIOS, el cual permite realizar el cálculo de flujo permanente y no permanente en redes de ríos complejas.

El modelo es útil para

Calcular los niveles del agua en una red de ríos a partir de gastos conocidos aguas arriba de la red en flujo permanente

Obtener el efecto de remanso provocado por variaciones de marea

Transitar avenidas por una red a partir de hidrogramas conocidos aguas arriba y mareas aguas abajo.

Estimar el efecto de una obra en la distribución de gastos y en los niveles del agua en los ríos cercanos.

Estudiar el efecto en una red de cierta política de operación si existen presas aguas arriba.

Calcular el flujo en las planicies de inundación, así como los niveles de agua en las mismas

**Datos:**

- 1 - Se requiere definir la topología del río; esto implica numerar los nudos conectores y los ríos.  
En el caso que nos ocupa, se trata de un solo tramo con 110 secciones, numeradas de aguas arriba hacia aguas abajo separadas una distancia de 200 m aproximadamente
- 2 - Definir el hidrograma de entrada en el río aguas arriba, se consideró el hidrograma obtenido anteriormente correspondiente a un periodo de retorno de 100 años
- 3 - Establecer el valor de la cota del agua constante en la última sección del tramo Dato proporcionado por la gerencia regional de Torreón, Coahuila.
- 4 - Establecer la cota del fondo de río, incluida dentro de la geometría del río Nazas
- 5 - Definir el coeficiente de rugosidad de Manning Se considero de 0.030
- 6 - Definir la cota del agua y su velocidad, si no se conocen son obtenidos en la fase de calentamiento del programa, en nuestro caso se inició el cálculo con los resultados obtenidos a través del HEC RAS
- 7 - Para la llanura de inundación, se requiere definir la malla de la planicie Se consideraron rectángulos de 4 km de largo por 2 km de ancho

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

8 - Para cada elemento de la malla, son requeridos los siguientes datos:

*h* Cota del fondo. De acuerdo con la tabla III.9

| Tramo. | Elevación. (m) |
|--------|----------------|
| 1, 7   | 1135.1         |
| 2, 8   | 1134.0         |
| 3, 9   | 1130.0         |
| 4, 10  | 1126.0         |
| 5, 11  | 1124.0         |
| 6, 12  | 1123.0         |

Tabla III.9

Cota del bordo Aparece en la información de las secciones transversales del río

Coefficiente de rugosidad de Chezy ( $C = 30$ )

Área en planta de la superficie de la malla. ( $A = 8 \text{ km}^2$ )

### Resultados:

Se realizó el cálculo de flujo permanente y no permanente. Con el programa se obtienen la cota de la superficie libre del agua, la velocidad, el área transversal y el gasto para cada tramo.

De forma preliminar se realizó una corrida en flujo permanente hasta lograr que la condición de gastos en el tramo fuera estable, para generar así el archivo de inicio para el tránsito de avenida y la determinación de las llanuras de inundación.

Se transitó la avenida, considerando el caso en que se tuviera una mayor duración, esto es, se transitó la avenida considerando el gasto pico como gasto base con una duración de 35 h, obtenida con base en la información del hidrograma de entrada.

Con el fin de mostrar los resultados obtenidos se presentan en las tablas III.10 a III.15, con algunos de los resultados a flujo permanente y transitorio para las horas 7, 14, 21, 28 y 35.

Su representación gráfica aparece en la figura III.23.



Tabla III.10 Flujo permanente  $Q = 1900 \text{ m}^3/\text{s}$ 

| Sección | Elev. Sup. Agua<br>(m) | Area<br>(m <sup>2</sup> ) | Velocidad<br>(m/s) |
|---------|------------------------|---------------------------|--------------------|
| 1       | 1143.097               | 620.2                     | 2.458              |
| 9       | 1142.003               | 755.1                     | 2.676              |
| 19      | 1139.313               | 664.9                     | 2.473              |
| 29      | 1136.636               | 1468.1                    | 1.192              |
| 39      | 1135.645               | 1043.4                    | 1.861              |
| 49      | 1132.551               | 451.7                     | 3.223              |
| 59      | 1130.754               | 851.3                     | 2.565              |
| 69      | 1129.481               | 1796.7                    | 1.05               |
| 79      | 1129.39                | 2998.3                    | 0.597              |
| 89      | 1129.305               | 2502.4                    | 0.676              |
| 99      | 1128.819               | 987.2                     | 1.862              |
| 109     | 1128.235               | 1104.6                    | 1.725              |

Tabla III.11  $t = 7h$   $Q = 1900 \text{ m}^3/\text{s}$ 

| Sección | Elev. Sup. Agua<br>(m) | Area<br>(m <sup>2</sup> ) | Velocidad<br>(m/s) |
|---------|------------------------|---------------------------|--------------------|
| 1       | 1142.887               | 604.3                     | 2.523              |
| 9       | 1141.587               | 720.7                     | 2.894              |
| 19      | 1138.537               | 559                       | 2.233              |
| 29      | 1135.998               | 1309.4                    | 1.145              |
| 39      | 1134.898               | 861.8                     | 1.749              |
| 49      | 1132.053               | 383.1                     | 2.916              |
| 59      | 1130.303               | 756.5                     | 2.373              |
| 69      | 1128.84                | 1578.8                    | 0.946              |
| 79      | 1128.758               | 2771.4                    | 0.523              |
| 89      | 1128.675               | 2343.4                    | 0.588              |
| 99      | 1128.388               | 939.9                     | 1.35               |
| 109     | 1128.209               | 1101.3                    | 0.924              |

Tabla III.12  $t = 14h$   $Q = 1900 \text{ m}^3/\text{s}$ 

| Sección | Elev. Sup. Agua<br>(m) | Area<br>(m <sup>2</sup> ) | Velocidad<br>(m/s) |
|---------|------------------------|---------------------------|--------------------|
| 1       | 1142.889               | 604.5                     | 2.523              |
| 9       | 1141.591               | 721                       | 2.894              |
| 19      | 1138.542               | 559.7                     | 2.233              |
| 29      | 1136.006               | 1310.5                    | 1.145              |
| 39      | 1134.906               | 864                       | 1.75               |
| 49      | 1132.059               | 384                       | 2.92               |
| 59      | 1130.311               | 758.4                     | 2.372              |
| 69      | 1128.868               | 1589.7                    | 0.942              |
| 79      | 1128.792               | 2783.3                    | 0.52               |
| 89      | 1128.709               | 2351.8                    | 0.588              |
| 99      | 1128.413               | 941.9                     | 1.387              |
| 109     | 1128.211               | 1101.4                    | 0.978              |

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

| Tabla III.13 $t = 21h$ $Q = 1900 m^3/s$ |                        |                           |                    |
|---|------------------------|---------------------------|--------------------|
| Sección                                 | Elev. Sup. Agua<br>(m) | Area<br>(m <sup>2</sup> ) | Velocidad<br>(m/s) |
| 1                                       | 1142.89                | 604.6                     | 2.523              |
| 9                                       | 1141.591               | 720.9                     | 2.895              |
| 19                                      | 1138.541               | 559.8                     | 2.234              |
| 29                                      | 1136.008               | 1311.8                    | 1.147              |
| 39                                      | 1134.91                | 865                       | 1.751              |
| 49                                      | 1132.062               | 384.4                     | 2.921              |
| 59                                      | 1130.318               | 759.8                     | 2.369              |
| 69                                      | 1128.902               | 1600.7                    | 0.939              |
| 79                                      | 1128.825               | 2795.4                    | 0.519              |
| 89                                      | 1128.746               | 2360.5                    | 0.587              |
| 99                                      | 1128.44                | 944.5                     | 1.42               |
| 109                                     | 1128.212               | 1101.6                    | 1.036              |

| Tabla III.14 $t = 28 h$ $Q = 1900 m^3/s$ |                        |                           |                    |
|--|------------------------|---------------------------|--------------------|
| Sección                                  | Elev. Sup. Agua<br>(m) | Area<br>(m <sup>2</sup> ) | Velocidad<br>(m/s) |
| 1  | 1142.893               | 604.9                     | 2.522              |
| 9  | 1141.599               | 721.8                     | 2.89               |
| 19                                       | 1138.552               | 561.5                     | 2.237              |
| 29                                       | 1136.014               | 1313.3                    | 1.15               |
| 39                                       | 1134.916               | 866.7                     | 1.752              |
| 49                                       | 1132.065               | 385                       | 2.925              |
| 59                                       | 1130.309               | 758.3                     | 2.385              |
| 69                                       | 1128.821               | 1576                      | 0.962              |
| 79                                       | 1128.74                | 2766.5                    | 0.538              |
| 89                                       | 1128.667               | 2334.7                    | 0.605              |
| 99                                       | 1128.444               | 941.4                     | 1.183              |
| 109                                      | 1128.213               | 1101.8                    | 1.094              |

| Tabla III.15 $t = 35 h$ $Q = 1900 m^3/s$ |                        |                           |                    |
|--|------------------------|---------------------------|--------------------|
| Sección                                  | Elev. Sup. Agua<br>(m) | Area<br>(m <sup>2</sup> ) | Velocidad<br>(m/s) |
| 1  | 1142.892               | 604.9                     | 2.522              |
| 9  | 1141.599               | 721.7                     | 2.891              |
| 19                                       | 1138.551               | 561.2                     | 2.238              |
| 29                                       | 1136.016               | 1313.3                    | 1.147              |
| 39                                       | 1134.918               | 867                       | 1.752              |
| 49                                       | 1132.068               | 385.4                     | 2.924              |
| 59                                       | 1130.325               | 761.3                     | 2.371              |
| 69                                       | 1128.917               | 1605                      | 0.938              |
| 79                                       | 1128.839               | 2799.8                    | 0.52               |
| 89                                       | 1128.772               | 2360.5                    | 0.58               |
| 99                                       | 1128.526               | 951.4                     | 1.254              |
| 109                                      | 1128.219               | 1102.4                    | 1.275              |

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

*Perfiles de flujo permanente y transitorio*



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

A continuación se presenta la Fig III 24 que incluye la división en planta de los 12 tramos considerados como planicies de inundación, de 8 km<sup>2</sup> de superficie cada uno, a lo largo del tramo de estudio.

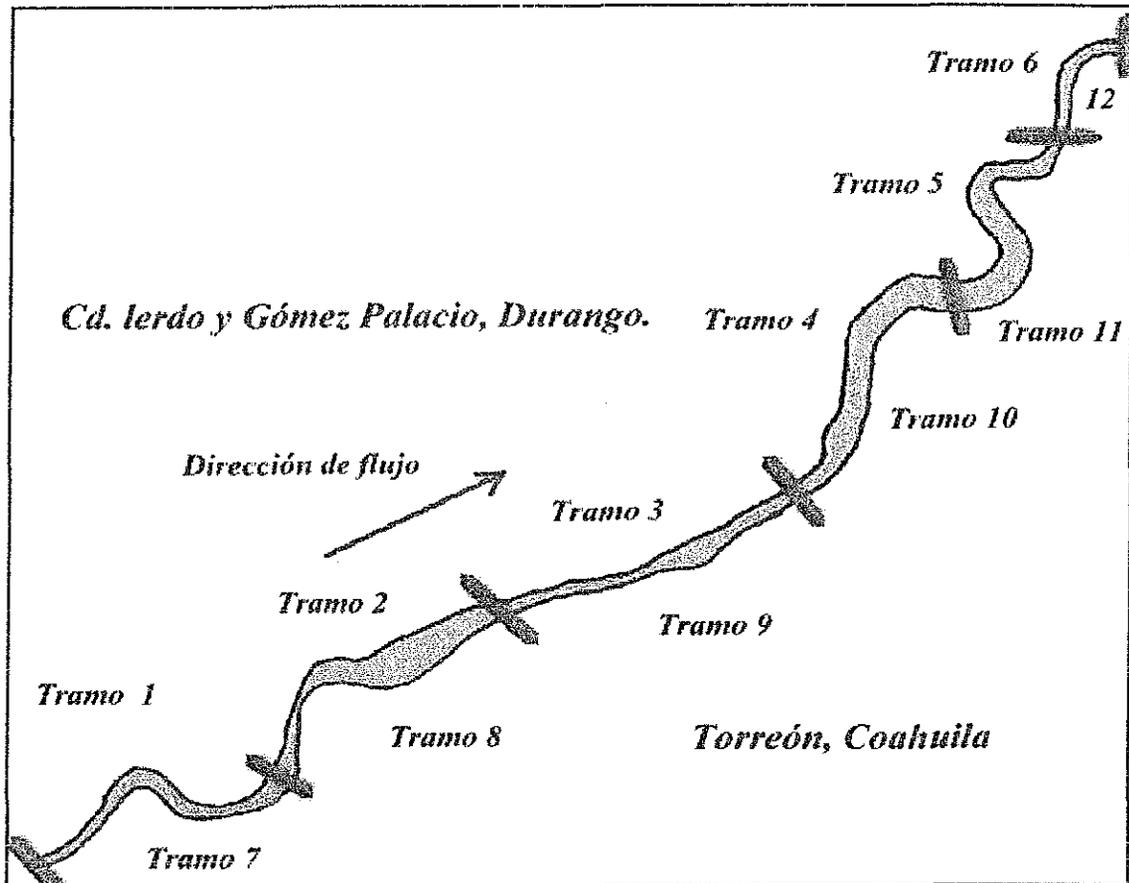


Fig. III 24 División en planta de los 12 tramos.

Se consideró que todas las planicies al inicio de la simulación no contenían agua, además de suponer la cota del terreno al centro de la malla.

Las tablas III.16 al III.21, presentan los resúmenes de áreas de inundación para los tiempos de 1, 7, 14, 21, 28 y 35 horas, y cada una de estas tablas incluye el número de tramo, tirante y gasto de inundación.

Su representación gráfica se muestra en las figuras III.24, III.25, III.26 y III.27. Estas figuras presentan las planicies de inundación que se generan a lo largo del tiempo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

| Tabla III.16 $t = 1 \text{ h}$ |                  |                |                              |
|--------------------------------|------------------|----------------|------------------------------|
| Tramo                          | Elevación<br>(m) | Tirante<br>(m) | Gasto<br>(m <sup>3</sup> /s) |
| 1                              | 1135.1           | 0.1            | 310.71                       |
| 2                              | 1134.04          | 0.038          | 0                            |
| 3                              | 1130.01          | 0.007          | 0                            |
| 4                              | 1126             | 0              | 0                            |
| 5                              | 1124             | 0              | 0                            |
| 6                              | 1123.01          | 0.011          | 11.52                        |
| 7                              | 1135.03          | 0.035          | 0                            |
| 8                              | 1134.02          | 0.024          | 0                            |
| 9                              | 1130             | 0.005          | 0                            |
| 10                             | 1126             | 0              | 0                            |
| 11                             | 1124.28          | 0.278          | 499.09                       |
| 12                             | 1123.28          | 0.283          | 315.32                       |

| Tabla III.17 $t = 7 \text{ h}$ |                  |                |                              |
|--------------------------------|------------------|----------------|------------------------------|
| Tramo                          | Elevación<br>(m) | Tirante<br>(m) | Gasto<br>(m <sup>3</sup> /s) |
| 1                              | 1135.1           | 0.504          | 404.53                       |
| 2                              | 1134.04          | 0.25           | 0                            |
| 3                              | 1130.01          | 0.114          | 0                            |
| 4                              | 1126             | 0.02           | 0                            |
| 5                              | 1124             | 0              | 0                            |
| 6                              | 1123.01          | 0.068          | 10.73                        |
| 7                              | 1135.03          | 0.149          | 369.35                       |
| 8                              | 1134.02          | 0.055          | 0                            |
| 9                              | 1130             | 0.02           | 0                            |
| 10                             | 1126             | 0              | 0                            |
| 11                             | 1124.28          | 1.03           | 419.54                       |
| 12                             | 1123.28          | 2.033          | 288.4                        |

| Tabla III.18 $t = 14 \text{ h}$ |                  |                |                              |
|---------------------------------|------------------|----------------|------------------------------|
| Tramo                           | Elevación<br>(m) | Tirante<br>(m) | Gasto<br>(m <sup>3</sup> /s) |
| 1                               | 1135.1           | 0.545          | 401.62                       |
| 2                               | 1134.04          | 0.26           | 0                            |
| 3                               | 1130.01          | 0.232          | 0                            |
| 4                               | 1126             | 0.432          | 0                            |
| 5                               | 1124             | 0.405          | 0                            |
| 6                               | 1123.01          | 0.137          | 11.01                        |
| 7                               | 1135.03          | 0.217          | 366.04                       |
| 8                               | 1134.02          | 0.102          | 0                            |
| 9                               | 1130             | 0.08           | 0                            |
| 10                              | 1126             | 0.171          | 0                            |
| 11                              | 1124.28          | 2.194          | 358.2                        |
| 12                              | 1123.28          | 3.192          | 266.09                       |

| Tabla III.19 $t = 21$ h |                  |                |                              |
|-------------------------|------------------|----------------|------------------------------|
| Tramo                   | Elevación<br>(m) | Tirante<br>(m) | Gasto<br>(m <sup>3</sup> /s) |
| 1                       | 1135.1           | 0.547          | 401.64                       |
| 2                       | 1134.04          | 0.175          | 0                            |
| 3                       | 1130.01          | 0.537          | 0                            |
| 4                       | 1126             | 0.002          | 0                            |
| 5                       | 1124             | 1.002          | 0                            |
| 6                       | 1123.01          | 1.623          | 11.41                        |
| 7                       | 1135.03          | 0.233          | 365.45                       |
| 8                       | 1134.02          | 0.211          | 0                            |
| 9                       | 1130             | 0.002          | 0                            |
| 10                      | 1126             | 1.25           | 0                            |
| 11                      | 1124.28          | 3.25           | 304.97                       |
| 12                      | 1123.28          | 4.246          | 235.08                       |

| Tabla III.20 $t = 28$ h |                  |                |                              |
|-------------------------|------------------|----------------|------------------------------|
| Tramo                   | Elevación<br>(m) | Tirante<br>(m) | Gasto<br>(m <sup>3</sup> /s) |
| 1                       | 1135.1           | 0.69           | 391.92                       |
| 2                       | 1134.04          | 0.014          | 0                            |
| 3                       | 1130.01          | 0.511          | 0                            |
| 4                       | 1126             | 0.01           | 0                            |
| 5                       | 1124             | 1.639          | 0                            |
| 6                       | 1123.01          | 2.643          | 3.26                         |
| 7                       | 1135.03          | 0.21           | 367.16                       |
| 8                       | 1134.02          | 0.271          | 0                            |
| 9                       | 1130             | 0.003          | 0                            |
| 10                      | 1126             | 2.765          | 0                            |
| 11                      | 1124.28          | 4.776          | 444.72                       |
| 12                      | 1123.28          | 5.775          | 0                            |

| Tabla III.21 $t = 35$ h |                  |                |                              |
|-------------------------|------------------|----------------|------------------------------|
| Tramo                   | Elevación<br>(m) | Tirante<br>(m) | Gasto<br>(m <sup>3</sup> /s) |
| 1                       | 1135.1           | 0.682          | 392.33                       |
| 2                       | 1134.04          | 0.099          | 0                            |
| 3                       | 1130.01          | 0.412          | 0                            |
| 4                       | 1126             | 0.221          | 0                            |
| 5                       | 1124             | 2.197          | 0                            |
| 6                       | 1123.01          | 3.196          | 6.8                          |
| 7                       | 1135.03          | 0.19           | 368.04                       |
| 8                       | 1134.02          | 0.278          | 0                            |
| 9                       | 1130             | 0.004          | 0                            |
| 10                      | 1126             | 3.952          | 0                            |
| 11                      | 1124.28          | 5.956          | 301.57                       |
| 12                      | 1123.28          | 6.956          | 0                            |

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

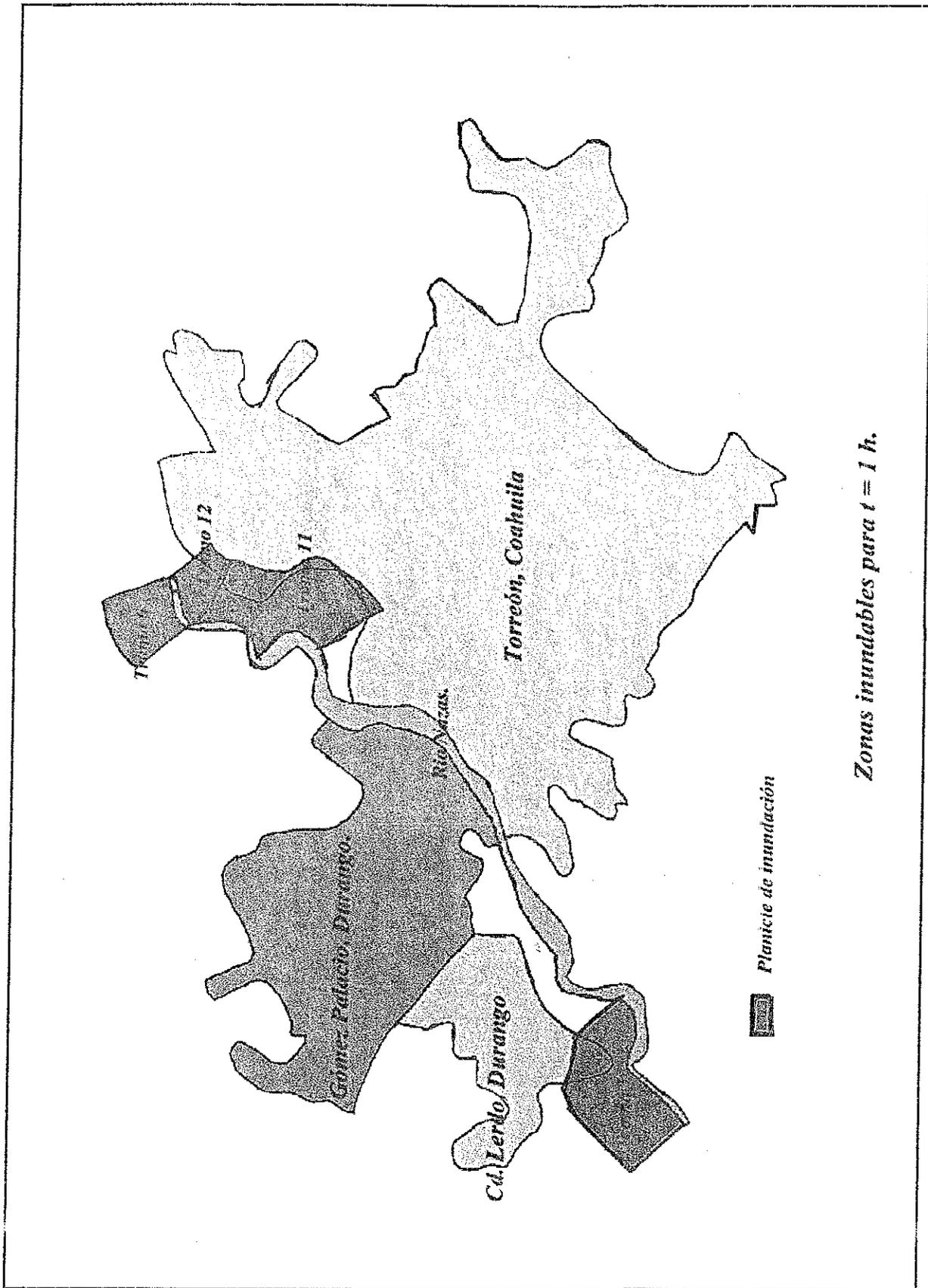
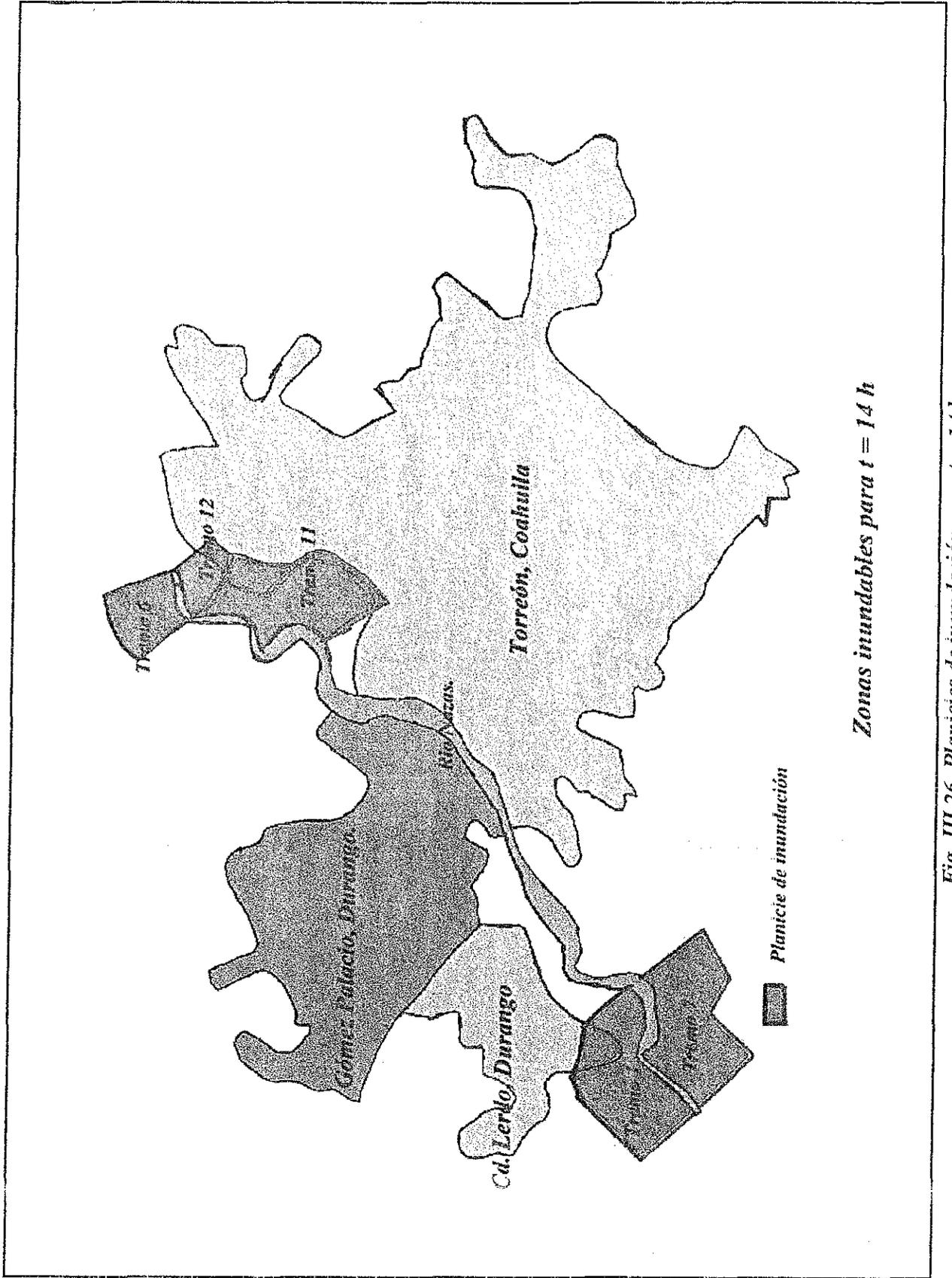


Fig. III.25 Planicies de inundación para  $t = 1$  hora.



Zonas inundables para  $t = 14$  h

Fig. III.26 Planicies de inundación para  $t = 14$  horas.

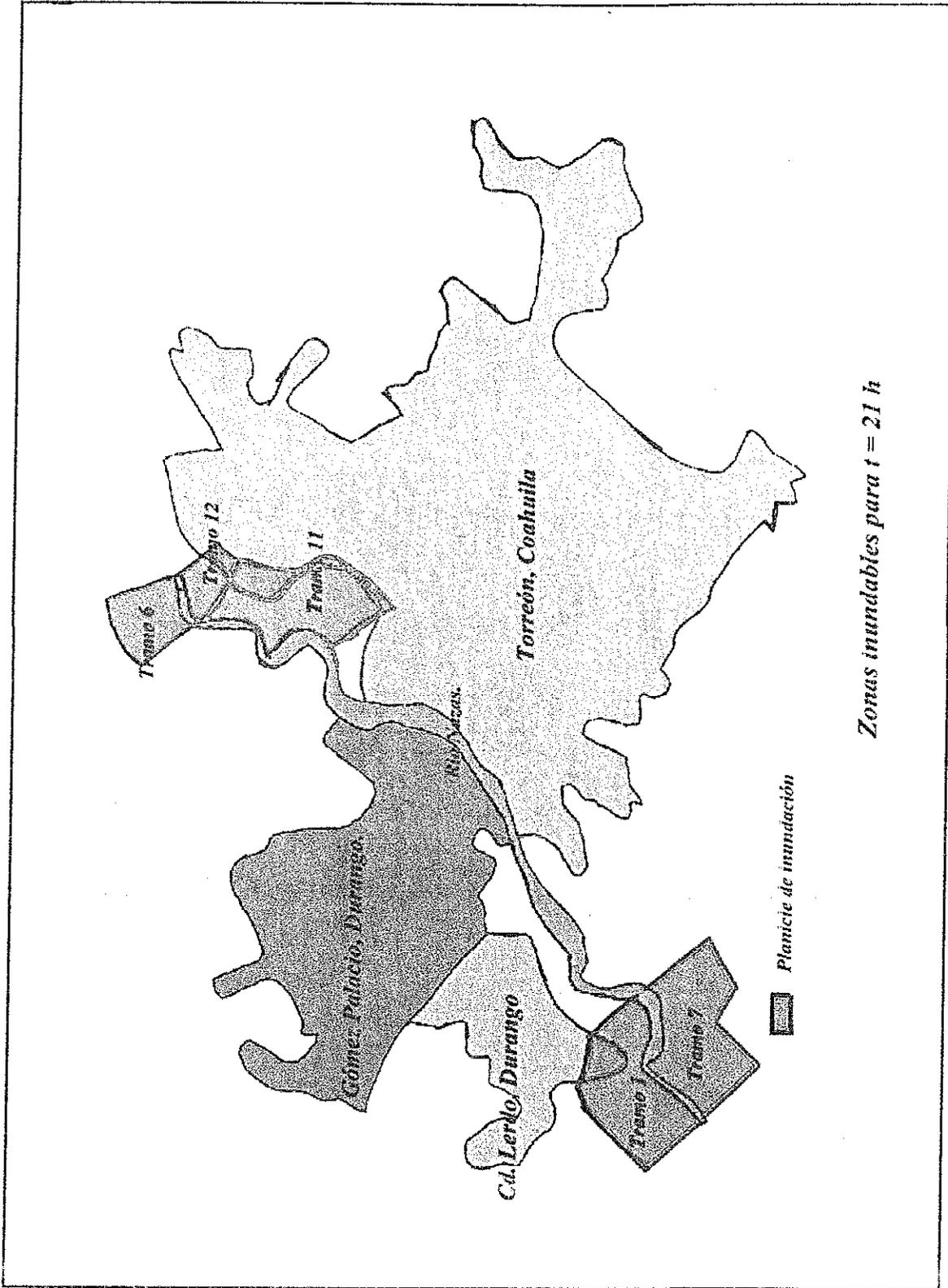
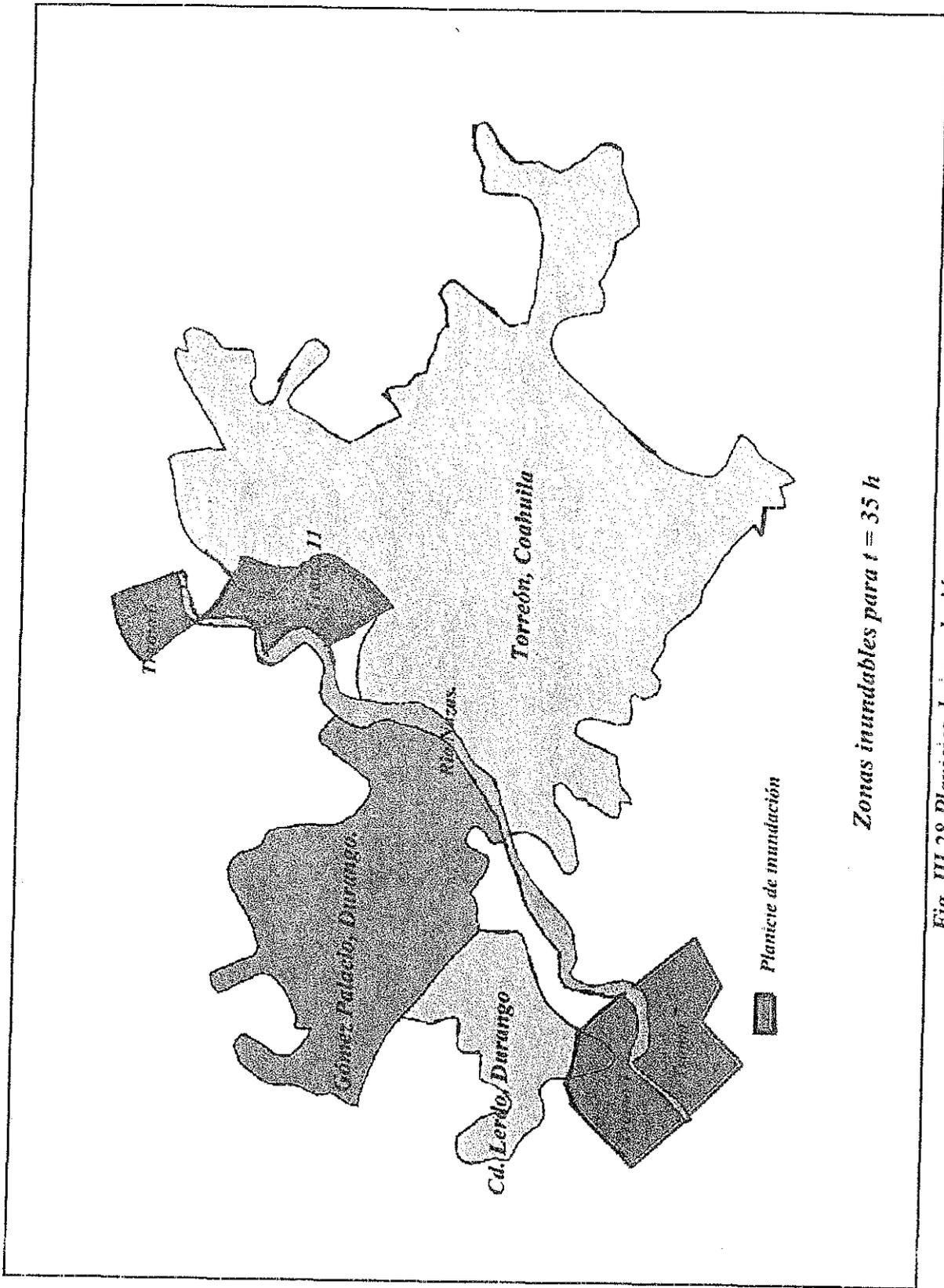


Fig. III.27 Planicies de inundación para  $t = 21$  horas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Zonas inundables para  $t = 35$  h

Fig. III.28 Planicies de inundación para  $t = 35$  horas.

*De estos resultados se puede concluir que de acuerdo con los bordos de protección con los que cuenta la zona urbana de la Comarca Lagunera, para un periodo de retorno de 100 años, se tienen inundaciones al principio y al final del tramo de estudio, significando entonces, que la mayor superficie urbana está fuera de peligro por inundación, no así la zona parcelaria e industrial ubicada en las zonas inundables.*

*Cabe mencionar que los desbordamientos se presentaron básicamente por las secciones 15, 18, 95 y 105.*

*El análisis cuantitativo de peligro, vulnerabilidad y riesgo, será presentado en el tema V de esta tesis*

## CAPITULO IV

### PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

#### IV.1. DEFINICIÓN DE PERCEPCIÓN REMOTA.

La Percepción Remota es una técnica de carácter multidisciplinario que consiste en la extracción de información acerca de una superficie (física o virtual) empleando un mecanismo de transporte de energía (electromagnética o acústica, por ejemplo) y un arreglo de sensores remotos, los cuales generan datos de dicha superficie en forma de una imagen multiespectral (Lira, 1987)

En esta definición, la extracción de información implica una manipulación y análisis de datos, requiriéndose para esto modelarlos matemáticamente y aplicarles algunas transformaciones necesarias

Para aplicar la percepción remota, es indispensable contar con un arreglo de sensores remotos y una electrónica digital asociada, con el fin de medir a distancia, la cantidad de energía, por unidad de ángulo sólido y por unidad de tiempo, que proviene de un conjunto de elementos de superficie, llamados Campos Instantáneos de Vista (CIV) y que se encuentran generalmente arreglados en un espacio regular sobre la superficie mencionada (Fig IV.1).

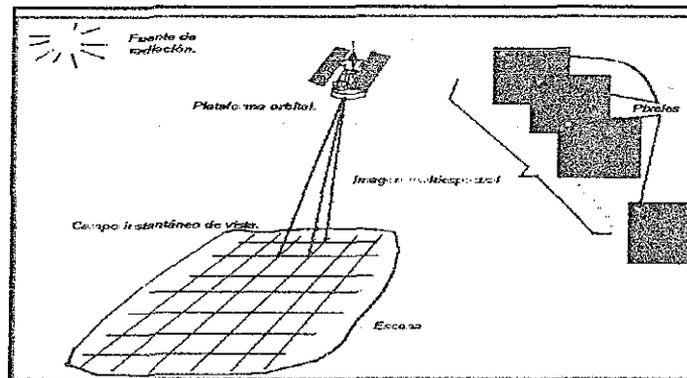


Fig. IV.1. Esquema de la generación de una imagen digital multiespectral.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

o varios intervalos de energía para CIV. Esto significa que a cada CIV se le asocia un conjunto de datos, uno para cada intervalo de energía, los que arreglados en forma vectorial constituyen un pixel de la imagen digital.

Un CIV es un elemento físico de la superficie y un pixel es un elemento lógico de la imagen. Los pixeles se arreglan con la misma estructura que los CIV's formando de esta manera la imagen digital de la superficie en cuestión. Dado que los pixeles son vectores de tantas dimensiones como intervalos de energías se hayan considerado, la imagen resultante es por tanto un campo vectorial o campo aleatorio.

Un pixel de la imagen digital representa la respuesta espectral del CIV correspondiente a las longitudes de onda empleadas, debido a esto, la imagen resultante tiene carácter multispectral.

En resumen, un sistema de teledetección espacial, incluye los siguientes elementos:

- a) Fuente de energía, que supone el origen del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por éste (teledetección activa). La fuente de energía más importante es la energía solar.
- b) Cubierta terrestre, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de a), y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.
- c) Sistema sensor, compuesto por el sensor, propiamente dicho y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
- d) Sistema de recepción-comercialización, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado y, tras las oportunas correcciones se distribuye a los intérpretes.
- e) Intérprete, que analiza esa información -normalmente en forma de imágenes analógicas o digitales-, convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema en estudio.
- f) Usuario final, encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## IV.2 FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN REMOTA.

Se definió la teledetección como aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación remota sea posible, es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción.

Los tres principales elementos de cualquier sistema de teledetección son: sensor, objeto observado y flujo energético que permite poner a ambos en relación, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto son: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión. En cualquiera de estos casos, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética.

### **El Espectro electromagnético**

A la gama de frecuencias que el ser humano ha sido capaz de generar, conocer por sus efectos o deducir por sus observaciones científicas relacionadas con la energía electromagnética, se le denomina espectro electromagnético.

El espectro electromagnético es un arreglo continuo de radiaciones, ordenado en función de la longitud de onda o frecuencia, dividido en segmentos o bandas principiando teóricamente en los cero Hertz para terminar indefinidamente.

No existen instrumentos o mecanismos que puedan detectar la emisión de energía a lo largo de todo el espectro, razón por la cual éste ha sido dividido en varias regiones espectrales. La subdivisión es arbitraria y ha sido producida por los medios actualmente disponibles para la generación y detección de la energía.

La figura IV 2 representa esquemáticamente el espectro electromagnético, con: a) La subdivisión en regiones, con indicación de longitud de onda y frecuencia y b) El tipo de sensor empleado corrientemente para cada banda.

### **Bandas del espectro electromagnético.**

**Ultravioleta.** De las cuatro regiones de la banda ultravioleta solo las dos primeras se utilizan en percepción remota, pues las longitudes de onda de las otras dos no atraviesan la atmósfera terrestre. El ultravioleta cercano (0.40 - 0.315  $\mu$ m) y el ultravioleta medio (0.315 - 0.28  $\mu$ m).

**Visible.** Se han desarrollado sensores para esta banda como cámaras fotográficas, sistemas de televisión, etc. (0.40 - 0.70  $\mu$ m).

**Infrarrojo.** Se extiende de 0.70 a 1.0  $\mu$ m, en general se divide en 3 bandas: Infrarrojo

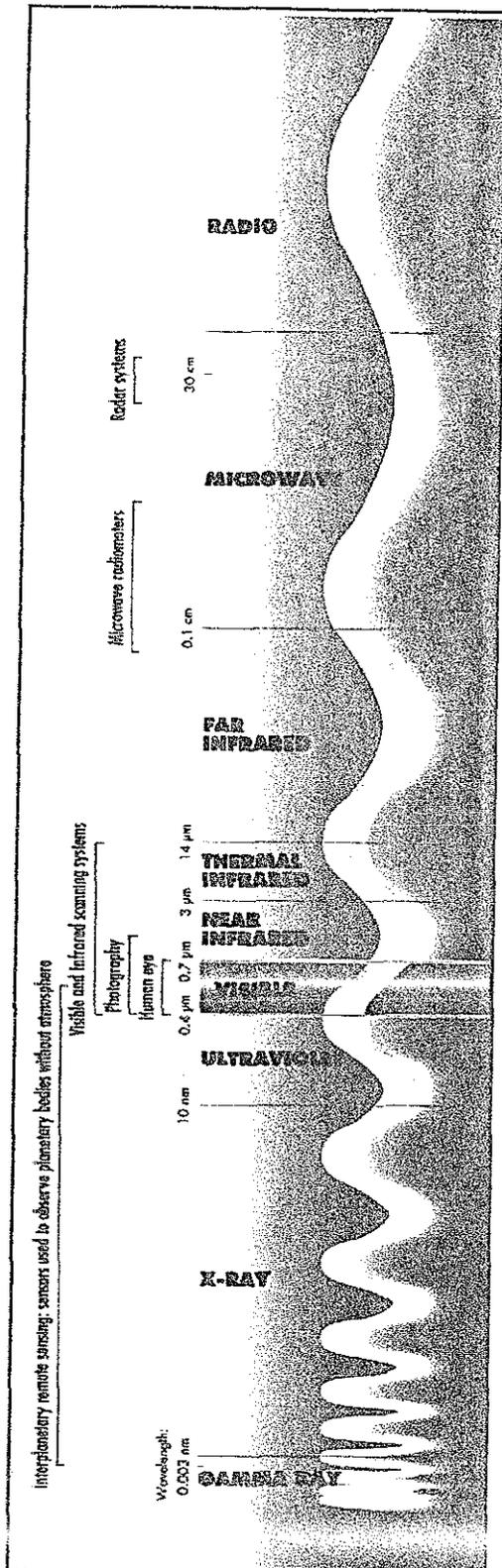


Fig. IV.2. Espectro electromagnético.

cercano, Infrarrojo medio e Infrarrojo lejano

**Frecuencia extremadamente alta.** (30 - 300 GHz) (0.1 - 1 cm.) corresponde a una transición entre microondas y radiación infrarroja. Los sensores desarrollados son algunos sistemas de radar y radiómetros.

**Microondas.** (0.3 - 300 cm). En esta banda de frecuencia super alta se ha desarrollado el radar para detección de objetos o formación de imágenes, radiómetros y espectrómetros.

**Frecuencia ultra alta.** (300 MHz - 33 GHz) Los sensores de este grupo son casi independientes a las condiciones atmosféricas, además pueden ser utilizados en el día y la noche.

**Frecuencias muy altas.** (30 - 300 MHz). Su frecuencia permite el empleo de una antena pequeña fácil de transportar en cualquier avión o vehículo espacial.

**Frecuencias bajas, medias y altas.** (30 KHz - 30 MHz) El empleo de esta banda del espectro electromagnético se ha vinculado tradicionalmente en el campo de las comunicaciones.

#### IV.3. SISTEMAS ESPACIALES DE TELEDETECCION.

Como ya se indicó anteriormente, un sistema de teledetección requiere al menos tres componentes: foco energético, superficie terrestre y sensor. Este último se explicará en el siguiente tema, con sus características y la plataforma que lo sustenta.

##### Sensor remoto.

Sensor remoto es un instrumento, órgano o sistema que detecta a distancia alguna propiedad de un objeto o fenómeno midiendo algún tipo de radiación o emanación proveniente de él.



## Clasificación de sensores remotos.

Los criterios frecuentemente empleados en los sistemas de clasificación de los sensores remotos son cinco

- 1) **La banda del espectro electromagnético utilizado.** Se explicó en el subtema anterior.
- 2) **Según la fuerza emisora.** Su clasificación presenta dos grupos, basándose en la independencia o no, de la fuente emisora de energía del sistema de percepción remota. Los primeros son los sensores pasivos que son los que reciben la energía emitida por otra fuente, generalmente la energía del sol, que es reflejada por los objetos, y los segundos, los sensores activos que poseen la fuente de energía como el radar. Estos emiten la energía electromagnética en dirección del objeto y luego detectan la energía reflejada.
- 3) **Según la ubicación de la fuente emisora y receptora.** Basándose en la posición relativa de la fuente emisora de energía y la fuente receptora de la misma se clasifican en dos grupos:  
**sensores mono-estáticos** Cuando emite y recibe la energía reflejada por el objeto desde la misma posición en el espacio. Pertenece a este grupo el radar. Y los **Sensores bi-estáticos** Cuando la fuente emisora tiene una posición en el espacio diferente a la ocupada por la fuente receptora; como sucede con las imágenes fotográficas.
- 4) **Según la información registrada:**  
**Sensores fotográficos.** Cuando la información en el momento de ser recibida es registrada en su totalidad sobre una emulsión fotográfica. En este grupo están las cámaras aéreas y los multiespectrales.  
**Sensores no fotográficos** Cuando la información recibida es proyectada sobre una pantalla o es registrada en forma gráfica en perfiles o en forma digital en cintas magnéticas.  
Los que registran la información en forma digital se subdividen en radiómetros y espectrómetros.
- 5) **Según el mecanismo utilizado para captar información.** Se clasifican en cuatro grupos así:  
**Sensores fotográficos.** Se encuentran en este grupo todos los tipos de cámaras y películas (métricas, panorámicas y multibanda).  
**Sensores electro-ópticos formadores de imagen** Con base en los sistemas utilizados para captar información, se pueden clasificar en tres categorías: de formato o cuadro, barredores estáticos o de arreglo lineal y barredores mecánicos.  
**Sensores electro-ópticos no formadores de imagen** Este tipo de sensores, se caracteriza porque no forman imagen, a partir de la información captada, sino que producen curvas, grupos de números o números simples, que caracterizan la energía electromagnética emitida (desde el objeto, reflejada por el objeto) y/o transmitida a través de una superficie o región del espacio.



La aplicación de estos sensores es la medición de cantidades ópticas tales como flujo radiante, densidad de flujo radiante, radiancia, las cuales describen la intensidad del campo de radiación o las propiedades ópticas de una superficie o región del espectro. Pertenecen a este grupo la gran variedad de radiómetros.

*Sensores de microondas*. Según su sistema de operación pueden ser sistemas activos o pasivos.

Los sistemas activos formadores de imagen son los radares de visión lateral SLAR.

Los sistemas de microondas no formadores de imágenes, pueden clasificarse en Dispersómetros y radiómetros de microondas.

### **Resolución de un sistema sensor**

De acuerdo con algunos autores, podemos definir la resolución de un sistema sensor como su habilidad para registrar, discriminando la información de detalle (Estes y Siminett, 1975). Los términos de la definición "discriminando" e "información de detalle" son relativos al propósito y al entorno geográfico del proyecto que se está abordando.

Por lo tanto, el concepto de resolución implica, al menos, cuatro manifestaciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

- 1) **Resolución espacial.** Este concepto designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. En un sistema fotográfico, suele medirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la fotografía. Se mide en unidades de longitud (mm en la foto, m sobre el terreno), y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie.
- 2) **Resolución espectral.** Indica el número y la anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. En este sentido, un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilite la caracterización espectral de las distintas cubiertas.
- 3) **Resolución radiométrica.** Hace mención a la sensibilidad del sensor, esto es, a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe en el caso de los sistemas fotográficos, la resolución radiométrica del sensor se indica por el número de niveles de gris recogido en el film. Para los óptico-electrónicos, la imagen habitualmente se presenta en formato digital, gracias a una conversión analógico-digital realizada a bordo del satélite. El número de valores que incluye ese rango -esto es, el número máximo de niveles digitales de la imagen-, suele identificarse con la resolución radiométrica del sensor.
- 4) **Resolución temporal.** Este concepto alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. Se refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de

la misma porción de la superficie terrestre.

Conviene aclarar que estos cuatro aspectos están íntimamente relacionados. A mayor resolución espacial, disminuye la temporal, y es previsible que se reduzca también la espectral y radiométrica.

#### IV.4 ASPECTOS TECNOLÓGICOS.

Los sensores remotos se instalan generalmente en plataformas orbitales, algunas con trayectorias polares y otras geoestacionarias. Los que tienen trayectorias polares se les conoce como Satélites de Percepción Remota y las otras como Satélites del Medio Ambiente (tablas IV 1 y IV 2). Debido a los avances tecnológicos logrados en la última década, las imágenes que generan estos satélites son de alta calidad, de amplia visión sinóptica, de muy buena resolución espacial, cubriendo la parte óptica y de microondas del espectro electromagnético y con una frecuencia de adquisición que va desde media hora hasta 16 días.

De acuerdo con los avances logrados se prevé que en la presente década, estos sensores alcancen resoluciones comparables con la fotografía aérea, con capacidad estereoscópica y un costo razonable. Actualmente el precio por kilómetro cuadrado de una imagen multiespectral, del Landsat por ejemplo, es inferior al de la fotografía aérea convencional. La imagen digital presenta varias ventajas con respecto a la fotografía como son, entre otras su carácter digital y multiespectral, que permite tener un registro permanente en computadora, tanto de los datos originales como de los transformados, rapidez de análisis, y facilidad para aplicar operaciones que no se pueden realizar en una fotografía convencional, tal como la descomposición en componentes principales.

Los sensores de tipo orbital viajan a velocidad bastante alta (6392 km/s aproximadamente para el Landsat 2), el tamaño de la imagen es de 185 x 185 km<sup>2</sup>, por lo que un cálculo muy sencillo permite ver que el tiempo de adquisición es de tan solo 28.9 s. Esto quiere decir que los detectores del sistema sensor deben funcionar a una eficiencia muy alta. En el Landsat 4 y 5 el tamaño del CIV es de 30 x 30 m<sup>2</sup> para 6 de las bandas y de 120 x 120 m<sup>2</sup> para la banda térmica, en total esto significa alrededor de 230 Mb de datos que se adquieren en menos de 30 segundos.

Los últimos satélites de percepción remota no traen grabadora a bordo, por lo que las medidas hechas por los sensores deben ser enviadas a una estación receptora a la misma velocidad que son adquiridos; cuando no se encuentra una estación cercana el envío de datos se hace a través de un satélite de enlace.

| Plataforma Dato.                  | Skylab                                    | Landsat 1,2   | Landsat 3   | Landsat 4,5  | Spot 1,2   | Landsat 7  |
|-----------------------------------|---|---|---|--|--|--|
| Fecha de lanzamiento.             | Febrero 1973                              | Julio 1972<br>Enero 1975  | Marzo 1975  | Julio 1982<br>Marzo 1984   | Noviembre 1985   | abril 15 1999  |
| Altura promedio sobre la Tierra   | 435 kms                                   | 920 kms   | 912 kms   | 700 kms  | 822 kms  | 705 kms  |
| Periodo de la órbita              | 93 min                                    | 103 min   | 103 min   | 90 min   | 101 min  | 98 88 min  |
| Periodo de cobertura              | irregular                                 | 18 días   | 18 días   | 16 días  | 26 días  | 16 días  |
| Tamaño del elemento de resolución | variable y comparable a los Landsat 1 y 2 | 57 x 79 m <sup>2</sup>  | 57 x 79 m <sup>2</sup> y 238 x 238 m <sup>2</sup> para la 5a banda                | 30 x 30 m <sup>2</sup> y 120 x 120 m <sup>2</sup> para la 6a banda   | 20 x 20 m <sup>2</sup> y 10 x 10 m <sup>2</sup> para la 4a banda     | bandas 1-5 30x30 m <sup>2</sup> banda 6 60x60 m <sup>2</sup> banda 7 30x30 m <sup>2</sup>                                  |
| Tamaño de la imagen.              | variable                                  | 185 x 185 km <sup>2</sup>                                       | 185 x 185 km <sup>2</sup>   | 185 x 185 km <sup>2</sup>  | 60 x 60 km <sup>2</sup>  | 183 x 183  |
| Bandas espectrales                | 13 bandas espectrales entre 0.4 y 12.5 μm | 1) 0.5 - 0.6 μm<br>2) 0.6 - 0.7<br>3) 0.7 - 0.8<br>4) 0.8 - 1.1 | 1) 0.5 - 0.6 μm<br>2) 0.6 - 0.7<br>3) 0.7 - 0.8<br>4) 0.8 - 1.1<br>5) 10.4 - 12.6 | 1) 0.45 - 0.52<br>2) 0.52 - 0.60<br>3) 0.63 - 0.69<br>4) 0.76 - 0.90<br>5) 1.55 - 1.75<br>6) 10.4 - 12.5<br>7) 2.08 - 2.35 | 1) 0.50 - 0.59<br>2) 0.61 - 0.69<br>3) 0.70 - 0.90<br>4) 0.51 - 0.73 | 1) 0.45 - 0.52<br>2) 0.53 - 0.61<br>3) 0.63 - 0.69<br>4) 0.78 - 0.90<br>5) 1.55 - 1.75<br>6) 10.4 - 12.5<br>7) 2.08 - 2.35 |

Tabla IV.1 Principales satélites de percepción remota.

Es importante mencionar que algunos sistemas sensores similares a los satelitales han sido montados en plataformas aerotransportadas trayendo como consecuencia un incremento en la resolución espacial pero un decremento en el tamaño de la imagen resultante.

#### IV.5 BASES PARA LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES EN TELEDETECCIÓN ESPACIAL.

Existen dos métodos de análisis para abordar un estudio de teledetección espacial: digital o visual. El análisis visual emplea criterios de interpretación similares a la fotointerpretación clásica (tono, textura, tamaño, localización, etc.), por lo que no requiere un entrenamiento muy especializado. El tratamiento digital requiere mayor inversión económica y entrenamiento. Como contrapartida, proporciona mayor versatilidad, rapidez y exactitud. La



tabla siguiente muestra las ventajas e inconvenientes del análisis visual frente al digital en la interpretación de imágenes.

| Plataforma Dato.                  | Nimbus 7   | Goes 7  | NOAA 11  | Seasat                    | ERS-1                   |
|-----------------------------------|--|---|--|---------------------------|-------------------------|
| Fecha de lanzamiento.             | octubre 1978   | septiembre 1989   | diciembre 1989   | Junio 1979                | Mayo 1991               |
| Altura promedio sobre la Tierra   | 955 Kms  | 35773 Kms   | 854 Kms  | 790 Kms                   | 785 Kms                 |
| Período de la órbita              | 107 min  | 24 horas  | 102 min  | 100 min                   | 100 min                 |
| Período de cobertura              |  | 30 min  | 4 días   |                           | 3 días                  |
| Tamaño del elemento de resolución | 825 x 825 m <sup>2</sup>   | 900 x 900 m <sup>2</sup> para la 1a banda y 3 6 x 3 6 m <sup>2</sup> para la 2a. banda. | 0 5 x 0 5 m <sup>2</sup> para la 1a banda y 1 x 1 m <sup>2</sup> para las bandas 2-5   | 25 x 25 m <sup>2</sup>    | 30 x 30 m <sup>2</sup>  |
| Tamaño de la imagen.              | 1 566 x 1 566 Km <sup>2</sup>  | 18 x 20 Km <sup>2</sup>   | 2 94 x 2 94 km <sup>2</sup>  | 100 x 100 km <sup>2</sup> | 80 x 80 km <sup>2</sup> |
| Bandas espectrales                | 1) 0 43 - 0 45<br>2) 0 51 - 0 53<br>3) 0 54 - 0 56<br>4) 0 66 - 0 68<br>5) 0 70 - 0 80<br>6) 10 5 - 12 5 | 1) 0 45 - 0 7 um<br>2) 3 0 - 14 0   | 1) 0 58 - 0 68<br>2) 0 73 - 1 10<br>3) 3 55 - 3 93<br>4) 10 3 - 11 3<br>5) 11 5 - 12 5 | 25 cm<br>(banda L)        | 5 7 cm<br>(banda C)     |

Tabla IV.2. Principales satélites del medio ambiente y radar.

En resumen, en realidad ambos métodos de trabajo se complementan. El tratamiento digital permite realizar operaciones complejas, costosas o inaccesibles al análisis visual. Garantiza una clasificación más rápida de la zona de estudio, manteniendo una coherencia en la asignación de áreas vecinas a dos categorías. Por su parte, el análisis visual es una buena alternativa para actualizar cartografía existente o realizar inventarios a escalas medias.

### **Criterios visuales para la interpretación de imágenes.**

El análisis visual utiliza los elementos como son la textura, estructura, emplazamiento o disposición, sombras, contexto, etc.

| TRATAMIENTO VISUAL  | TRATAMIENTO DIGITAL  |
|---|--|
| <i>Escasa inversión inicial</i>   | <i>Inversión elevada</i>   |
| <i>Costos lineales</i>  | <i>Los costos se reducen con la superficie</i>                   |
| <i>Requiere conversión digital analógica</i>  | <i>Permite trabajar con información original</i>                 |
| <i>No precisa alta especialización</i>  | <i>Precisa alta especialización</i>                              |
| <i>Buena precisión en clases heterogéneas</i>   | <i>Baja precisión en clases heterogéneas</i>                     |
| <i>Restitución compleja</i>   | <i>Corrección geométrica sencilla y rápida</i>                   |
| <i>Inventario tedioso e inexacto</i>  | <i>Inventario inmediato</i>                                      |
| <i>Requiere digitalización para conectarse a un sistema de información geográfica</i> | <i>Conexión directa a los sistemas de información geográfica</i> |

*Tabla IV.3. Comparación entre tratamiento visual y digital.*

El tono, hace referencia a la cantidad de energía recibida por el sensor para una determinada banda del espectro. El color es fruto de la reflectividad selectiva de los objetos a distintas longitudes de onda. Aquellas superficies con alta reflectividad en longitudes de onda corta, y baja en el resto, aparecen con color azul, mientras ofrecen un tinte rojo se absorben las longitudes cortas y reflejan las largas. Nuestro ojo solo percibe las longitudes de onda comprendidas entre 0.4 y 0.7 micras, separando la energía recibida en tres componentes de acuerdo con la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras. Esos tres componentes son los denominados colores primarios: azul, verde y rojo. Entre las múltiples combinaciones de color que se han empleado en análisis visual, la más destacada sin duda es la denominada falso color o color infrarrojo.

La textura es una cualidad que se refiere a la aparente rugosidad de una región de la imagen. De esta forma en función del tamaño de los objetos se distinguen: textura gruesa, media y fina.

### **Elementos de análisis visual.**

Definidos los criterios sobre los que se basa la interpretación visual de imágenes, se presentan una serie de elementos a considerar para el análisis visual:

- 1.- Características geométricas de una imagen espacial. Significa que una imagen adquirida desde el espacio presenta menos errores que una fotografía aérea, como consecuencia de la mayor estabilidad y altura de vuelo de la plataforma.



- 2 - *Efecto de la resolución espacial en el análisis visual. Este concepto se relaciona tanto con el tamaño del pixel, como con la escala a la cual se represente la imagen*
- 3 - *Efecto de la resolución espectral. La posibilidad de observar un fenómeno con carácter multi-espectral resulta básico para su interpretación, ampliando notablemente nuestra capacidad de reconocerlo.*
- 4 - *Interpretación de composiciones en color. Resultará más sencillo interpretar combinaciones multi-banda a partir de la teoría del color.*
- 5 - *Ejercicios de análisis multi-temporal. Las aportaciones que ofrece el factor tiempo en un análisis visual puede abordarse con un doble objetivo: por un lado, la mejora en la interpretabilidad de la imagen; por otro, la detección de cambios.*

### **Tratamiento digital de imágenes.**

*En cualquier sistema fotográfico, la energía procedente se registra sobre una superficie sensible a la luz. Esta puede componerse de una o varias capas, formando, respectivamente, una película pancromática o en color.*

*El sensor explora secuencialmente la superficie terrestre adquiriendo a intervalos regulares la radiación que proviene de los objetos sobre ella situados. La cadencia con la que el sensor realiza ese muestreo de la superficie terrestre define la resolución espacial del mismo. Dicho en otras palabras, el sensor detecta la radiancia media de una parcela del terreno equivalente al tamaño del pixel, este valor medio se traduce por el sensor a un valor numérico, a partir del cual se realiza el tratamiento digital de imágenes. En consecuencia cada pixel de la imagen viene definida por un número entero, traducción de la radiancia recibida por el sensor para una determinada parcela de la superficie terrestre y en una determinada banda del espectro. Este valor numérico se denomina **Nivel Digital (ND)**.*

*En resumen, la unidad mínima de información en una imagen digital se denomina **Pixel**, definido por un número entero, ND, que puede convertirse en una intensidad luminosa o nivel de gris.*

*La organización de los datos en una imagen digital puede esquematizarse en la figura IV.3 que representa una matriz numérica de tres dimensiones. Las dos primeras corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen, mientras la tercera indica su dimensión espectral.*

*Cualquier tratamiento digital aplicado a las imágenes, requiere que estas sean, previamente introducidas en un sistema informático.*

*Una imagen digital es la caracterización numérica de la distribución de la energía radiante.*

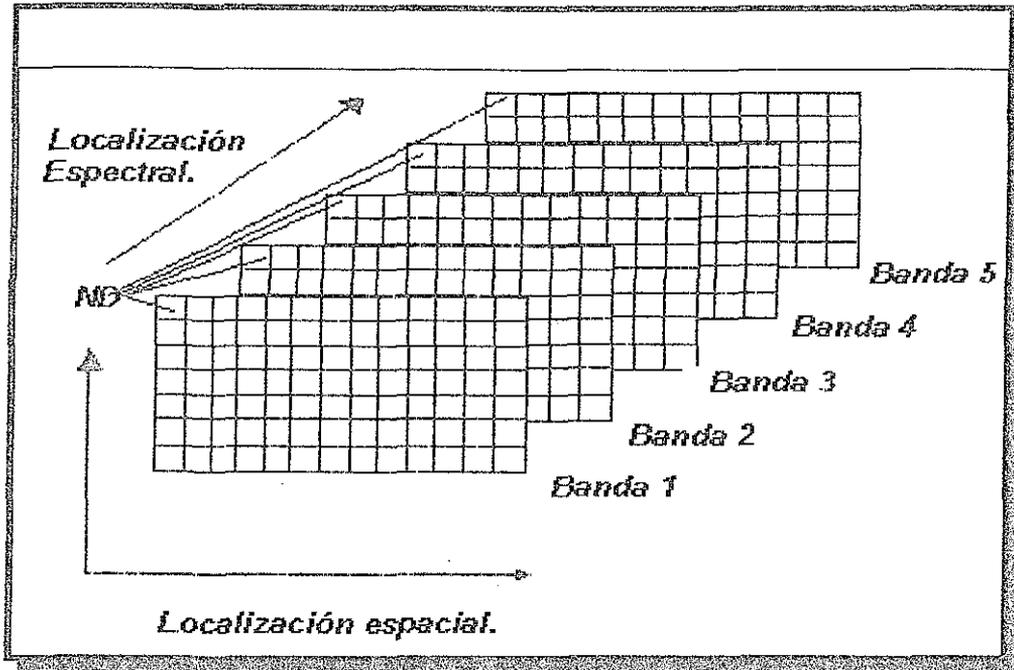


Fig. IV.3. Organización de una imagen digital.

que proviene de la escena bajo estudio. La extracción de información a partir de la imagen digital es vital para entender el comportamiento de la escena, de aquí que la percepción Remota está basada fundamentalmente en el procesamiento digital de imágenes.

Para procesar una imagen es necesario contar con un conjunto de transformaciones en forma de modelos matemáticos, diseñados para extraer información específica relativa a la escena de interés. A estas transformaciones generalmente se les conoce como preprocesamiento, cuya función primordial es corregir posibles errores en el proceso de generación y registro de la imagen. Una vez que a la imagen se le han aplicado los preprocesamientos necesarios se encuentra entonces lista para un análisis digital.

El análisis de imágenes se descompone básicamente en dos grandes grupos de transformaciones:

- a) Procesamiento Digital
- b) Reconocimiento de Patrones.

El procesamiento digital de imágenes se divide a su vez en tres grupos de transformaciones: Realces Globales, Realces Selectivos y Restauraciones.

En el primer grupo, la imagen se realza como un todo sin quitar ni añadir información.

En el segundo grupo, conocido como *filtrajes*, se realiza selectivamente una clase de patrones, generalmente a costa del resto de la información de la imagen.

En las restauraciones o realces de la fidelidad, se supone que la imagen ha sido degradada por algún mecanismo de degradación conocido

Una vez que los patrones de interés han sido realzados convenientemente es posible entonces emprender un procedimiento de reconocimiento de los mismos

El reconocimiento de patrones es básicamente un proceso de medida sobre las propiedades morfológicas y estadísticas de los objetos plasmados en la imagen. Por medio del reconocimiento de patrones espectrales es posible por tanto marcar en la escena objetos con propiedades espectrales similares, es entonces factible identificar diferentes tipos de vegetación, zonas urbanas, ríos y lagos

En el esquema anterior es posible apreciar que el fin último de la Percepción Remota es apoyar la modelación de un sistema físico, el cual puede ser una cuenca geológica, una zona urbana, un sistema hidrogeológico o una zona lagunar costera, entre otros

#### IV.6 CLASIFICACIÓN DIGITAL.

La clasificación es la fase culminante del tratamiento digital de imágenes. Este papel protagonista viene dado por la misma naturaleza de la teledetección espacial. Los ND adquiridos no tienen sentido en si mismos, sino en cuanto son interpretables, esto es, convertibles a categorías que supongan un mejor conocimiento del territorio.

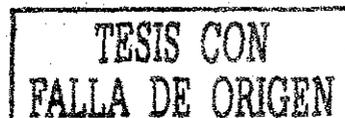
Se ha dividido los métodos de clasificación en dos grupos: supervisado y no supervisado, de acuerdo a como son obtenidas las estadísticas de entrenamiento.

El método supervisado parte de un conocimiento previo del terreno, a partir del cual se seleccionan las muestras para cada una de las categorías. Por su parte, el método no supervisado procede a una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la imagen.

El método no supervisado supone, en primer lugar, identificar sobre la fotografía aérea zonas homogéneas en cuanto a tonos, textura, disposición, etc., para luego asignarlas a una de las clases temáticas establecidas.

El método supervisado parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo.

En ambos casos, es necesario analizar los píxeles incluidos en cada grupo para obtener las medidas estadísticas elementales: media, desviación estándar, etc. que servirán para abordar la fase posterior de clasificación.



Una vez culminada la selección y estudio de las categorías que intervendrán en la clasificación, se inicia la fase siguiente, denominada de asignación, por cuanto se trata de adscribir cada uno de los pixels de la imagen a una de las clases previamente seleccionada. Esta asignación se realiza, en función de sus ND, para cada una de las bandas que intervienen en el proceso. Fruto de esta fase será una nueva imagen, cuyos ND representen la categoría en la cual se ha incluido cada uno de los pixels de la imagen original.

Los criterios más comunes para establecer estas fronteras estadísticas son:

- (i) *Mínima distancia, cuando el pixel se asigna a la clase más cercana*
- (ii) *Paralelepípedos, que permite señalar los umbrales de dispersión asociados a cada clase*
- (iii) *Máxima verosimilitud, en donde el pixel se asigna a aquella clase con la que posee mayor probabilidad de pertenencia*

#### **IV.7 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)**

Geomática es un concepto acuñado en Canadá, país líder en desarrollo de tecnologías de computación aplicadas a la Geografía, para definir un conjunto de disciplinas que unen sus fuerzas para impulsar una revolución tecnológica en una de las ciencias más antiguas. La Geografía.

La Geomática a su vez utiliza siglas y términos como GIS, GPS, Percepción Remota y muchos más.

Los Sistemas de Información Geográfica son el resultado natural de la evolución de la ciencias de la computación y la electrónica. Las máquinas personales de hoy pueden manejar con mayor comodidad los grandes volúmenes de datos asociados con la información geográfica.

Un SIG es un híbrido entre los sistemas de diseño asistidos por computadora y los productos tradicionales de bases de datos. El resultado es algo más que la suma de las partes. Un SIG permite trabajar con datos en su verdadero contexto espacial, proporcionando de forma cómoda información en una interfase con alto impacto visual y gran capacidad de síntesis informativa.

Las aplicaciones de los SIG incluyen todas aquellas en que se hace necesario manejar información que se encuentra distribuida en el espacio físico, el mundo en que vivimos. La relación estrecha que se establece entre los mapas digitales y la información asociada a los elementos gráficos que contienen éstos, da una dimensión al tratamiento de la información.

El desarrollo de la cartografía temática a nivel mundial, en el marco de los avances notables que han alcanzado las técnicas de computación y los sensores remotos, han producido que estas tres tecnologías se acerquen cada día mas para provocar su fusión con los SIG. Estos sistemas se han establecido como herramientas fundamentales en la toma de decisiones que involucran al espacio geográfico, tanto en los países de economía aplicada como en los de mercado.

Problemas tales como: determinar el cierre óptimo de un embalse, proponer el trazado menos costoso para una vía de comunicación, analizar el comportamiento espacial del nivel educativo o evaluar los territorios más propicios para cultivar tal o cual especie, constituyen las típicas interrogaciones a que son sometidos los SIG en su fase operacional.

Por lo que se puede decir que la tarea de un SIG va desde el inventario-monitoreo hasta el análisis espacial y modelado de la realidad.

La unión que se presenta en la actualidad entre los datos vectoriales tradicionales de los SIG con los datos en raster provenientes de los sensores remotos brindan

- a) Selección inteligente de datos.
- b) Asignación de símbolos
- c) Representación gráfica
- d) Posicionamiento de textos
- e) Evaluación en el monitor de diseños cartográficos
- f) Localización de puntos, escalas y colores

#### IV.7.1 APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN.

Las aplicaciones de la Percepción Remota son realmente vastas y cubren una amplia gama del conocimiento humano, entre los campos en los cuales esta ciencia ha tenido mayor aplicación, se cuentan

**Recursos vegetales** Manejo de pastos, detección y análisis del stress en la vegetación, análisis de cortes y reforestación en áreas cubiertas por vegetación, riesgos de erosión en zonas no explotadas.

**Recurso suelo** Estimación de la erosión en suelos, mapeo de la erosión, inventarios de suelos, mapeo de suelos, análisis de problemas específicos.

**Recurso agua.** Manejo de aguas, estudio del potencial del recurso agua, estudios de aguas cenagosas

**Geología.** Prospecciones mineras Exploración petrolera. Análisis de estructuras Estudios de estabilidad de materiales Estudio de potenciales geotérmicos.

**Agricultura.** *Inventario del uso agrícola del suelo. Detección y manejo de problemas de suelo, irrigación, drenaje. Detección de problemas en los cultivos. Inventarios de cultivos. Evaluación de la producción agropecuaria.*

**Urbanismo.** *Sectorización urbana. Planificación del uso de la tierra. Detección de la polución en áreas industriales. Estudios catastrales. Proyección de obras. Análisis de la evolución en población. Determinación de la incidencia de los planes de valorización.*

**Proyecciones energéticas.** *Localización de líneas de transmisión de energía. Ubicación de centrales energéticas. Análisis de la incidencia de los planes energéticos en los ecosistemas.*

**Ingeniería civil.** *Trazado de vías. Localización de presas y embalses. Cartografía en general. Cartografía automatizada. Trazado de oleoductos.*

**Vida silvestre.** *Inventario de la población de la fauna silvestre. Estudio de ecosistemas. Análisis de la incidencia de obras de infraestructura en el equilibrio ecológico. Evaluación de daños ocasionados por fuegos en sabanas o bosques.*

**Arqueología.** *Estudio de las huellas de antiguas civilizaciones. Planificación de la exploración arqueológica. Análisis comparativo de las obras ejecutadas por antiguas civilizaciones.*

**Prevención de daños ocasionados por desastres.** *Estudio de la posibilidad de ocurrencia de desastres naturales como inundaciones, deslizamientos de tierra, avalanchas de nieve. Evaluación de los daños causados por desastres naturales o provocados por el hombre. Seguimiento de fenómenos naturales como huracanes, inundaciones, etc., para alertar a la población. Planificación de labores de rescate.*

**Planificación regional.** *Estudios regionales. Sistemas de información geográfica.*

**Inteligencia militar.** *Detección de objetivos militares, suministros, movimientos de tropas, emplazamientos de armas de gran potencia, detección de flotas navales, aeropuertos.*

#### IV.7.2 VENTAJAS Y LIMITACIONES.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Las principales ventajas de la utilización de la percepción remota son:

- 1) Se tiene una visión de conjunto que facilita el análisis.
- 2) Se puede realizar estudios en forma más rápida.
- 3) Facilita la actualización de estudios realizados, pues es posible obtener cobertura de una misma porción del terreno en diversas épocas.

- 4) *Es posible concentrar en un mismo tipo de imagen, los resultados de estudios multidisciplinarios*
- 5) *Se tiene un registro permanente y exacto de las condiciones en el momento de realizar el estudio.*
- 6) *Es posible hacer mediciones sin necesidad de salir al terreno.*

*Las limitaciones que se pueden mencionar son:*

- 1) *No permite evaluar las características internas de los cuerpos naturales (bosques, suelos, rocas, etc )*
- 2) *Su empleo, requiere entrenamiento especial del personal técnico*
- 3) *La observación desde un plano superior puede dificultar la identificación de los objetos y rasgos*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### IV.8 PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE DE LA COMARCA LAGUNERA.

Para poder manejar y analizar los datos proporcionados por las imágenes de satélite, se requiere aplicar técnicas que permitan la posibilidad de modificar la apariencia de las imágenes para tener una óptima interpretación visual

Con base en la metodología propuesta, se presenta como objetivo de este subtema, el procesamiento digital de las imágenes de satélite que servirán como marco para presentar las zonas de inundación de la Comarca Lagunera, así como realizar su análisis multitemporal

Para cumplir con este objetivo, se contó con 12 bandas espectrales, proporcionadas por el Instituto de Geografía de la U N A M: correspondientes al satélite Landsat MSS (Multiespectral scanner) del área de la Comarca Lagunera, con resolución en pixel de 60 x 60 m

Las 12 bandas tienen las siguientes características.

Cuatro de ellas representativas de la década de los 70's del 15 de agosto de 1972.  
Otras cuatro representativas de la década de los 80's del 13 de abril de 1983  
Y las últimas representativas de la década de los 90's del 21 de abril de 1992

Cada una de estas bandas esta asociada a un rango del espectro electromagnético

- Banda 4: Espectro visible verde con longitud de onda de 0.05 - 0.06  $\mu\text{m}$ .
- Banda 5: Espectro visible rojo con longitud de onda de 0.06 - 0.07  $\mu\text{m}$
- Banda 6: Espectro infrarrojo cercano con longitud de onda de 0.07 - 0.08  $\mu\text{m}$
- Banda 7: Espectro infrarrojo cercano con longitud de onda de 0.08 - 0.11  $\mu\text{m}$

La escena correspondiente al área de estudio está comprendida en las coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator)

$$\begin{array}{ll} X1 = 625,000 & Y1 = 2\,793,000 \\ X2 = 680,000 & Y2 = 2\,848,000 \end{array}$$

Que corresponden a las coordenadas geográficas:

$$\begin{array}{llll} \text{Latitud} & 25^\circ 07' \text{ a los } & 25^\circ 37' & \text{Norte} \\ \text{Longitud} & 175^\circ 12' \text{ a los } & 175^\circ 45' & \text{Oeste} \end{array}$$



Para iniciar el procesamiento de las imágenes se debe entender la relación entre el número digital que se despliega en la imagen de satélite y el promedio de brillantez, radiancia o medida electrónica sobre el área comprendida dentro del pixel.

Generalmente, los números digitales oscilan entre un rango de 0 a 255 ( $8 \text{ bits} = 2^8 = 256$ ), lo que significa que se pueden tener hasta 256 tonos de gris. Un valor pequeño en los números digitales representan tonalidades oscuras o negras en la imagen, mientras que los valores grandes cercanos a 256 representan tonos claros o blancos.

Para llevar a cabo el procesamiento de la imagen es necesario asignar a cada pixel con su número digital a una georeferenciación bien definida, que en este caso corresponde a las coordenadas geográficas presentadas anteriormente.

Después de realizada la georeferenciación de la escena, se procede al realce de características, por lo que primero se desplegaron los histogramas de cada una de las bandas observándose en cada una de estas gráficas el rango en que oscilaban los números digitales.

Las figuras IV 4 y IV 5 muestran una banda de satélite Landsat MSS con su correspondiente histograma.

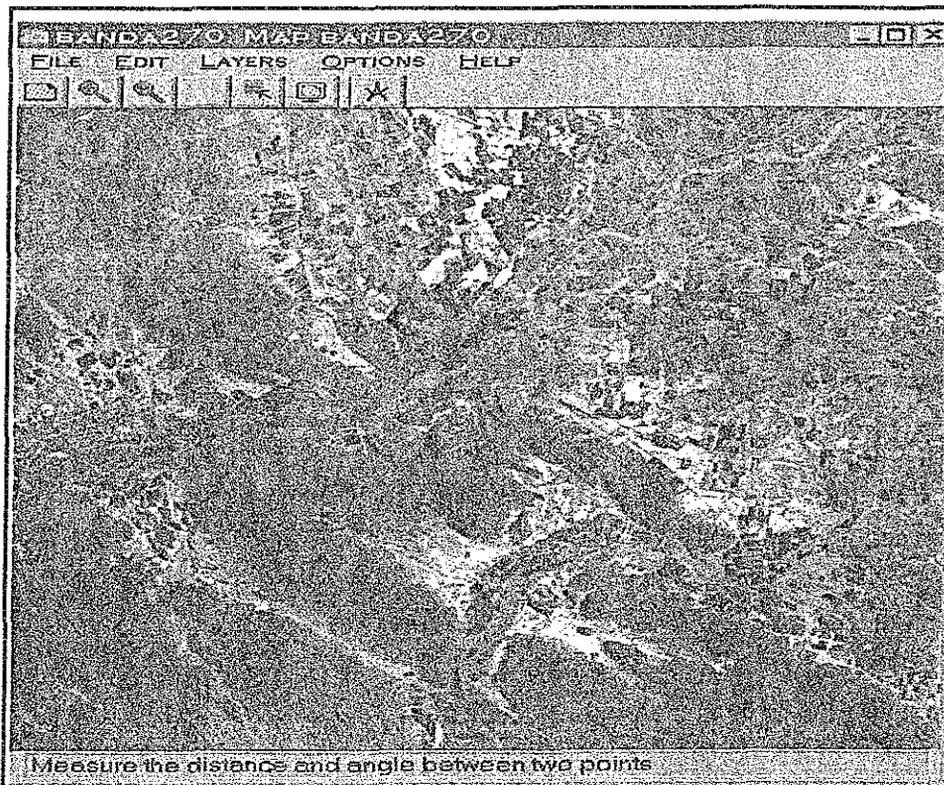
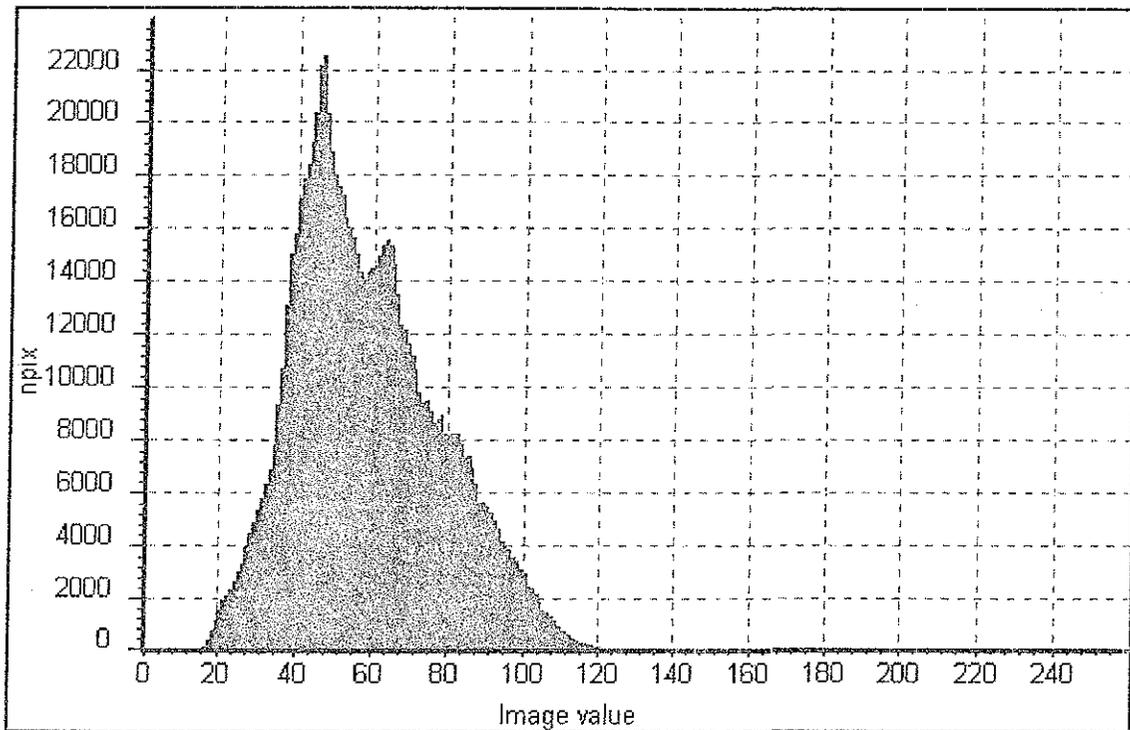


Fig. IV 4 Banda 5 de la década de los 80's

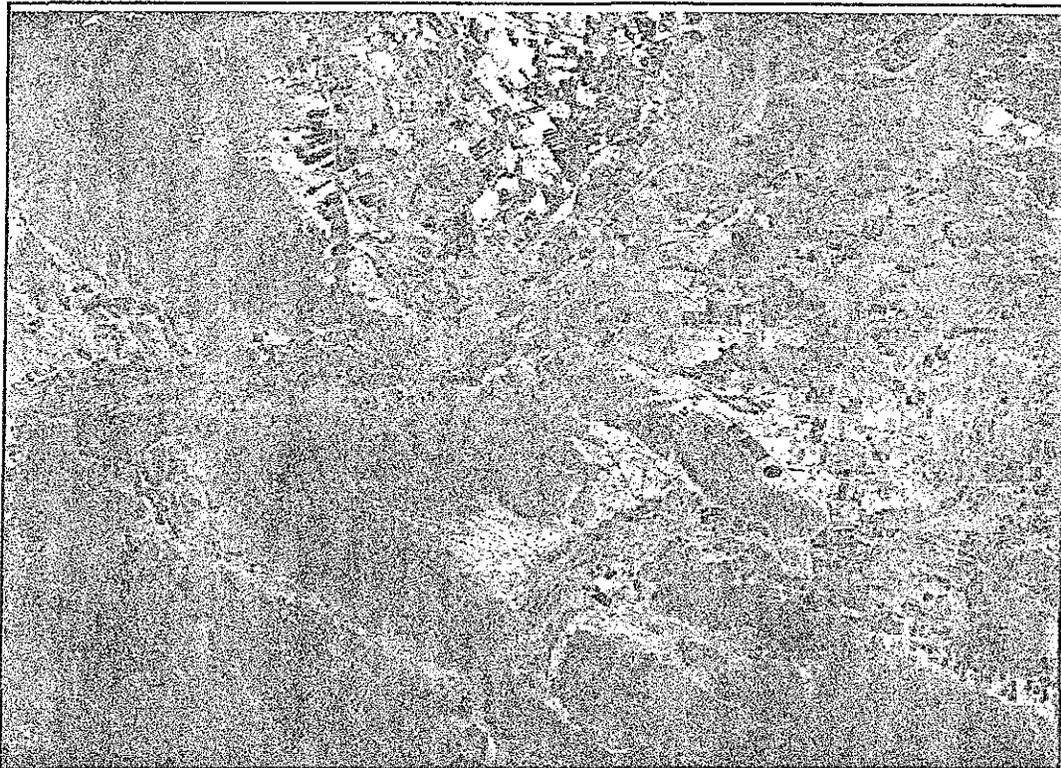


*Fig. IV.5 Histograma correspondiente a la banda 5 de la década de los 80's*

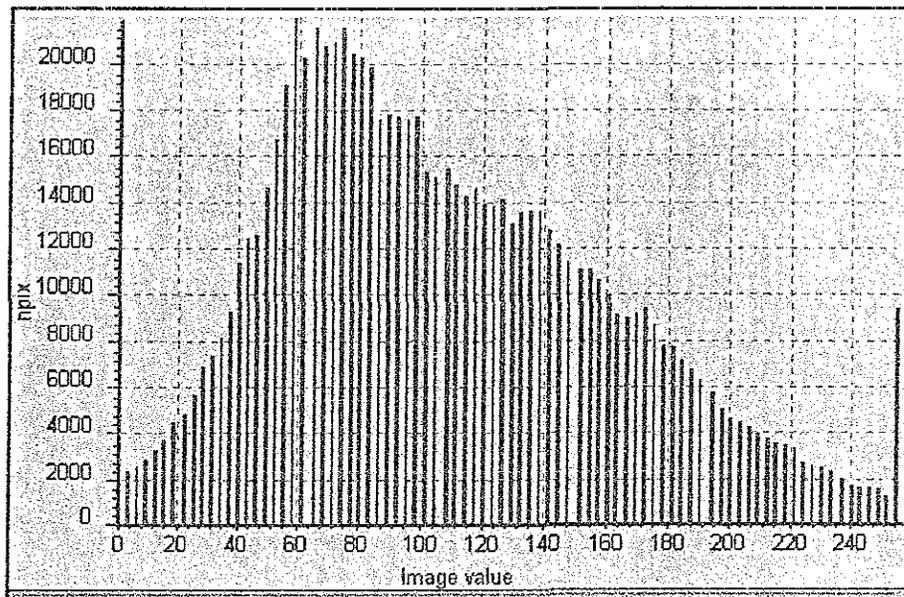
*En la figura IV.5 el eje de las abscisas representa la respuesta espectral, es decir, el número digital y el eje de las ordenadas se asocia al número de píxeles con una cierta respuesta espectral. Dicho en otras palabras, la imagen correspondiente a la banda 5, tiene números digitales en sus píxeles que van desde 18 hasta 120 y cerca de 22,000 píxeles tienen número digital igual a 44 aproximadamente.*

*Para que la imagen tenga una respuesta espectral entre 0 y 256, se aplicó la técnica del estrechamiento lineal que sirve para utilizar el manejo de contrastes en todo el rango de niveles de gris (ver figuras IV.6 y IV.7)*

*De las figuras, se puede observar que aparentemente las imágenes son idénticas, sin embargo, los números digitales contenidos en los píxeles de la figura IV.6 oscilan entre 0 y 255. Resultado que se confirma en la figura IV.7 con la representación en el histograma de la imagen.*



*Fig. IV.6 Banda 5 de la década de los 80's con aplicación de la técnica de estrechamiento lineal.*



*Fig. IV 7 Histograma de la figura anterior.*



Después de analizar cada uno de los histogramas de las 12 bandas, se crearon composiciones en color para visualizar mejor los atributos de la imagen utilizando los colores primarios rojo, verde y azul

Una combinación específica de las bandas utilizadas para crear una imagen en composición de colores es llamada "Composición en falso color" (FCC)

El color rojo se asigna a la banda infrarroja del espectro electromagnético, el verde a la banda visible roja y el azul a la banda visible verde, por lo que al realizar la composición en falso color, la vegetación aparece en color rojizo, el agua en azulado y el suelo en colores de café a gris

Existen en la literatura las combinaciones que deben hacerse entre bandas para realzar una característica específica dependiendo del sensor que contenga el satélite, por ejemplo para el sensor MSS se hacen las siguientes propuestas (Tabla IV 4)

| Banda Espectral MSS | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------|---|---|---|---|
| Áreas urbanas       | X | X |   | X |
| Batimetría          | X | X |   |   |
| Superficie del agua |   |   | X | X |
| Áreas de inundación |   |   |   | X |
| Caminos             |   |   | X | X |

Tabla IV 4 Combinación entre bandas

En este caso por ejemplo para realzar las áreas urbanas la combinación fue banda 5 + banda 4 + banda 7

La figura IV 8, muestra la composición en falso color de la década de los 90's para realzar la mancha urbana

Con ayuda de la composición en falso color podemos realzar ciertas características de la imagen, sin embargo el manejo de la información contenida en los píxeles, no puede ser utilizado debido a que presenta simultáneamente la información de las tres bandas en un mismo píxel, por lo que se requiere desglosar esta información pero conservando el realce de la imagen. Por esa razón, se llevo a cabo una clasificación de imagen multiespectral, que tiene como función extraer información temática de las imágenes de satélite en una forma semiautomática



*Fig. IV 8 Composición en falso color de la década de los 90's para realce de la mancha urbana*

Como se mencionó anteriormente en el capítulo, existen dos métodos de clasificación: el supervisado y el no supervisado, de estos se eligió el primero por considerarlo más importante

Aunque también se probó la clasificación no supervisada, pero por no contar con suficiente información de campo, los resultados obtenidos no fueron satisfactorios

Antes de aplicar cualquier método de clasificación se requiere de un proceso de "entrenamiento", donde se asigna a una clase o atributo de la imagen un número limitado de píxeles, es decir, la clase se define previamente asumiendo que se conoce la zona de estudio, a través de estudios de campo, cartografía o fotos aéreas del lugar.

Para llevar a cabo la fase de "entrenamiento" se utilizaron las imágenes de las décadas de los 70's, 80's y 90's en una composición en falso color

Dichas imágenes fueron designadas

- b21470 Imagen en falso color de la década de los 70's
- b21480 imagen en falso color de la década de los 80's
- b21490 Imagen en falso color de la década de los 90's

Las clases definidas para la clasificación fueron las que aparecen en la tabla IV.5:

| Nombre de la clase | Código |
|--------------------|--------|
| Área urbana        | u      |
| Río                | r      |
| Topografía         | t      |
| Vegetación         | v      |

Tabla IV.5 Clases definidas para la clasificación supervisada.

A continuación la Fig. IV.9, se muestra una estadística del muestreo realizado a las clases definidas anteriormente

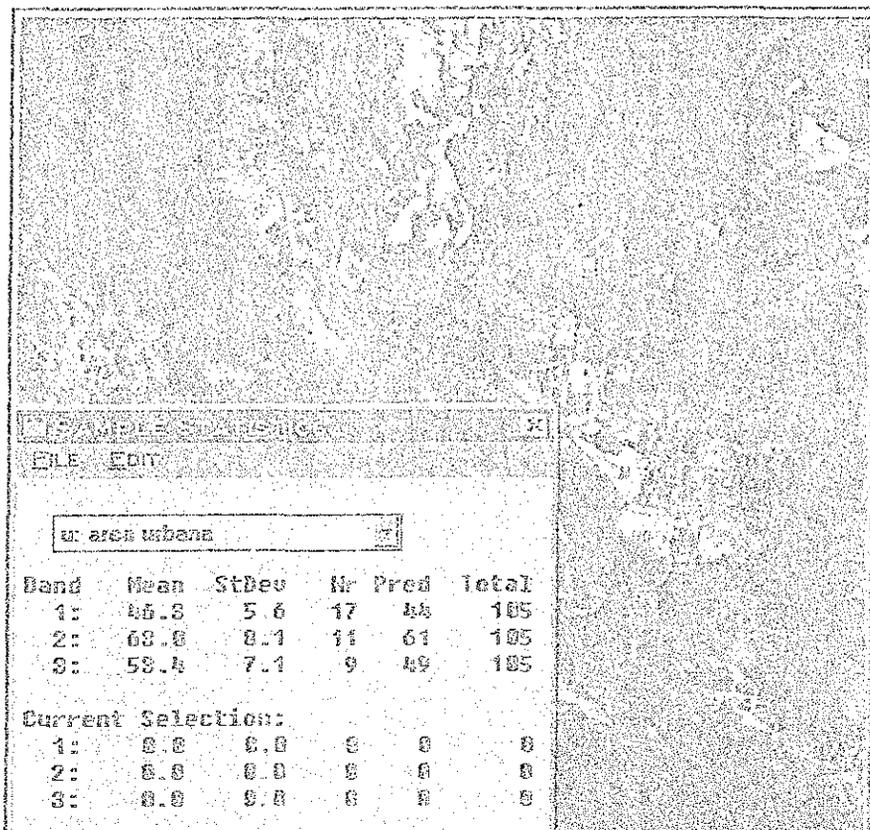


Fig. IV.9 Ejemplo de la estadística de muestreo para la clase. área urbana de la década de los 70's.

Esta estadística incluye el valor de la media de los píxeles considerados dentro de la muestra, su desviación estándar, el número de píxeles que tienen valor predominante y

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

el número total de píxeles seleccionados

Realizado el proceso de entrenamiento de la imagen, se procede a la aplicación propia de la clasificación

Este procedimiento consiste en que a través de un algoritmo de decisión se dividan las características de los píxeles, acorde a la fase de entrenamiento para así poder definir las clases establecidas para todos los píxeles contenidos en la imagen

Existen varios métodos (explicados en la teoría del capítulo), para dividir el espacio total de la imagen, ellos son

El clasificador de mínima distancia.

El clasificador de los paralelepípedos

El clasificador de máxima verosimilitud

Todos ellos aplicados a las composiciones en falso color, preparadas en el paso anterior, generando así un mapa representativo del realce asignado según las clases anteriores

Es necesario comentar, que cuando se aplica el clasificador a la imagen en falso color preparada previamente, no necesariamente se obtienen resultados satisfactorios a la primera iteración, es decir, el proceso no es trivial como pareciera en primera instancia, razón por la cual se debe de repetir el proceso de entrenamiento de la imagen en falso color, así como probar todos los algoritmos de clasificación supervisada, hasta que la respuesta en la imagen cumpla con los requisitos establecidos por el analista

La figura IV 10, muestra el realce de la mancha urbana de la década de los 90's después de aplicarle el clasificador del método supervisado, que en este caso particular, el de mejor resultado fue el de máxima verosimilitud.

Finalmente, para mejorar aún más los resultados obtenidos en la imagen clasificada, se aplicaron operaciones de postclasificación, que consistieron en filtros que remueven las pequeñas áreas individuales aisladas que no fueron generalizadas

En este caso, se aplicó el filtro "Majority", el cual selecciona el valor predominante (más frecuentemente ocurrido de un píxel en función de los 8 píxeles vecinos)

La figura VI 11, muestra la imagen clasificada con el filtro "Majority"

Si se analiza el par de imágenes anteriores con y sin filtro, se puede apreciar claramente la diferencia entre ellas

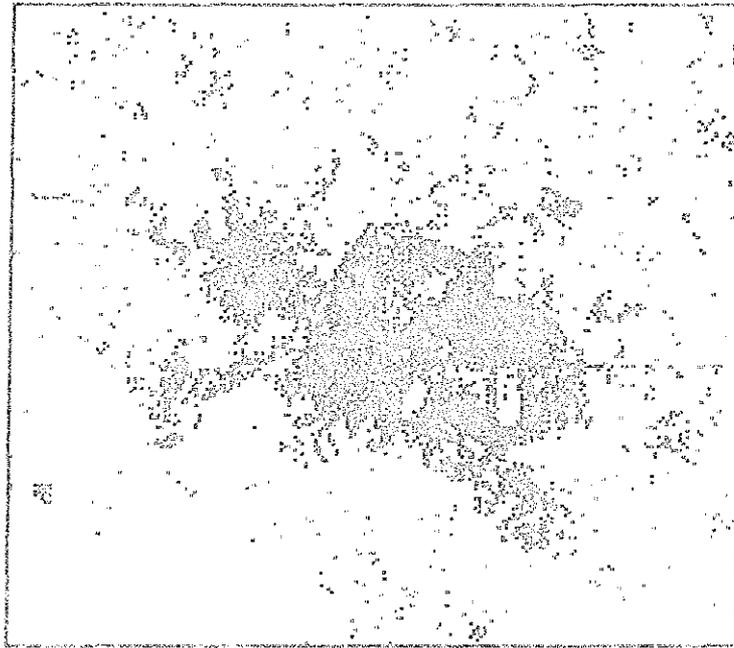


Fig. IV.10 Imagen clasificada con máxima verosimilitud.

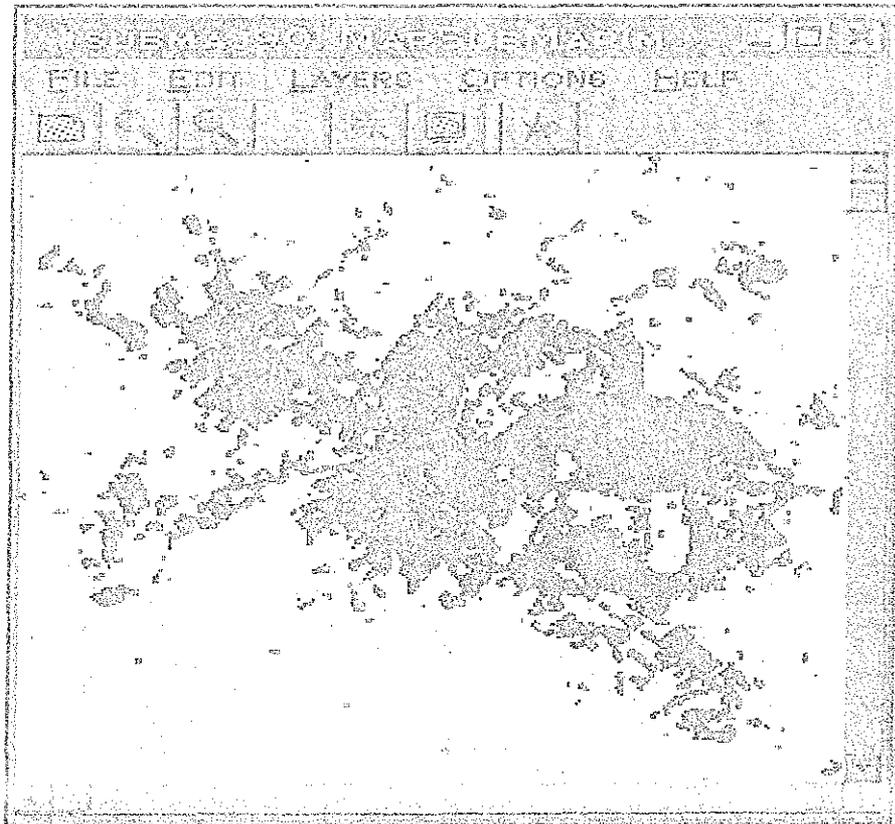


Fig. IV.11 Imagen clasificada con filtro "Majority"

*Por último, es necesario comentar que para el análisis multi temporal que se llevará a cabo en los siguientes subtemas fué necesario generar una imagen clasificada para cada estudio realizado; es decir, se obtuvieron las imágenes para análisis del cambio en la mancha urbana y para el análisis geomorfológico del río*

*En el caso de la superposición de planos para definir áreas de inundación, así como para el análisis de peligro, vulnerabilidad y riesgo, se tomaron exclusivamente las imágenes que presentaron mejor realce de características como composición en falso color*

*Por lo tanto, en los siguientes subtemas se indicará la imagen clasificada o no clasificada que fue utilizada*

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## CAPITULO V.

### ZONIFICACIÓN DE ÁREAS DE INUNDACIÓN. ANÁLISIS DE PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE INUNDACIÓN EN LA ZONA URBANA DE TORREÓN, GÓMEZ PALACIO Y CD. LERDO.

Con base en la propuesta metodológica presentada en el capítulo II se realiza el análisis de zonificación para la Comarca Lagunera Asimismo, se realiza un análisis de peligro de inundación, vulnerabilidad y riesgo, mismo que debe ser considerado en la planificación urbana

Se presentan los diferentes criterios de análisis desde el punto de vista hidrológico, hidráulico y geomorfológico

Finalmente, se presenta un análisis de resultados y recomendaciones de cambio de uso de suelo así como una propuesta de un sistema de alerta para condiciones de contingencia por inundación.

Para llevar a cabo este análisis se utilizaron las fotografías aéreas de mayo de 1983, escala 1:75,000, los planos proporcionados por la gerencia de recursos de agua de la CNA de Torreón, Coahuila, escala 1:2,000, del año de 1990, carta de uso de suelo escala 1:50,000, editado por el INEGI en el año de 1970, mapa de las ciudades de Torreón, Coahuila y Gómez Palacio, Durango e imagen de satélite MSS del año de 1992

Dicha información fue transformada a un lenguaje digital

Se trabajó con 11 planos, cada uno de ellos contiene una longitud aproximada de río de 2 km, que abarcan la zona urbana de Cd Lerdo, Gómez Palacio y Torreón

Se tienen 110 secciones transversales del cauce, que aparecen en el anexo de la tesis, distanciadas una de otra 200 m. Las secciones se presentan sobre un plano vertical que contiene el sistema de ejes cartesianos. Cada una de estas secciones cuenta desde 6 puntos como mínimo hasta 19 puntos como máximo que definen el comportamiento irregular del cauce.

Con el modelo de flujo HEC-RAS se simuló las condiciones de flujo permanente del río Nazas, se obtuvieron las elevaciones del agua y velocidades en cada una de las secciones, y con el modelo RED-RIOS, se simuló el tránsito de avenidas y las planicies de inundación



Por otro lado, se superpone la información de los planos digitalizados escala 1:2000 sobre las fotos aéreas de la zona y sobre la imagen de satélite, generando un escenario integral que se presenta en la figura V.1 y V.2.

De estas figuras se obtiene lo siguiente:

- 1.- La resolución del pixel en la fotografía aérea, según su escala, es de 10 x 10 m
- 2.- La resolución del pixel en los planos digitalizados, rasterizados y segmentados para representación de la zona inundable son de 0.10 x 0.10 m. Superficie óptima para ser analizada la inundación.
- 3.- La resolución del pixel en la imagen de satélite es de 60 x 60 m

De acuerdo con lo escrito anteriormente, existe una gran diferencia de escala entre la foto aérea, los planos digitalizados, y la imagen de satélite, por lo que se sugiere trabajar el análisis de la inundación exclusivamente con la zonificación obtenida directamente en los planos escala 1:2000.

Por lo tanto, con la información obtenida del análisis hidrológico e hidráulico, se lleva a cabo un análisis de peligro, vulnerabilidad y riesgo en la zona urbana, partiendo de las siguientes definiciones:

**Peligro de inundación:** Se refiere a la existencia latente de un fenómeno, ya sea de origen natural o causada por el hombre que tiene una cierta probabilidad de ocurrencia en el tiempo y en el espacio y que puede afectar nociva o desastrosamente grupos humanos, infraestructura o al medio ambiente, por lo que es deseable cuantificar su extensión geográfica, localización y magnitud.

**Vulnerabilidad.** Se define como el factor de riesgo interno de un sujeto o de un sistema expuesto a un peligro, en relación a su predisposición intrínseca a ser afectado o de sufrir pérdida.

**Riesgo:** Es la probabilidad de exceder un valor específico de consecuencias económicas o sociales en un sitio particular y en un tiempo determinado de exposición al peligro. Se puede expresar también por la magnitud probable esperada de daños o fallas de uno o más elementos de un sistema, por el desencadenamiento de un fenómeno peligroso.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

# ZONA DE INUNDACION EN LA COMARCA LAGUNERA

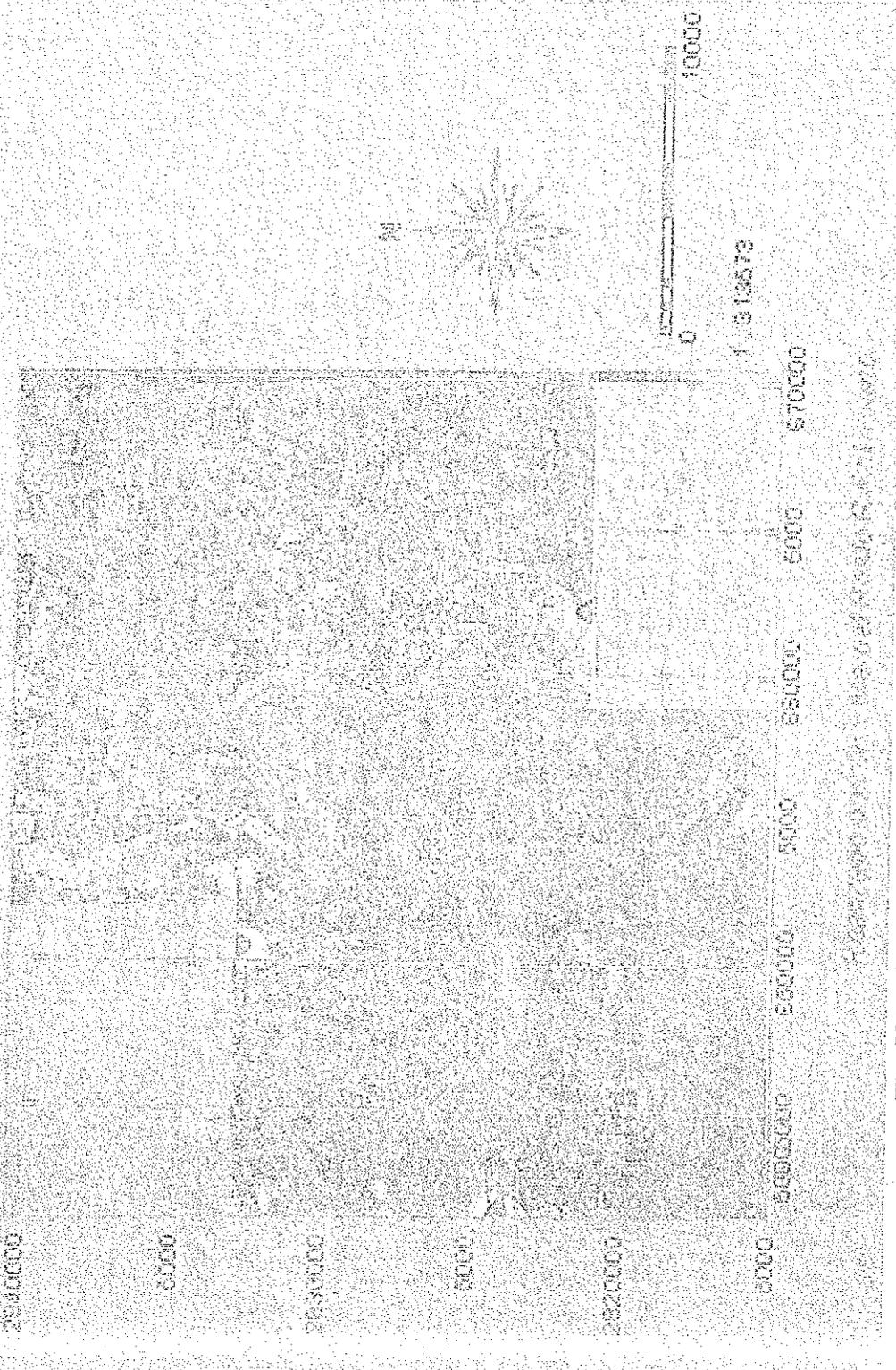


Fig. VI.1 Superposición de fotografía aérea con zona de inundación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

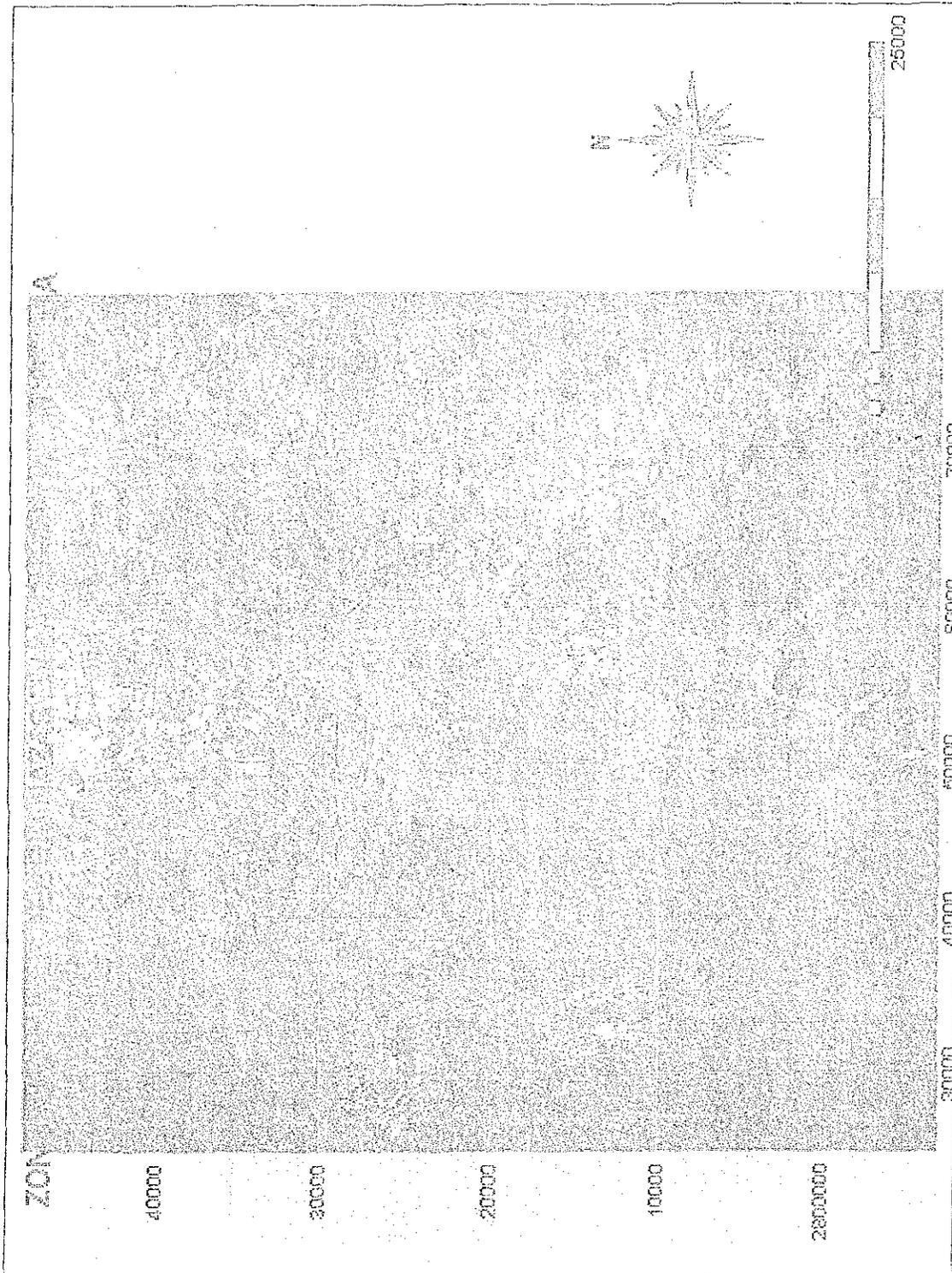


Fig. 7.2 Superposición de imagen de satélite con zona de inundación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### V.1. ANÁLISIS DEL PELIGRO DE INUNDACIÓN.

Para analizar los grados de peligro por inundación que se pueden presentar se llevó a cabo una división del peligro en función de los siguientes criterios:

- 1 - Hidrológico.
- 2 - Geomorfológico
- 3 - Intensidad de peligro.

**Criterio Hidrológico.** Se refiere a su grado de peligrosidad con base en la probabilidad de ocurrencia del fenómeno, eso implica el tener que calcular el periodo de retorno de los gastos máximos esperados

Sea la siguiente condición para el caso de estudio, considerando

Probabilidad de excedencia

$$P_e = \frac{1}{T}$$

Probabilidad de no excedencia

$$P = 1 - \frac{1}{T}$$

La tabla V.1 presenta los niveles sugeridos por la autora con base en la probabilidad de excedencia

| T (años) | Q <sub>máx.</sub> (m <sup>3</sup> /s) | Prob. excedencia. | Nivel de peligro |
|----------|---------------------------------------|-------------------|------------------|
| 10       | 550                                   | 0.100             | Medio            |
| 20       | 1000                                  | 0.050             | Medio            |
| 50       | 1600                                  | 0.020             | Alto             |
| 100      | 1900                                  | 0.010             | Alto             |

Tabla V.1 Niveles de peligro sugeridos por la autora. Criterio hidrológico.



También se propone el nivel de peligro en función de los  $n$  años de duración. (Tabla V.2) La interpretación que se le debe de dar a dicha tabla es que a medida de que pase el tiempo en años, será mayor la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.

| n   | Duración del lapso en años |      |      |      |      |      |      |      |      |      | Nivel |
|-----|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|     | 1                          | 2    | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 40   | 50   |       |
| 10  | 0.1                        | 0.19 | 0.41 | 0.65 | 0.79 | 0.88 | 0.93 | 0.96 | 0.98 | 0.99 | Medio |
| 20  | 0.05                       | 0.10 | 0.25 | 0.40 | 0.61 | 0.80 | 0.87 | 0.9  | 0.92 | 0.93 | Medio |
| 50  | 0.02                       | 0.04 | 0.09 | 0.18 | 0.26 | 0.33 | 0.40 | 0.45 | 0.55 | 0.64 | Alto  |
| 100 | 0.01                       | 0.02 | 0.04 | 0.09 | 0.13 | 0.16 | 0.20 | 0.25 | 0.27 | 0.32 | Alto  |

Tabla V.2 Probabilidad de peligro en función de los años de duración.

**Criterio Geomorfológico.** Este criterio se fundamenta en el estudio del relieve terrestre en su origen, historia y dinámica actual, su enfoque será un criterio aplicado y se ocupará de la solución de diversos problemas relacionados con el relieve y de interés práctico para el hombre, por lo que la autora sugiere aplicarlo con los siguientes niveles de peligro (Tabla V 3)

| Unidad geomorfológica   | Nivel de peligro |
|-------------------------|------------------|
| Terraza*                | BAJO             |
| Planicie río inundación | ALTO             |

Tabla V.3. Niveles de peligro para criterio geomorfológico

\*Terraza: Superficie plana o débilmente inclinada, generalmente estrecha o alargada, delimitada por cambios bruscos de pendiente y formada por la acción de los ríos: erosión y acumulación.

Las pendientes de terreno que se presentan en la región de estudio tienen un ángulo de inclinación menor a 3 grados, como se observa en la Fig V 3. Lo que implica que el peligro de inundación sea considerado en su mayoría como ALTO, por definir a toda la zona prácticamente como una planicie de inundación, a excepción de la parte central del río

**Criterio de Intensidad.**

*Tirantes mínimos y máximos del flujo.* Los tirantes promedio, mínimos y máximos para el gasto máximo correspondiente a una avenida con periodo de retorno de 100 años, que provocan desbordamiento obtenidos por el modelo RED-RIOS son. (Tabla V.4)

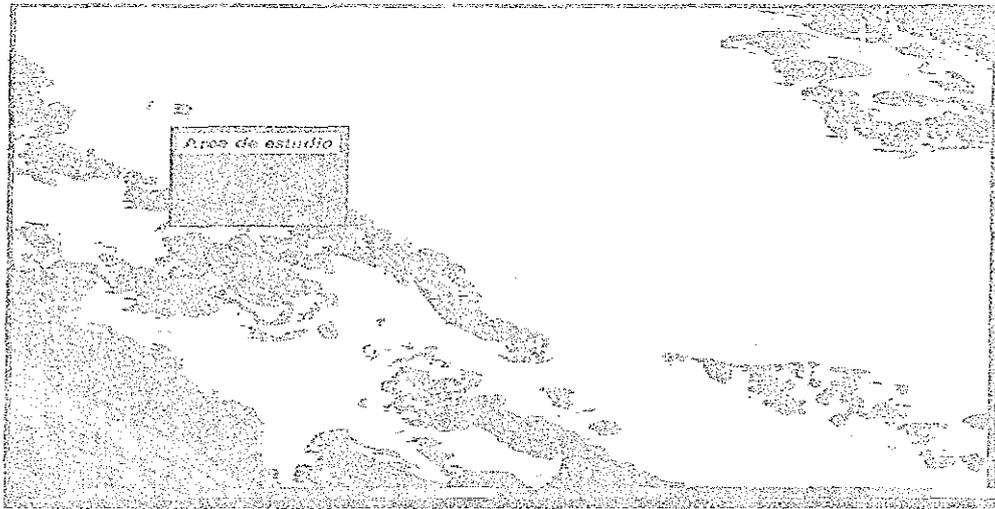


Fig. V.3 Pendientes de terreno.

| Tiempo (h) | Tirante promedio acumulado (m) | Tirante acumulado mínimo y máximo (m) |       |
|------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------|
| 1          | 0.065                          | 0.005                                 | 0.283 |
| 7          | 0.354                          | 0.020                                 | 2.033 |
| 14         | 0.664                          | 0.080                                 | 3.192 |
| 21         | 1.090                          | 0.002                                 | 4.246 |
| 28         | 1.609                          | 0.003                                 | 5.775 |
| 35         | 2.012                          | 0.004                                 | 6.956 |

Tabla V.4. Tirante promedio, máximos y mínimos para  $Q = 1900 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

Lo que permite establecer los siguientes niveles de peligro: (Tabla V.6)

| Tirante (m)       | Niveles de peligro |
|-------------------|--------------------|
| $y < 0.20$        | Bajo               |
| $0.21 < y < 0.50$ | Medio              |
| $y > 0.51$        | Alto               |

Tabla V.6 Niveles de peligro propuestos para los niveles de agua.

Áreas y Volúmenes de inundación. La tabla V.7, muestra las áreas y volúmenes de inundación obtenidas por el HEC-RAS, estos resultados corresponden a las cantidades acumuladas hasta la ubicación de cada uno de los puentes y hasta el final del tramo en estudio

| PUENTE SOLIDARIDAD (ESTACIÓN 363-800)    |                                  |   |
|--|----------------------------------|---|
| Q (m <sup>3</sup> /s)                    | Área inundable (m <sup>2</sup> ) | Volúmen acumulado (m <sup>3</sup> x 1000) |
| 550                                      | 982.43                           | 5759.56                                   |
| 1000                                     | 1411.16                          | 7670.12                                   |
| 1600                                     | 2074.17                          | 10496.27                                  |
| 1900                                     | 3079.1                           | 14652.83                                  |
| PUENTE SANTIAGO GRELL (ESTACIÓN 355-600) |                                  |   |
| Q (m <sup>3</sup> /s)                    | Área inundable (m <sup>2</sup> ) | Volúmen acumulado (m <sup>3</sup> x 1000) |
| 550                                      | 192.99                           | 6223.1                                    |
| 1000                                     | 273.39                           | 8375.17                                   |
| 1600                                     | 499.96                           | 11618.04                                  |
| 1900                                     | 1161.03                          | 16558.54                                  |
| PUENTE RAMOS ARISPE (ESTACIÓN 345-600)   |                                  |   |
| Q (m <sup>3</sup> /s)                    | Área inundable (m <sup>2</sup> ) | Volúmen acumulado (m <sup>3</sup> x 1000) |
| 550                                      | 214.27                           | 6560.18                                   |
| 1000                                     | 382.87                           | 9027.37                                   |
| 1600                                     | 526.38                           | 12465.83                                  |
| 1900                                     | 720.29                           | 16097.36                                  |

| PUENTE DOBLE (ESTACIÓN 32+800)       |                                  |   |
|--------------------------------------|----------------------------------|---|
| Q (m <sup>3</sup> /s)                | Área inundable (m <sup>2</sup> ) | Volúmen acumulado (m <sup>3</sup> x 1000) |
| 550                                  | 213.25                           | 6958.35                                   |
| 1000                                 | 529.4                            | 9973.83                                   |
| 1600                                 | 822.69                           | 13720.37                                  |
| 1900                                 | 1178.04                          | 19748.39                                  |
| PUENTE FERROCARRIL (ESTACIÓN 31+600) |                                  |   |
| Q (m <sup>3</sup> /s)                | Área inundable (m <sup>2</sup> ) | Volúmen acumulado (m <sup>3</sup> x 1000) |
| 550                                  | 157.17                           | 7170.33                                   |
| 1000                                 | 241.71                           | 10412.03                                  |
| 1600                                 | 345.03                           | 14380.07                                  |
| 1900                                 | 463.91                           | 20646.13                                  |
| TRAMO FINAL (ESTACIÓN 22+000)        |                                  |   |
| Q (m <sup>3</sup> /s)                | Área inundable (m <sup>2</sup> ) | Volúmen acumulado (m <sup>3</sup> x 1000) |
| 550                                  | 186.03                           | 10129.24                                  |
| 1000                                 | 286.56                           | 14640.04                                  |
| 1600                                 | 459.56                           | 20912.04                                  |
| 1900                                 | 634.06                           | 29887.39                                  |

Tabla V.7. Áreas y volúmenes de inundación

El volumen de inundación depende de los gastos en la avenida que se presenta, y como cada avenida se asocia a la probabilidad de no ser excedida,  $P$ , entonces resulta que este volumen también está relacionado con la misma probabilidad  $P$ , por lo tanto, se puede dibujar una gráfica de volumen de inundación contra la probabilidad  $P$ , tal como se muestra en la tabla V.8 y la figura V.4.

| Período de retorno (años) | Prob. de no excedencia | Volúmen acumulado (millones de m <sup>3</sup> ) |
|---------------------------|------------------------|---|
| 10                        | 0.90                   | 10.13   |
| 20                        | 0.95                   | 14.64   |
| 50                        | 0.98                   | 20.91   |
| 100                       | 0.99                   | 29.89   |

Tabla V.8. Determinación del volumen esperado de inundación

Volumenes acumulados

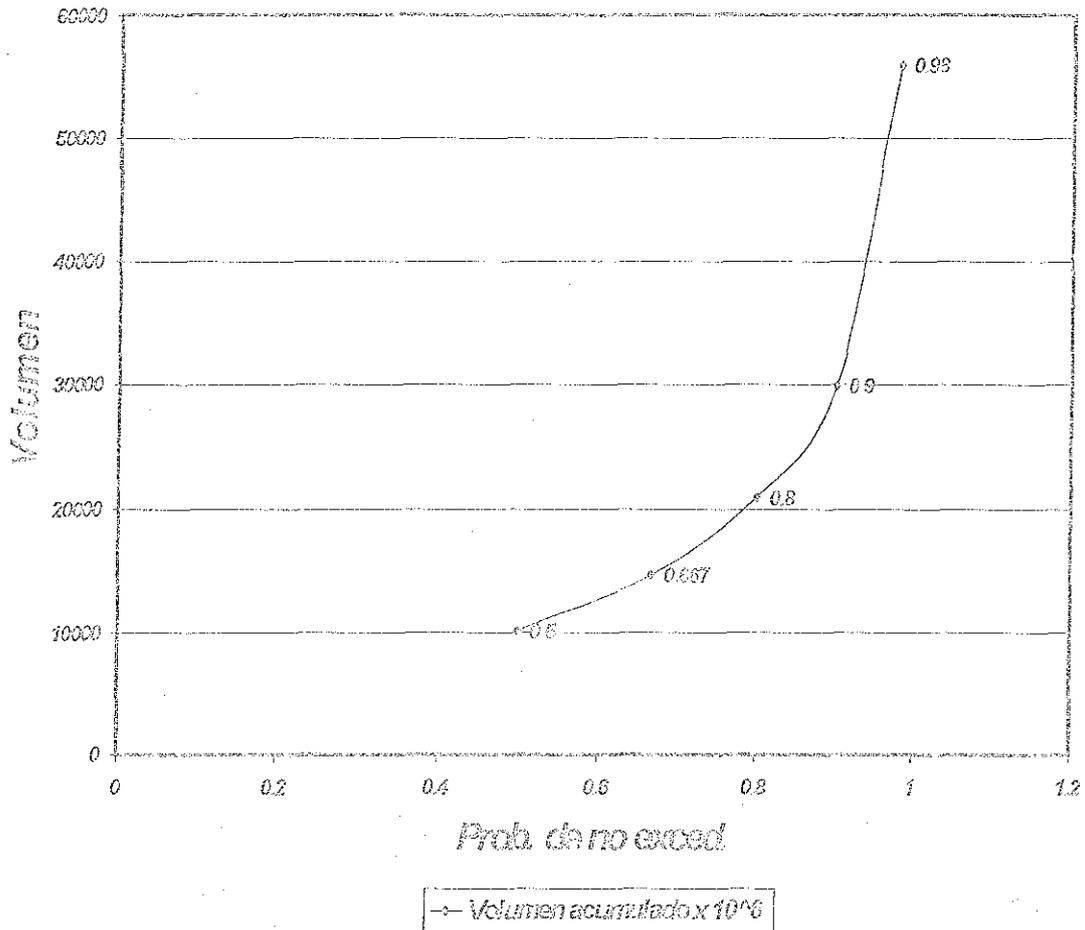


Fig. V.4 Volúmenes de inundación acumulados.

Se sugieren entonces, los siguientes niveles de peligro por volúmenes de inundación. (Tabla V.9).

| Volumen acumulado (m <sup>3</sup> ) | Nivel de peligro |
|-------------------------------------|------------------|
| Menor de 1,500,000                  | Bajo             |
| 1,500,000 - 2,900,000               | Medio            |
| Mayor de 2,900,000                  | Alto             |

Tabla V.9 Niveles de peligro por volumen acumulado esperado.

**COMENTARIOS SOBRE EL PELIGRO EN LA ZONA URBANA DE TORREÓN,  
GÓMEZ PALACIO Y CD. LERDO.**

Considerando los niveles de peligro propuestos por la autora para cada uno de los criterios expuestos anteriormente, se muestra en el plano V 1 la zonas de inundación correspondiente a la condición más desfavorable para una avenida con un periodo de retorno de 100 años .

El criterio hidrológico, permitió con un nivel alto de confiabilidad, obtener zonas que representan probabilidades de inundación, mediante el trazo de líneas resultado de los perfiles obtenidos para avenidas con periodo de retorno de 10, 20, 50 y 100 años correspondientes a gastos de 550, 1000, 1600 y 1900 m<sup>3</sup>/s, respectivamente

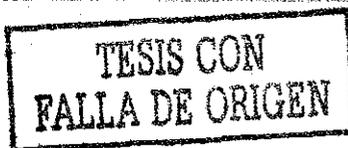
Respecto a las condiciones de severidad de la inundación, se observa:

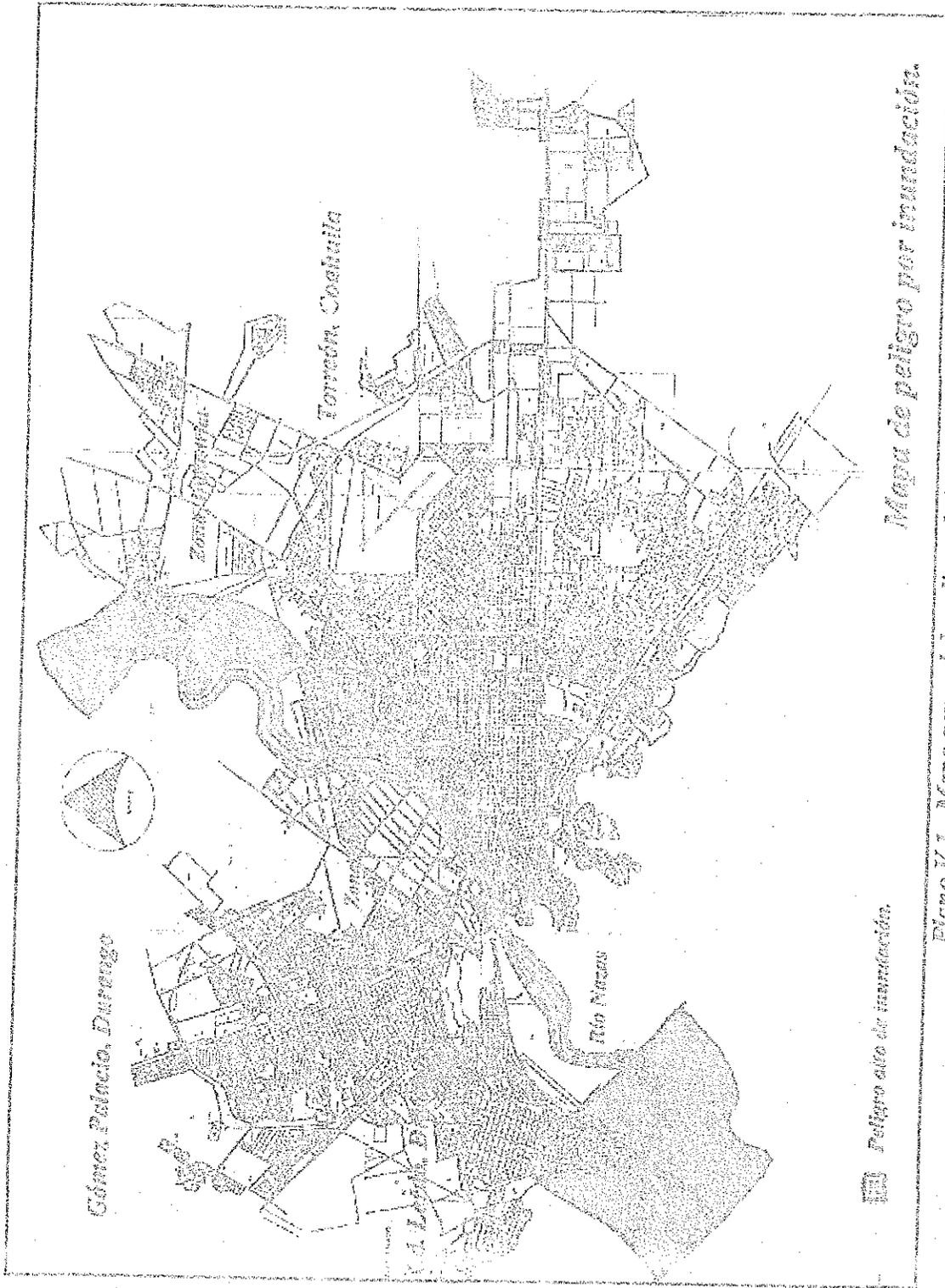
Para gastos pequeños de 550, 1000 y 1600 m<sup>3</sup>/s, el río no sufre desbordamientos en la mayor parte del tramo en estudio, siguiendo perfectamente la dirección del cauce, a excepción de una pequeña área urbana (Plano V.2), inundada cercana a la ubicación del Puente Doble, tal y como se puede apreciar en las fotos V 1, V 2 y V 3 del lugar. Lo que confirma el resultado obtenido por el modelo HEC-RAS, ya que dichas fotografías corresponden a una inundación provocada por un gasto  $Q = 550$  m<sup>3</sup>/s en el año de 1991.

Se observa también, en el plano V 1 que las planicies de inundación se generan para el gasto de 1900 m<sup>3</sup>/s ya que para esta magnitud se rebasa el bordo perimetral que protege a la zona

Se observa, sin embargo que dadas las zonas de inundación solo se afectan los tramos iniciales y finales de la zona de estudio, eso significa que la gran mayoría de zonas habitacionales esta protegida por la construcción de los bordos longitudinales

Por otro lado, el criterio geomorfológico nos permite determinar lo siguiente. La sección transversal de la fig V 6 muestra dos topologías diferentes, en la parte central la sección es confinada por niveles de terraza, mientras que para la parte superior se favorece mucho la inundación debido a la planicie de la misma

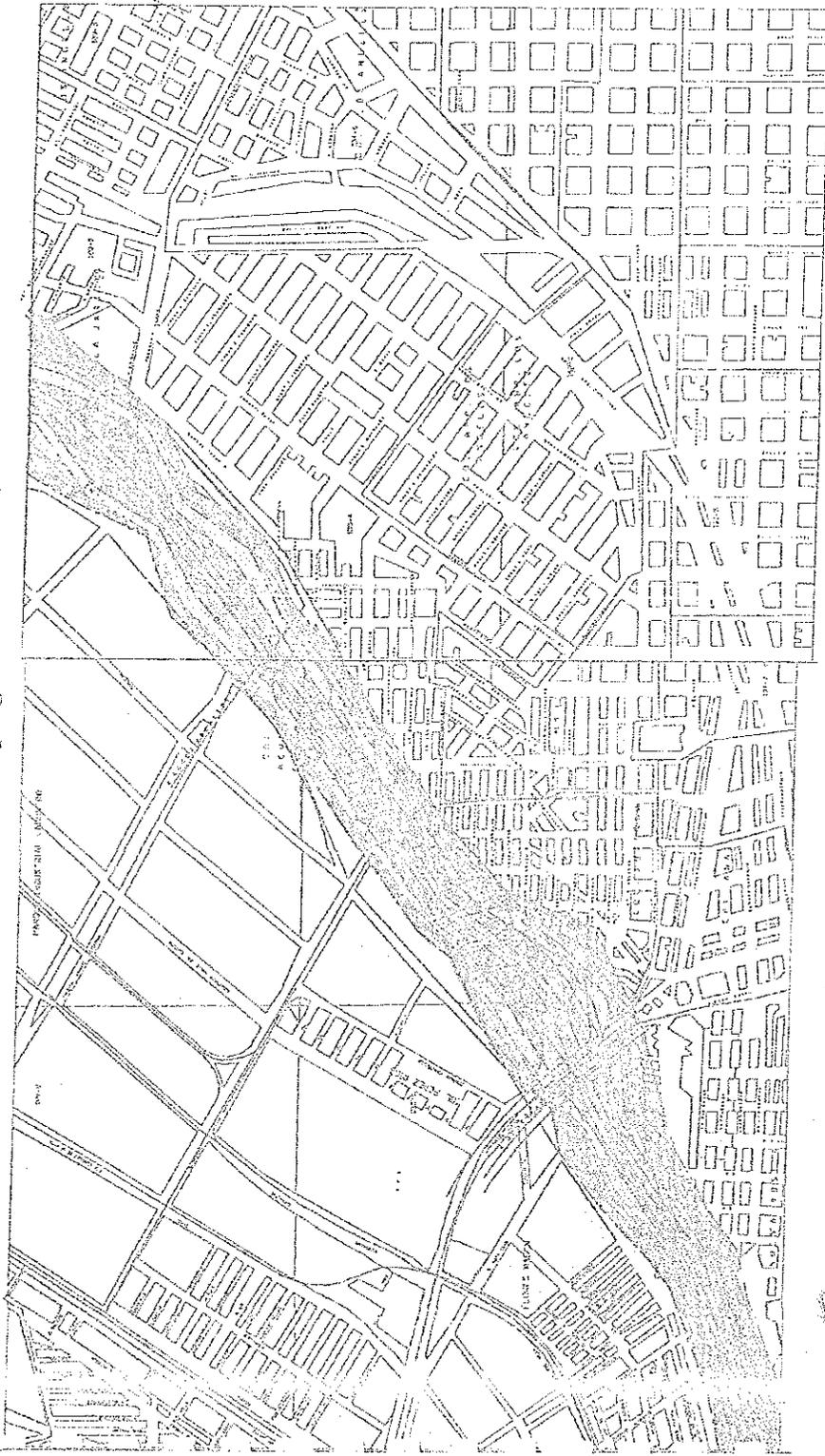




Piano V.1 Mapa general de peligro de inundación.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

*Mapa de peligro por inundación*



-  Eje de río
-  Q = 550 m<sup>3</sup>/s
-  Q = 1000 m<sup>3</sup>/s
-  Q = 1600 m<sup>3</sup>/s
-  Q = 1900 m<sup>3</sup>/s
-  Peligro bajo de inundación
-  Peligro medio de inundación
-  Peligro alto de inundación

*Plano V.2 Mapa local de peligro por inundación.*

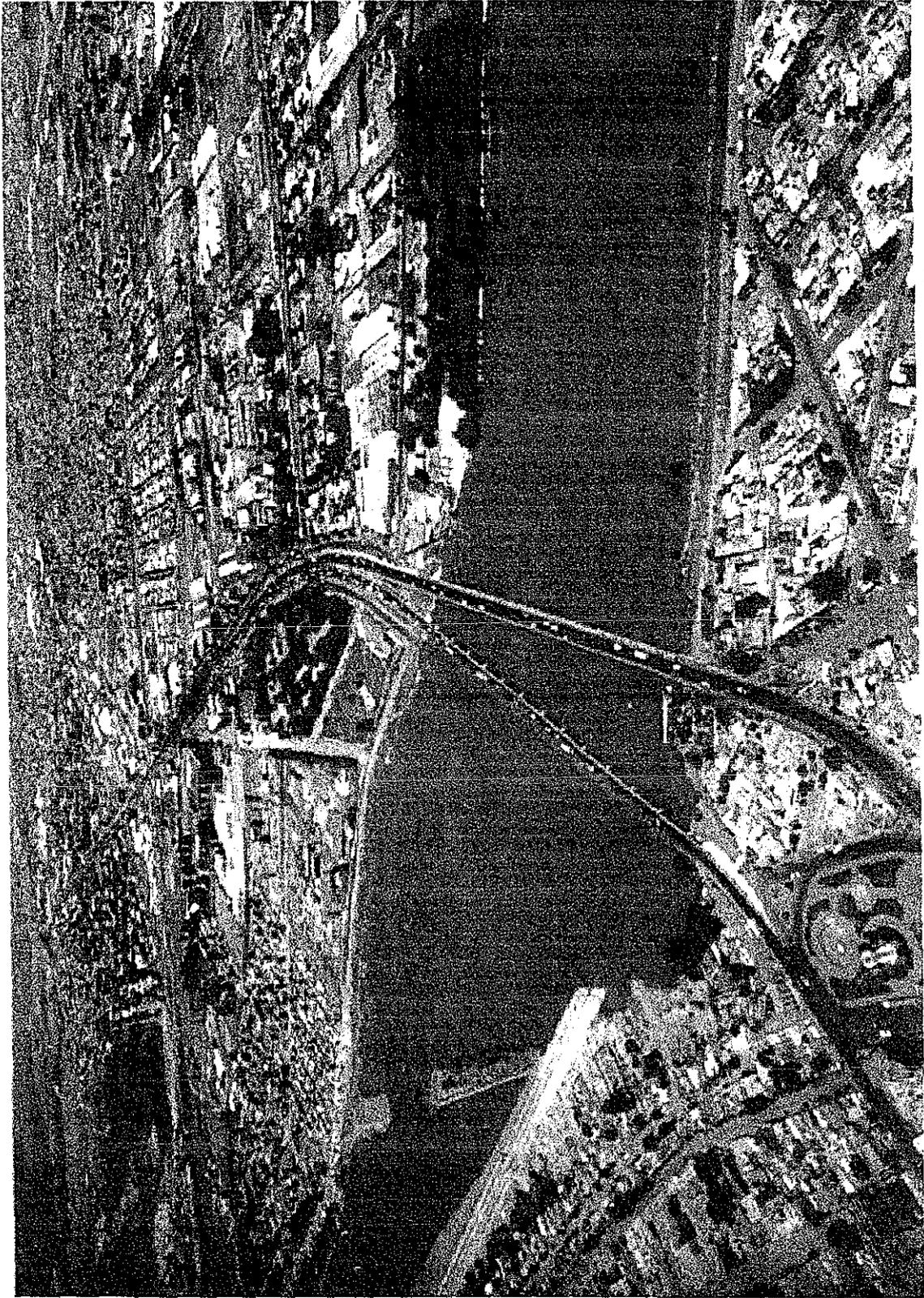
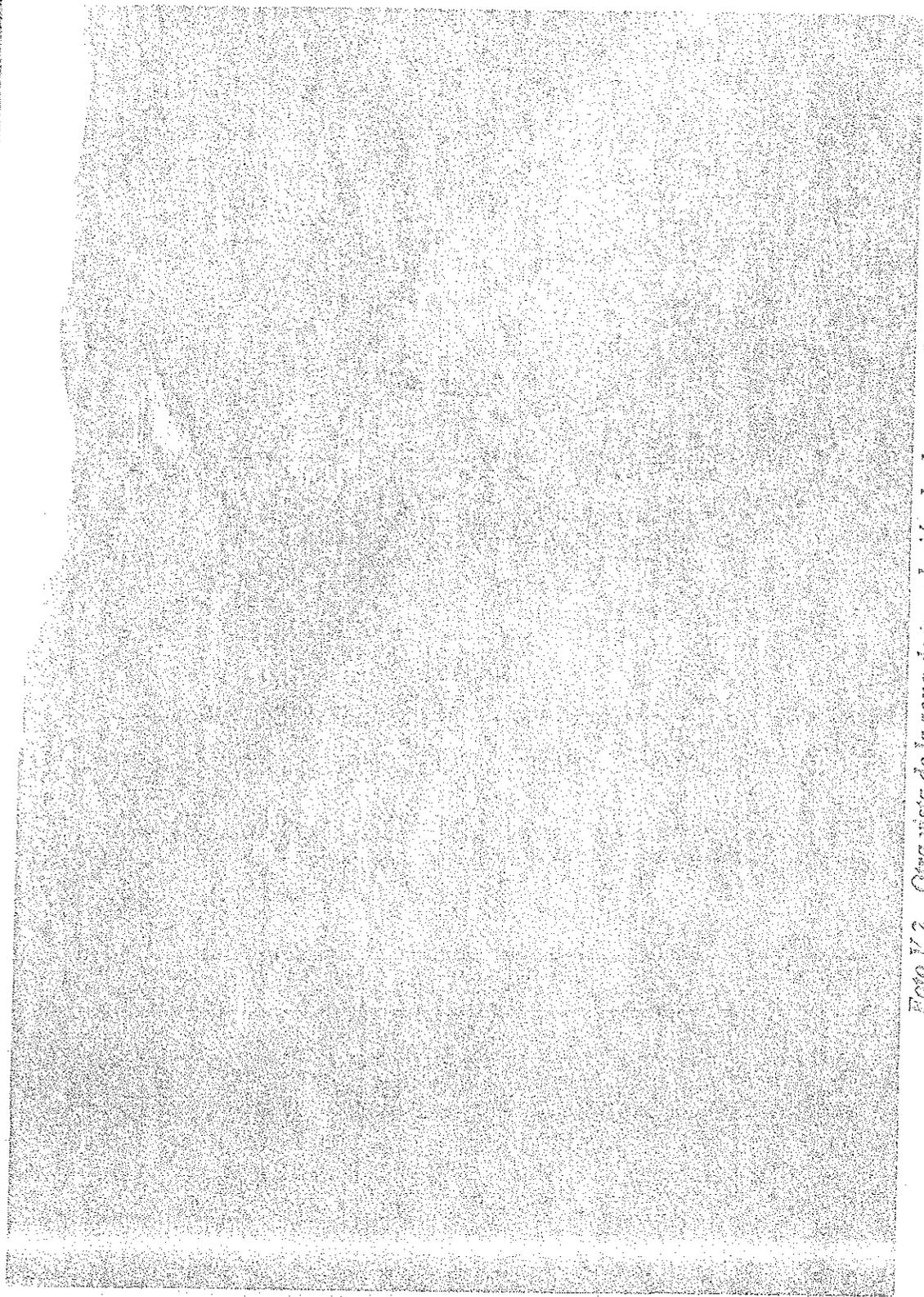


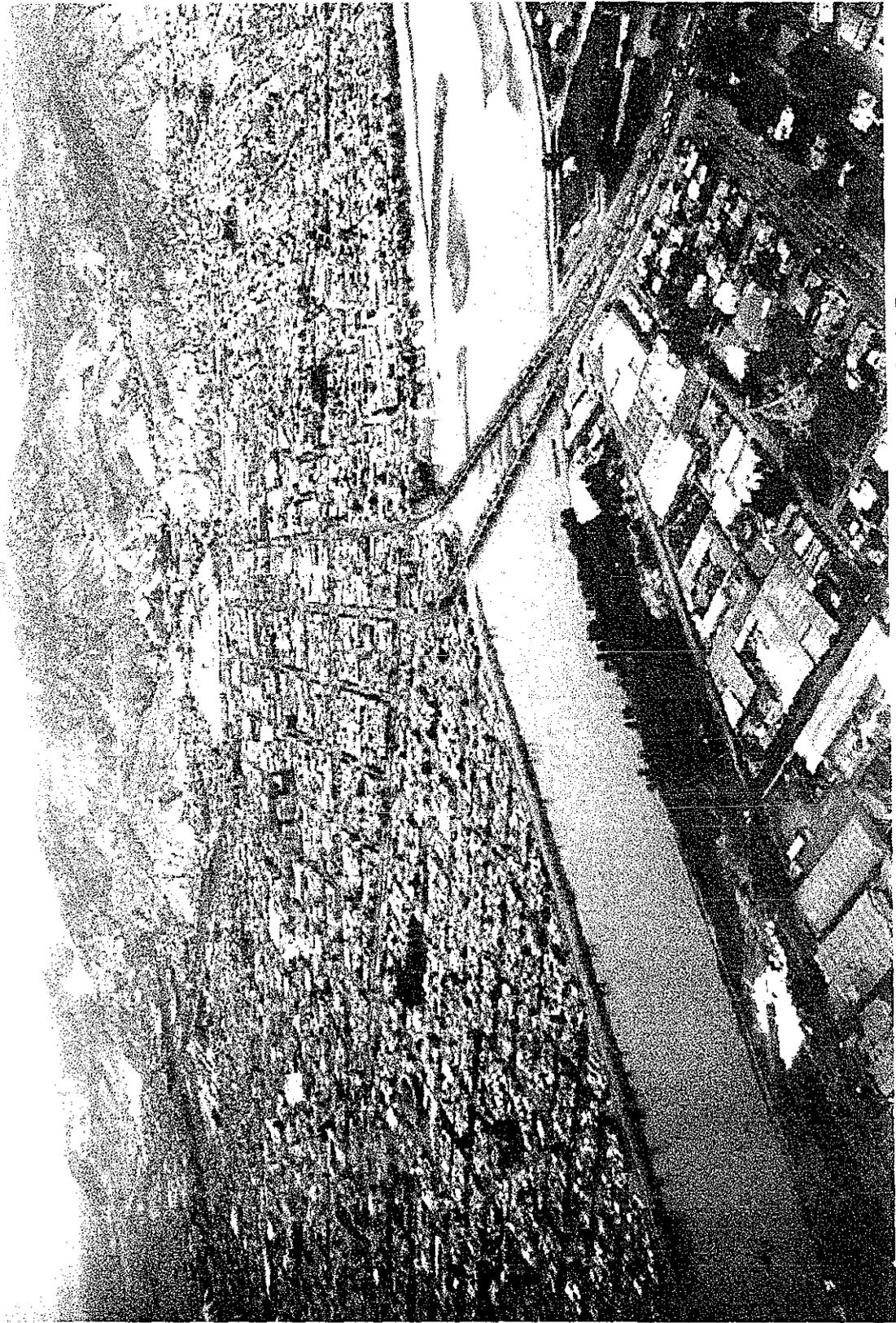
Foto V.1 Zona de inundación cercana al puente Doble ( $Q = 550 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



*Foto V.2 Otra vista de la zona de inundación desde aguas abajo.*

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



*Foto V.3 Otra vista de la zona de inundación desde Gomez Palacio Dgo.*

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

De acuerdo con el criterio de intensidad, se puede apreciar que las velocidades promedio rebasan siempre el metro por segundo, que sugiere un nivel de peligro alto, pudiendo con ello arrastrar personas u objetos, sin embargo, es necesario comentar que de acuerdo con los valores en las velocidades mínimas, existen pocas secciones donde se tienen niveles de peligro bajo o medio y obviamente las velocidades máximas en su mayoría definen un peligro alto

Otro factor importante por mencionar son los volúmenes de inundación, que dependen fundamentalmente de la duración del evento. En este caso particular y de acuerdo con lo obtenido en el análisis hidrológico, el tiempo base de la avenida es de 16 h, con un tiempo pico de 3.33 h

Concluyendo entonces, que estos valores de inundación se asocian en su mayoría para un nivel de peligro alto

## V.2. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD.

En este rubro se consideran los siguientes tres aspectos principales:

*Vulnerabilidad de la vida humana (VH):* Exposición de las personas a la amenaza o peligro de inundación, varía de acuerdo con la densidad de población.

La autora le asigna a este aspecto, un peso de 50%, o sea más un 50% de

*Vulnerabilidad de infraestructura (VI):* Se refiere al tipo de infraestructura urbana existente, que incluyen desde puentes, caminos y tipos de vivienda

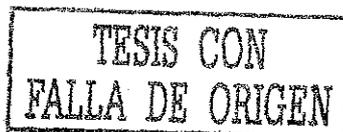
Se sugiere un peso de 30 %

*Vulnerabilidad Social (VS):* Establece la vulnerabilidad de la comunidad, considerando su condición social para establecer la capacidad de enfrentamiento y manejo del peligro o amenaza

Se contempla proporcionarle un peso de 20 %.

Por lo tanto, la superposición de estos aspectos de vulnerabilidad, produce una vulnerabilidad total (V) igual a

$$V = 0.5 (VH) + 0.3 (VI) + 0.2 (VS)$$



Los planos V 3 y V 4 muestran en forma general y local respectivamente, los niveles de vulnerabilidad que se tienen de acuerdo a los criterios antes expuestos, asimismo, se presenta la tabla V. 10, que muestra el análisis por municipio, colonia y calle con sus correspondientes niveles sugeridos.

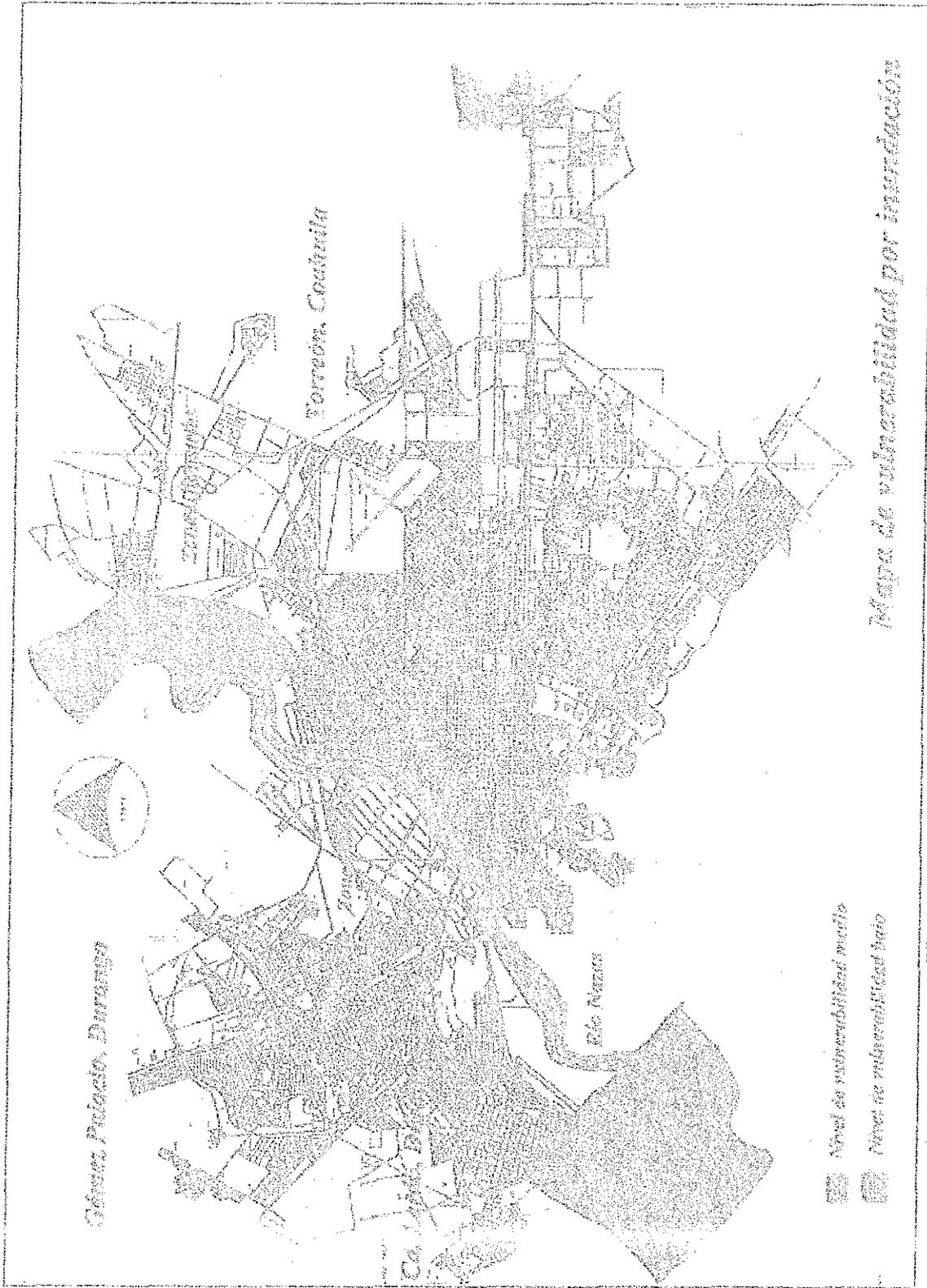
En general se propone un nivel medio de vulnerabilidad, ya que las viviendas existentes con diferentes niveles de peligro por inundación tienen viviendas particulares con piso diferente de tierra, en su mayoría con más de dos cuartos y con un promedio de ocupantes por vivienda de 4.85 personas

| Municipio | Colonia           | Calle  | Nivel de vulnerabilidad |
|-----------|-------------------|--|-------------------------|
| Torreón   |                   | Escuadrón 201  | Medio                   |
|           | Plan de Ayala     | Lázaro Gárdenas  | Medio                   |
|           | Moderna           | Av. Mendoza<br>San marín<br>Av. Villa nueva<br>Saltillo<br>Durango<br>San Antonio<br>Chapultepec<br>Los Angeles<br>Av. 4 de octubre<br>Av. Visia hermosa | Medio                   |
|           | Aguirre Maldonado | J. Domínguez<br>Ceniceros<br>Escuadrón 201<br>Potrero del llano<br>Emiliano Zapata.  | Medio                   |
|           | Villa jardín      | La Salle<br>Los Naranjos<br>Creel<br>Muñoz<br>J. Cueto<br>Alamos<br>Etc.   | Medio                   |

| Municipio     | Colonia                    | Calle  | Nivel de vulnerabilidad |
|---------------|----------------------------|--|-------------------------|
|               | Los nogales                | Fco. Zarco<br>Lázaro Cárdenas<br>Presencia Angostura | Medio                   |
| Gómez Palacio | Parque industrial lagunero | Simón Bolívar<br>Tamezula                            | Medio                   |
|               | Férez Ríos                 | Canatlán   | Medio                   |
|               | Del Consuelo               | Limites de la colonia                                | Medio                   |

Tabla V.10 Niveles de vulnerabilidad sugeridos por la autora por zona afectada.

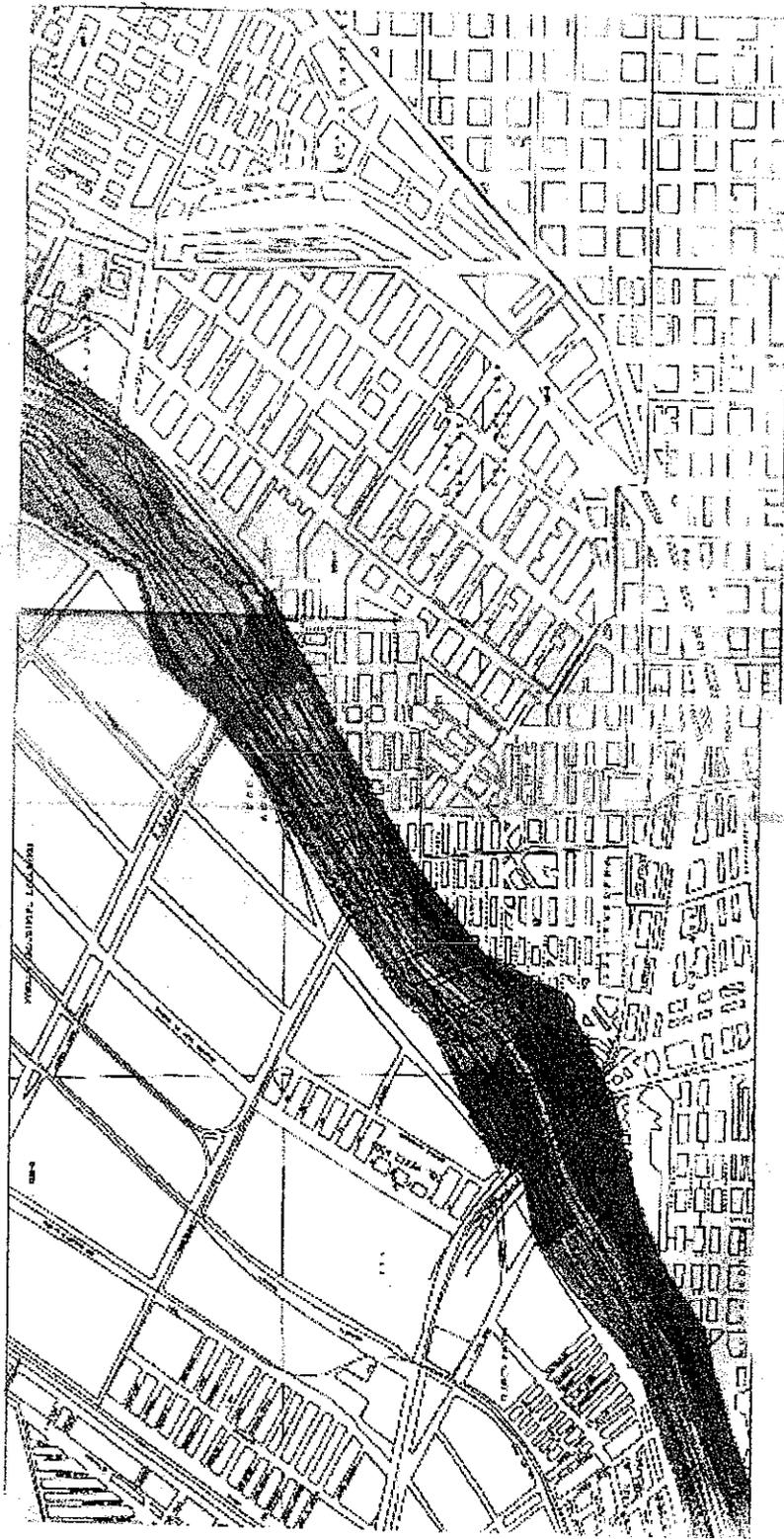
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Plano V.3 Mapa general de vulnerabilidad por inundación.

TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN

*Mapa de vulnerabilidad por inundación*



- Eje del río
- Baja vulnerabilidad
- Media vulnerabilidad
- Alta vulnerabilidad

*Plano V.4 Mapa local de vulnerabilidad por inundación.*

TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN

### V.3. ANÁLISIS DE RIESGO.

El riesgo ( $R$ ), es una función del peligro o amenaza y de la vulnerabilidad, es decir,  $R = f(P, V)$  El riesgo no puede ser nulo dentro de la zona de inundación y su zonificación debe revisarse periódicamente

Se contemplan tres niveles de riesgo Alto, Medio y Bajo.

Para establecer el riesgo correspondiente a cada combinación entre peligro y vulnerabilidad, la autora propone los siguientes niveles de riesgo con base en los niveles sugeridos para el peligro y la vulnerabilidad. Tabla (V 11)

| Peligro/Vulnerabilidad | Alto | Medio | Bajo  |
|------------------------|------|-------|-------|
| Alto                   | Alto | Alto  | Medio |
| Medio                  | Alto | Medio | Medio |
| Bajo                   | Alto | Medio | Bajo  |

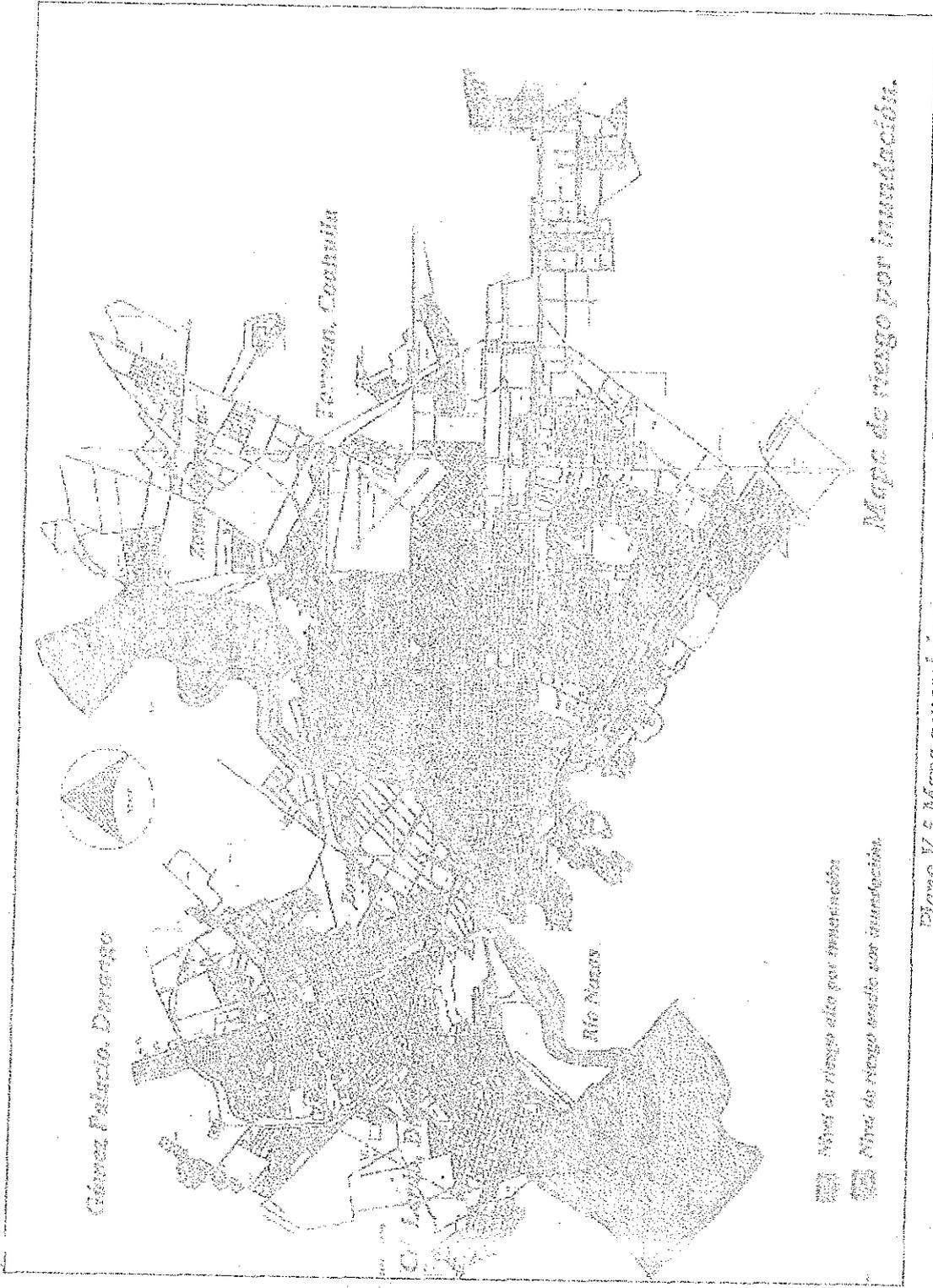
Tabla V.11. Niveles de riesgo propuestos por la autora.

Se entiende por Riesgo Alto, aquel que la capacidad de predicción y evaluación es incompleta, representando un alto peligro y vulnerabilidad con difícil mitigabilidad.

Riesgo Medio produce daño físico inclusive pérdidas humanas, heridos, pérdida de infraestructura básica, que se puede en algunos casos mitigar.

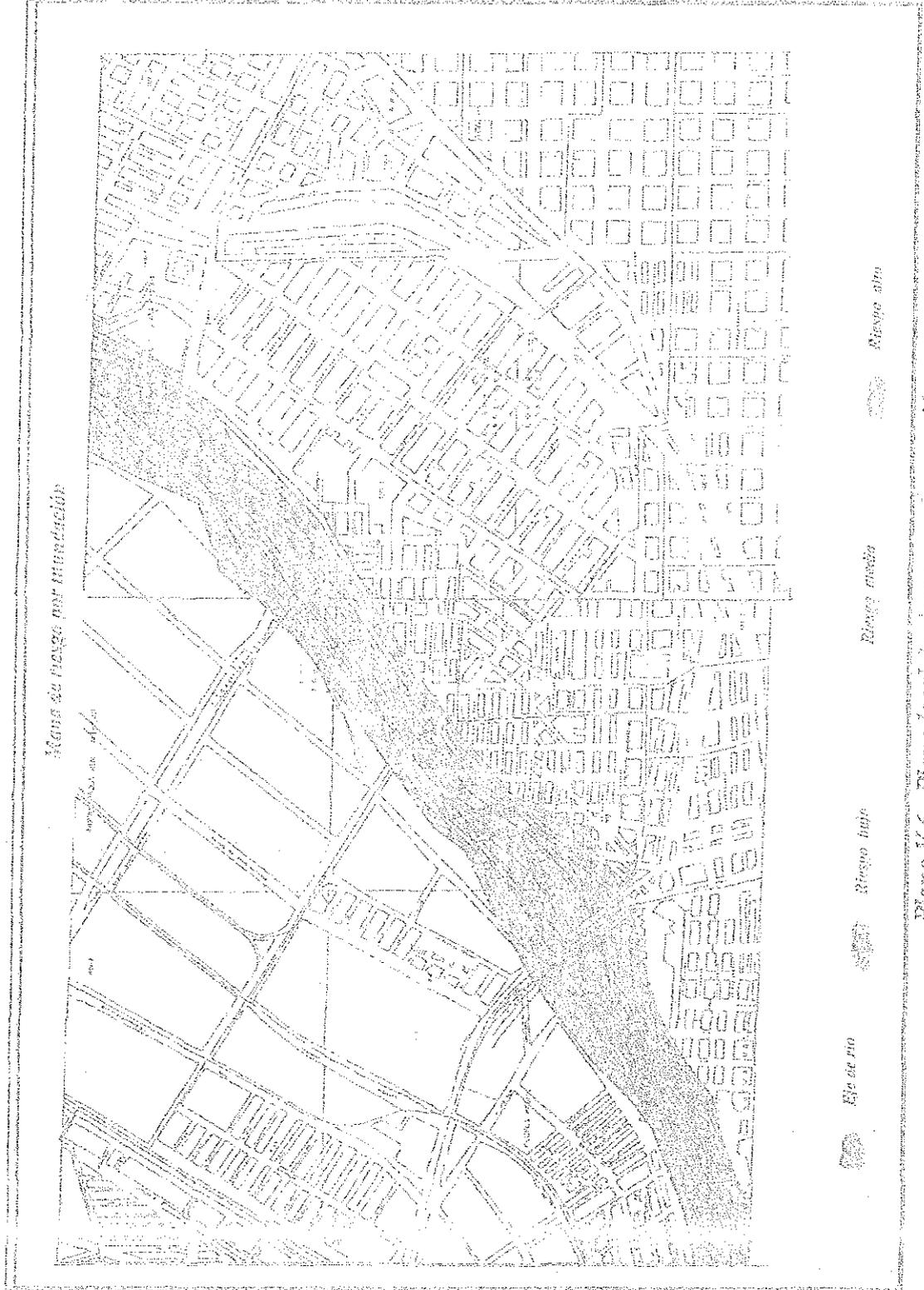
Riesgo Bajo, genera consecuencias sociales y económicas bajas y cuyo origen se puede evitar o anular con medidas técnicas, económicas y sociales factibles, con fácil mitigabilidad

Los planos V 5 y V 6, muestran un mapa general y local respectivamente con la zonificación con los niveles de riesgo propuestos



Plano V.5 Mapa general de riesgo por inundación

TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN



Áreas de riesgo por inundación

Plano V.6 Plano local de riesgos por inundación.

**TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN**

## COMENTARIOS FINALES CONSIDERANDO LOS NIVELES DE PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO EN LA ZONA.

Las localidades de Torreón, Gómez Palacio y Cd. Lerdo presentan diferentes tipos de suelo, que van desde el uso agrícola, ganadero, uso industrial, uso habitacional, etc. El resultado del estudio muestra amenazas de inundación muy cercanas al cauce natural de río, que involucra zonas industriales, habitacionales y algunas de uso agrícola, lo que implica la necesidad de trazar políticas de desarrollo urbano, orientadas a corregir y regular la ocupación de las zonas de riesgo.

Para aminorar los daños causados por las inundaciones es esencial formular las estrategias de manejo y prevención de desastres, el primer paso es delinear la inundación identificando la naturaleza y extensión del problema, presentando los mapas con la zonificación, tal como se realizó en este trabajo, mostrando si es posible condiciones de inundación ocurridas anteriormente, información de los efectos económicos directos como disminución de costos de algunas propiedades o paralización del desarrollo en áreas con alto riesgo de inundación.

Se sugiere realizar un estudio de factibilidad económica y técnica, mediante el cual se pueda definir la viabilidad de la canalización del río Nazas en por lo menos la zona urbana.

Revisar la capacidad de los canales de desvío para tener suficiente capacidad hidráulica y con base en los volúmenes esperados modificar algunas secciones transversales.

Generar un plan de trabajo que establezca que deberá darse prioridad a la recepción de información hidrometeorológica, procedentes de las diferentes fuentes de comunicación establecidas en la cuenca en sitios estratégicos, completando de esta forma medidas preventivas que permitan tomar decisiones firmes en la operación de las obras hidráulicas para reducir los riesgos cuando se presenten avenidas extraordinarias.

Sabemos que la prevención de desastres y las acciones de alerta, consisten en un amplio rango de medidas, algunas a largo plazo y otras a corto plazo, con el único propósito de salvar vidas y limitar la pérdida de daños materiales.

Es necesario comentar que los daños por inundación se incrementarán debido al crecimiento demográfico y a la serie de inversiones que trae consigo este desarrollo.

Finalmente, por otro lado los desbordamientos en general pueden ser beneficios para la región ya que parte de los mismos contribuyen directa e indirectamente a la recarga del acuífero y el resto poder almacenarse para futuros usos en la agricultura.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## CAPITULO VI.

### MEDIDAS ESTRUCTURALES Y NO ESTRUCTURALES.

#### MEDIDAS DE PROTECCIÓN.

*Para mitigar los daños causados por las inundaciones, es posible desarrollar una serie de medidas de protección, dichas medidas pueden clasificarse en estructurales y no estructurales o institucionales. En general es conveniente el uso conjunto de ambos tipos de medidas*

*Las medidas estructurales están constituidas por cualquier obra hidráulica destinada al control de las inundaciones. De acuerdo con su función puede dividirse en:*

- a) *Obras de Regulación. Son fundamentalmente las presas que permiten almacenar temporalmente las lluvias para después descargarlas en forma gradual*
- b) *Obras cuya función es facilitar el transporte rápido del agua, disminuyendo el tirante de agua en ríos y canales para evitar que se desborden. Algunas de ellas son la rectificación de cauces, el corte de meandros y en general los conductos de drenaje construídos artificialmente.*
- c) *Bordos de protección. Su función es confinar el agua dentro del cauce del río o evitar que la inundación alcance poblaciones o zonas de gran importancia económica*

*El objetivo de las medidas no estructurales o institucionales más que evitar las inundaciones es disminuir los daños que causan, pueden clasificarse en:*

- a) *Medidas de operación. Se utilizan cuando se presenta un fenómeno meteorológico que puede causar una inundación. Se instrumentan de acuerdo con los pronósticos y, por ello, su efectividad depende de la precisión de dichos pronósticos. Las principales medidas de este tipo son: La difusión de boletines de alerta la operación de la infraestructura hidráulica y la evacuación de personas y bienes afectables*
- b) *Medidas permanentes. Están constituidos básicamente por la reglamentación y control del uso de suelo, con el propósito de evitar que los bienes de mayor valor económico o social se ubiquen en zonas sujetas a riesgo de inundación*



## VI.1 MEDIDAS ESTRUCTURALES.

Las obras de protección que permiten proteger personas y sus bienes ante posibles inundaciones provocadas por lluvia son:

Tuberías o canales de drenaje.

Lagunas de regulación

Diques

La mayoría de las obras que garantizan totalmente que su capacidad no sea rebasada, resultan demasiado costosas, por lo que el diseño tiene que conciliar el grado de protección que se proporcione con el costo de la obra

De acuerdo con estas ideas, los estudios previos al diseño de las obras de protección contra avenidas deben comprender los siguientes conceptos

a) Determinación del grado de protección adecuado.

Este problema es esencialmente económico, tradicionalmente se ha resuelto a partir de experiencias empíricas utilizando tablas en las que se determina el periodo de retorno o la probabilidad de la avenida que debe manejar la obra. Los estudiosos que abordan este problema en sus aspectos más amplios los llaman criterios de riesgo y permiten determinar el periodo de retorno adecuado a cada problema en particular

b) Determinación de la tormenta de diseño.

A diferencia de las cuencas naturales para las que en muchas ocasiones el diseño se basa directamente en el análisis estadístico de los escurrimientos, en las cuencas urbanas, por su carácter cambiante es necesario trabajar primero con las lluvias y determinar una tormenta de diseño, es decir, una tormenta cuyo periodo de retorno corresponda al determinado por el inciso anterior para después, con las características específicas que tendrá la cuenca ya urbanizada, obtener el hidrograma de diseño

c) El cálculo de la avenida de diseño concluye con la transformación de la tormenta, definida en el inciso anterior, en un hidrograma. Esta transformación deberá tomar en cuenta las características naturales de la cuenca en estudio, por una parte, y por la otra, las derivadas de la urbanización (porcentaje de agua impermeable, conexiones con el sistema de drenaje artificial, características de éste).

La finalidad de las obras para controlar inundaciones en zonas urbanas es evitar los daños provocados por las crecientes, ya sea los daños directos a personas o propiedades o efectos indirectos que impiden el desarrollo de las actividades normales en la ciudad (de estos últimos, el más habitual es el que se ocasiona por el tráfico de vehículos que se intermite cuando se causa el tráfico de vehículos y los problemas de sanidad derivados del manejo de



aguas negras combinadas con las de lluvia, azolve rápido de alcantarillas entre otros más

Para cumplir esa finalidad se diseñan obras de embalse o regulación, de protección o de conducción; sin embargo, por su costo, generalmente no se construyen de una magnitud tan grande como para evitar los daños que puedan causar todas las posibles crecientes. El problema de conocer el grado de protección adecuado, y por tanto, la magnitud de las obras de drenaje es en esencia un problema económico cuya solución consiste en obtener el máximo beneficio posible, esto es, disminuir al mínimo posible la vulnerabilidad de la inundación provocados por las crecientes al menor costo

La práctica usual consiste en asignar el peligro aceptable en términos del período de retorno de la avenida máxima que pueda manejar la obra sin causar daños. Dicha práctica tiene inconvenientes, entre los que destacan los siguientes:

- a) No se toma en cuenta explícitamente la magnitud de los daños que podrían causar avenidas mayores que las de diseño
- b) No siempre es correcto extrapolar las experiencias que se tienen como resultado de los diseños en determinado tipo de urbanización con lecho fluvial a otro diferente sin río

Se pueden mencionar tres métodos diferentes para estimar el riesgo que debe aceptarse como el adecuado:

- 1. Determinación del criterio de riesgo mediante una relación entre el valor monetario de beneficios y costos.
- 2. Determinación del criterio de riesgo mediante una relación directa entre el tipo de obra y el período de retorno. Metodología tradicional
- 3. Determinación del criterio de riesgo mediante simulación

## VI.2. MEDIDAS NO ESTRUCTURALES.

La salvaguarda de los asentamientos humanos, áreas productivas y medio ambiente frente a desastres ha cobrado especial relevancia en las últimas décadas debido a la notable tendencia de crecimiento tanto en magnitud como en frecuencia de los daños asociados a los desastres. Esta tendencia es usualmente explicada por dos causas fundamentales; la primera es el exorbitado crecimiento demográfico, que ocasiona un aumento en la población expuesta al riesgo, y por tanto un incremento en los daños ante el mismo evento y la segunda a su concentración en grandes urbes, con el consecuente aumento en la complejidad de los servicios urbanos tradicionalmente insuficientes para cubrir a la creciente demanda y por ende, una mayor vulnerabilidad de la población.

*Adicionalmente, la marginación de grandes núcleos de población en los países en vías de desarrollo los coloca en una situación de alta propensión a desastres, por lo que deben estar en estado de alerta en forma permanente.*

*Consecuentemente, es necesario considerar la vulnerabilidad de la población como la causa real de los desastres, ya que si bien un estado de daños puede ser provocado por un fenómeno natural, los asentamientos humanos sufrirían menos si estuvieran preparados para resistirlo.*

*En este contexto resulta claro que para combatir eficazmente los desastres es necesario desarrollar un enfoque de organización y planeación que considere las condiciones inadecuadas de los asentamientos urbanos como la principal causa de los desastres y prevea la realización de las actividades pertinentes antes, durante y después de los desastres.*

*El marco conceptual utilizado para el planteamiento de la metodología general de pronóstico de daños constituye la base fundamental para la investigación interdisciplinaria de desastres.*

*La distinción entre eventos perturbadores y los propios estados de daño constituye un punto inicial para la elaboración de las normas.*

### **VII.3 PLAN PARA LA ATENCIÓN DE EMERGENCIAS CAUSADAS POR INUNDACIONES DEL RÍO NAZAS.**

*Una de las medidas para mitigar el peligro por inundación en la zona son las no estructurales o institucionales, por lo que se propone un plan de atención de emergencias local que será conformado por los siguientes aspectos.*

- *Información.*
- *Propósito.*
- *Esquema para la evacuación.*
- *Información necesaria para la coordinación.*
- *Misiones de cada dependencia participante.*
- *Comunicaciones.*

*Información.*

- 1 *Para la aplicación del presente plan se considerara el nivel de la emergencia de acuerdo con un semáforo en la forma siguiente  
Color verde, en este caso la población se mantendrá realizando sus actividades normales  
Color amarillo, en esta situación se alertara a la población, a través de la televisión y la radio, y haciendo uso de altavoces, sobre una probable inundación, por lo que deberán mantenerse informados, así como estar preparados para llevar a cabo una evacuación en caso necesario  
Color rojo, se activara ante la inminente situación de una inundación, por lo que en esta fase se informara a la población afectada, de acuerdo con los niveles de inundación esperados, sobre la necesidad de evacuar sus hogares, y proceder conforme se lo indique la autoridad correspondiente.*
- 2 *Los niveles de inundación esperados serán conforme a la tabla VI 1*
- 3 - *A continuación se enlistan un conjunto de colonias y calles que se verán afectadas por la inundación de acuerdo con los gastos que se indican (Tabla VI 2).*
- 4 *En el caso del presente plan participaran las autoridades involucradas a nivel municipal (Gobiernos Municipales, Protección Civil, Sedena, Policías Municipales, Sep, Secretaría de Salud y Delegaciones Municipales que residan en las zonas afectadas), debiendo solicitar el apoyo necesario estatal o federal en caso de ser necesario como lo marca el Sistema Nacional de Protección Civil, a través del Sistema de Alerta Temprana*

*Propósito.*

*El proposito del presente plan es el establecer las acciones que deberán llevar a cabo las autoridades correspondientes, para evacuar con seguridad y orden, a los sectores de la población afectada por una inundación, en el área de estudio, instalandolos en albergues.*

*Esto se realizará una vez que las autoridades de Protección Civil Municipales en coordinación con los municipios correspondientes, reciban la señal de emergencia, de una inminente inundación, para lo cual informaran a la población de acuerdo con las indicaciones del semáforo*



| Nivel de Inundación | Efectos  | Gasto esperado (m³/s) | Color del semáforo |
|---------------------|--|-----------------------|--------------------|
| Baja                | Provoca ciertos inconvenientes menores, tales como cierre de caminos no muy importantes                                    | menor de 350          | Amarillo           |
| Media               | Se considera que las áreas topográficas bajas son inundadas, requiriendo la evacuación de algunas casas                    | $350 < Q < 1000$      | Rojo               |
| Alta                | Se presenta la inundación en áreas extensas tanto rurales como urbanas, provocando el aislamiento completo de propiedades. | $Q > 1000$            | Rojo               |

Tabla VI.1 Niveles de peligro por inundación.

| Municipio | Colonia       | Calle           | Gasto                     |
|-----------|---------------|-----------------|---------------------------|
| Torreón   |               | Escuadrón 201   | A, B, C, D <sup>***</sup> |
|           | Plan de Ayala | Lázaro Cárdenas | A, B, C, D                |

| Municipio        | Colonia                       | Calle  | Gasto  |
|------------------|-------------------------------|--|--|
|                  | Moderna                       | Av. Mendoza<br>San Martín<br>Av. Villanueva<br>Saitillo<br>Durango<br>San Antonio<br>Chapultepec<br>Los Angeles<br>Av. 4 de octubre<br>Av. Vista hermosa | B, C, D<br><br><br><br><br><br><br><br><br>D |
|                  | Aguirre<br>Maldonado          | J. Dominguez<br>Ceniceros<br>Escuadrón 201<br>Potrero del llano<br>Emiliano zapata   | D<br>D                                       |
|                  | Villa jardín                  | La Salle<br>Los Naranjos<br>Creel<br>Muñoz<br>J. Cuco<br>Alamos<br>Encinos   | D<br>D<br><br><br><br><br>D                  |
|                  | Los Nogales                   | Fco. Zarco<br>Lázaro Cárdenas<br>Presa la angostura<br>U a n e   | D<br>C, D<br>D<br>A, B, C, D                 |
| Gómez<br>Palacio | Parque industrial<br>Iagunero | Simón Bolívar<br>Tamazula  | D<br>D                                       |
|                  | Perez Rios                    | Canatlán   | D  |
|                  | Del Consuelo                  | Limites de la co.  | D  |
| Cd. Lerdo        | Las Brisas                    | Las brisas   | D  |

Tabla VI.2 Calles y colonias afectadas con base en el gasto presentado.

\*\* A=350 m<sup>3</sup>/s, B=600 m<sup>3</sup>/s, C=1000 m<sup>3</sup>/s, D=1800 m<sup>3</sup>/s

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

*Esquema para la evacuación.*

- 1 La Comisión Nacional del Agua será la responsable de monitorear permanentemente las posibles condiciones de una inundación, e informara a las autoridades de Protección Civil para que avisen a la población, e inicien la coordinación necesaria con los organismos involucrados, a fin de estar en condiciones de llevar a cabo las acciones que a cada uno correspondan

La información que proporcione la CNA deberá contener todos los datos necesarios que puedan permitir identificar los alcances de la emergencia (elaborar un formato para la información que debe de contener un reporte de la c n a )

- 2 Las autoridades de Protección Civil serán las responsables de coordinar todas las acciones antes, durante y después de la emergencia, debiendo realizar también las siguientes acciones:

*Establecer rutas de evacuación con la señalización correspondiente*

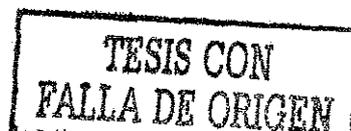
*Informar oportunamente a la población a través de campañas publicitarias, sobre la existencia de dichas rutas, asegurándose que todos conozcan qué hacer en caso necesario, incluyendo los albergues que les corresponderán de acuerdo con su ubicación.*

*Elaborará una relación de las instalaciones que podrán ser utilizadas como albergues, estableciendo su capacidad, y definiendo a que sector de la población afectada le corresponderá, informándolo igualmente*

*Establecerá la coordinación necesaria con los encargados de cada lugar designado como albergue, a fin de que en su momento, estos sean activados y puedan proporcionar las condiciones necesarias*

*Coordinarán con las dependencias gubernamentales y particulares, sobre la disponibilidad de vehículos para transporte de las personas afectadas, estableciendo de antemano la cantidad y el lugar en que deberán encontrarse al momento de la evacuación, para transportar a los albergues a la población que no pueda hacerlo con sus propios medios*

*Se coordinará con las unidades del ejército y la policía del lugar, sobre las posibles acciones de rescate en los lugares inundados, así como del equipo y materiales necesarios para llevarlo a cabo. También se dictaran las acciones previas necesarias para el tránsito de la población afectada, para facilitar las labores de control de tránsito durante la evacuación*



*Establecerán coordinación con las autoridades de salud, a fin de determinar los recursos humanos y materiales que serán necesarios para atender a la población afectada en los albergues, así como a heridos y personas que requieran ser trasladados a instalaciones hospitalarias de nivel superior*

*Definirán los puntos de reunión a los que deberá acudir la población en caso de evacuación*

*Deberán coordinar la colocación de un puesto de recolección de información de personas extraviadas, heridas, así como de posibles cadáveres, para llevar control y tomar en su momento las medidas necesarias en cada caso particular. Así como coordinar con los medios de comunicación locales, las medidas para que en los momentos necesarios puedan éstos informar a la población sobre la emergencia*

3 *Todas las dependencias participantes deberán contar con la misma información sobre las acciones que a cada una le corresponde, a fin de evitar confusiones o duplicidad de funciones en el momento de aplicar el plan para la emergencia.*

4 *Se establecerá un punto de mando en donde se encuentre un responsable de cada dependencia que sirva como enlace, a fin de que todas las actividades durante la emergencia tengan control y seguimiento*

#### *Información necesaria para la coordinación.*

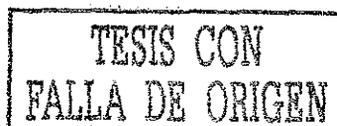
*Es necesario que todas las dependencias participantes cuenten con la siguiente información previamente a cualquier emergencia*

1 - *Plano de los municipios afectados con las rutas de evacuación*

2 - *Plano con la localización de albergues, así como su capacidad y a que sector de la población darán atención*

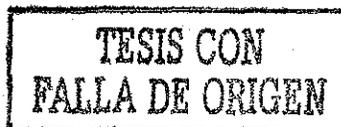
3 - *Plano con la localización de vehículos disponibles para la evacuación.*

4 - *Cuadro de control de vehículos disponibles por dependencias, y de particulares que podrán emplearse durante la emergencia, especificando la ubicación donde deberán encontrarse para apoyar la evacuación. Esta información deberá elaborarse con base en las estimaciones de personas que serán evacuadas*



*Misiones de cada dependencia participante.*

- 1 - *Comisión Nacional del Agua.*  
*Será la encargada de monitorear antes, durante y después de una inundación las condiciones que prevelezcan, así como de informar oportunamente a las autoridades de Protección Civil, para que esta con base en la información proporcionada active el color del semáforo según corresponda.*
- 2 - *Autoridades de Protección Civil.*  
*Serán los responsables de coordinar todas las actividades antes, durante y después de una inundación con todas las dependencias participantes. Informaran a población civil sobre el desarrollo de la emergencia*
- 3 - *Secretaría de la Defensa Nacional.*  
*Con las unidades militares cercanas al lugar de la inundación apoyaran proporcionando vehículos y personal para la evacuación. Participara llevando a cabo funciones de rescate, control de tránsito en las rutas de evacuación, y apoyando en la activación de albergues. Realizaran las acciones necesarias a fin de evitar el pillaje en las zonas afectadas*
- 4 - *Secretaría de Salud*  
*Con sus órganos municipales en las zonas afectadas, serán los encargados de planear los recursos humanos y materiales necesarios, para apoyar a la población en la emergencia. Se encargaran de dar atención a la población antes, durante y después de la inundación, así como de evacuar a instalaciones hospitalarias de mayor nivel a los heridos e enfermos que lo requieran.*
- 5 - *Gobiernos municipales.*  
*Serán encargados junto con las autoridades de Protección Civil de coordinar las acciones antes, durante y después de la inundación. Serán responsables de la activación y control de los albergues que se establezcan para atención de la población afectada.*
- 6 - *Secretaría de Desarrollo Social.*  
*Se encargara de hacer una evaluación de los daños ocasionados por las inundaciones, a fin de dictaminar sobre los apoyos que requiera la población afectada en materia de reconstrucción de sus bienes*
- 7 - *Folicías municipales*  
*Se encargaran junto con el ejército de controlar el tránsito, durante la evacuación, a fin de evitar accidentes o congestionamientos*



*que retrasen u obstaculicen la circulación*

*Serán responsables junto con el ejército de evitar pillajes en las zonas afectadas.*

*Comunicaciones.*

*Se deberá contar con un directorio telefónico (incluyendo teléfonos de oficina, particulares y celulares) de los funcionarios responsables de cada una de las siguientes dependencias, con la finalidad de localizarlos en caso de emergencia.*

- 1 Protección Civil.*
- 2 Presidencia Municipal*
- 3 Secretaría de la Defensa Nacional*
- 4 Comisión Nacional del Agua*
- 5 Secretaría de Medio Ambiente y Ecología*
- 6 Comisión Federal de Electricidad*
- 7 Secretaría de Desarrollo Social*
- 8 Secretaría de Educación Pública.*
- 9 Secretaría de Comunicaciones y Transportes*
- 10 Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca*
- 11 Secretaría de Salud*
- 12 Principales medios de comunicación*



## CAPÍTULO VII.

### APLICACIÓN DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE EN EL CASO DE LA COMARCA LAGUNERA.

Este capítulo tiene como finalidad mostrar un ejemplo de aplicación a un caso real realizado con las imágenes de satélite, presentando dos aplicaciones directas a las mismas, por lo que la estructura del capítulo se ha dividido en:

- 1 - Análisis de peligro, vulnerabilidad y riesgo en la zona
- 2 - Análisis multitemporal de atributos

#### VII.1 ANÁLISIS DE PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO EN LA ZONA.

A diferencia del tema tratado en el capítulo V, el análisis que se expondrá es un esquema cualitativo del peligro, vulnerabilidad y riesgo en la región, utilizando los contenidos de las imágenes de satélite.

En este caso es importante mencionar que los conceptos de peligro, vulnerabilidad y riesgo, tienen un ámbito regional, es decir, en el caso de peligro, se contempla la inundación, los deslizamientos de tierra generados por la topografía del lugar, así como la existencia de los ríos, y en el caso de la vulnerabilidad se incluyen tanto a las ciudades principales como a los caminos más importantes, generando así diferentes niveles de riesgo que los presentados en el tema de zonificación.

El análisis utilizó los siguientes mapas digitalizados:

- Plano con las principales ciudades (Torreón, Gómez Palacio y Cd. Lerdo)
- Plano con localización de zonas inundables.
- Plano con ubicación de ríos en la zona
- Mapa de carreteras más importantes de la zona
- Plano con la topografía del lugar.

Dichos planos se homologaron con las coordenadas geográficas de las imágenes de satélite.

Asimismo, se ocuparon las imágenes en falso color de la década de los '90, por ser la más actualizada.

El procesamiento de análisis se realizó en tres etapas:

- 1.- Creando un mapa de peligro
- 2.- Creando un mapa de vulnerabilidad y
- 3.- Creando un mapa de riesgos

#### *Creación del mapa de peligro.*

Para poder generar este tipo de mapa, se debe partir de establecer un grado de peligro en una cierta área, como resultado de una combinación de factores, éstos, pueden ser analizados separadamente e intuirán en el grado de peligro. (por ejemplo, una zona con un alto grado de sismicidad tendrá por lo tanto mayor peligro de deslizamientos de terreno)

Cada uno de estos factores se presentarán directamente en los mapas, describiendo la peligrosidad del fenómeno

Los fenómenos que se tomarán en cuenta en este ejercicio serán:

- Peligro de inundación
- Regiones topográficas
- Ubicación de ríos.

Definidos los fenómenos, el siguiente paso será combinar dicha información asignando un peso a los diferentes tipos de peligro, asumiendo que el impacto de los mismos no es igual cuando se considera su importancia al producir un daño

En realidad, al asignar un peso al peligro, se puede caer en una clasificación altamente subjetiva lo cual será como consecuencia que cada persona pueda asignar valores diferentes.

Al momento que se asigna un peso a los mapas, dichos mapas se convertirán en mapas de peso, por lo tanto se ha asignado los siguientes valores a los mapas en estudio, en función de la distancia que existe entre los fenómenos que intervienen en el estudio y la zona urbana en cuestión.

La Tabla VII.1 muestra los pesos sugeridos por la autora para considerar el peligro por inundación.

La Tabla VII.2, contempla el peligro producido por la existencia de los ríos

Finalmente, la tabla VII.3, propone los pesos asignados a la topografía con base en la

| Mapa de Peligro | Peso asignado |
|-----------------|---------------|
| Aguanaval       | 10            |
| Nazas           | 10            |
| Nazas I         | 5             |

Tabla VII.1 Pesos asignados por peligro de inundación.

| Mapa      | Peso asignado |
|-----------|---------------|
| Aguanaval | 4             |
| Nazas     | 4             |

Tabla VII.2 Pesos asignados por peligro que implica la existencia del río

| Mapa                  | Peso asignado |
|-----------------------|---------------|
| Sierra el Jacúcy      | 7             |
| Sierra el Sarnoso     | 6             |
| Sierra España         | 2             |
| Sierra Jimulco        | 1             |
| Sierra Las Noas       | 4             |
| Sierra Patrón         | 1             |
| Sierra San Lorenzo    | 1             |
| Sierra San Lorenzo II | 3             |

Tabla VII.3 Pesos asignados por peligro producido por los relieves.

La figura VII.1 muestra un ejemplo de aplicación de peso a un plano individual

Definidos los mapas de peligro con su correspondiente peso, la siguiente fase es la combinación de los mapas individuales.

Dicha combinación se realiza sumando cada uno de los mapas y generando el mapa de peligro en la zona (fig. VII.2).

Para poder establecer un rango de peligro que vaya desde una clase con peligro muy bajo hasta un peligro muy alto. Se tendrá que analizar su histograma, por lo que la autora propone los niveles de peligro con base en los pesos asignados. Table VII 4

| Niveles de peligro | Valores de pesos asignados |
|--------------------|----------------------------|
| Muy bajo           | 0-5                        |
| Bajo               | 5-7                        |
| Moderado           | 7-10                       |
| Alto               | 10-12                      |
| Muy alto           | 12-14                      |

Tabla VII.4 Niveles de peligro propuestos.

#### Creación del mapa de vulnerabilidad.

En este subtema analizaremos los datos para establecer un análisis de vulnerabilidad. Sin perder de vista que lo que se pretende obtener en una escala global es un mapa de riesgos cualitativo, desplegando las áreas donde hay una alta probabilidad de que se presente un desastre.

Por lo tanto, la vulnerabilidad es el grado de pérdida debido a un conjunto de elementos de riesgo, debido a la ocurrencia de un fenómeno.

Los principales elementos de riesgo son población, propiedades, actividades económicas y otros.

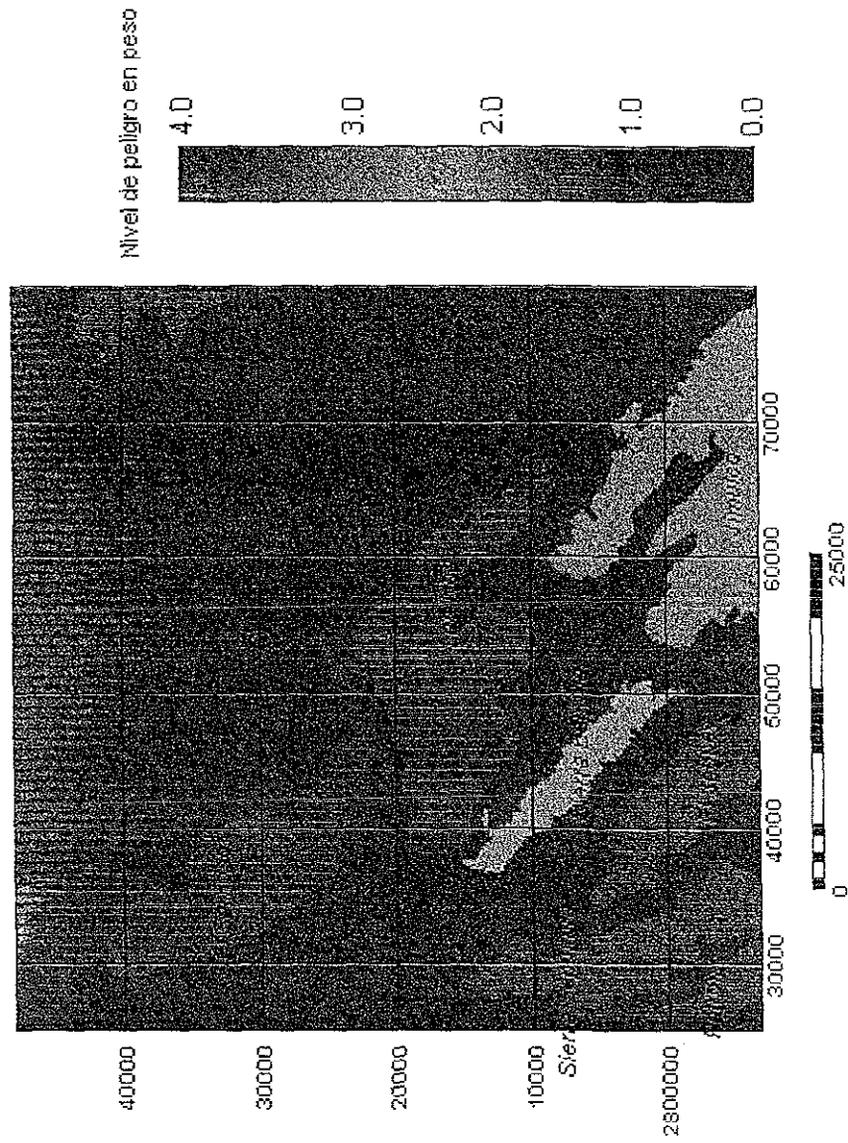
El mapa de vulnerabilidad puede ser obtenido con el mismo procedimiento seguido en el mapa de peligro, esto es, asignando peso a cada uno de los factores de vulnerabilidad y resumiendo todas ellas en un solo mapa.

Los mapas que fueron utilizados son

- Ciudades principales
- Caminos principales

Se asigna un valor de vulnerabilidad a cada elemento. El signo de vulnerabilidad en una escala de 1 a 10, siendo 10 el valor con mayor vulnerabilidad y 1 el de menor vulnerabilidad.

Peso asignado a la topografía.

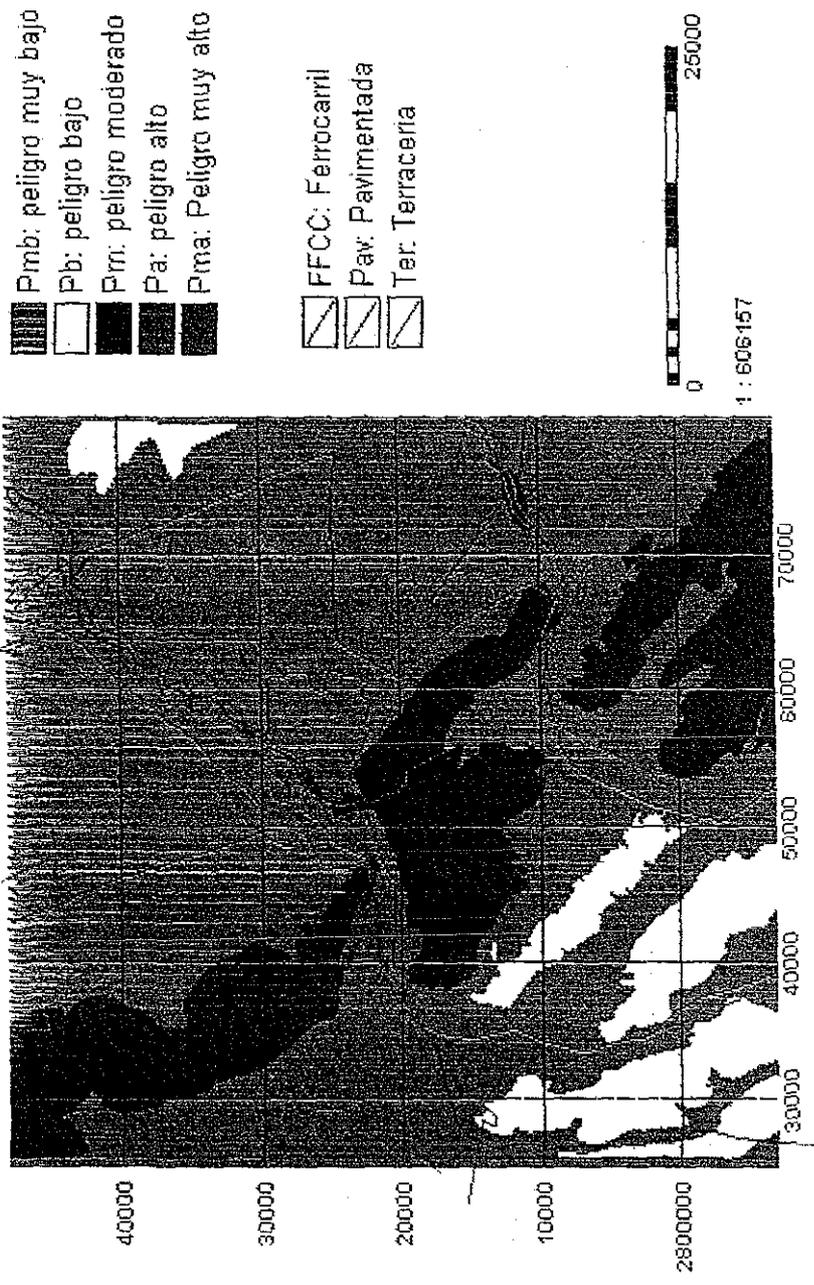


TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN

1 : 606157

Fig. VII.1 Plano con peso asignado a la topografía.

# MAPA DE PELIGRO EN LA COMARCA LAGUNERA.



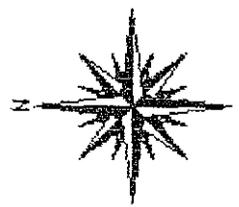
- Pmb: peligro muy bajo
- Pb: peligro bajo
- Pm: peligro moderado
- Pa: peligro alto
- Pma: Peligro muy alto

- FFCC: Ferrocarril
- Pav: Pavimentada
- Ter: Terraceria



1 : 606157

- Ag: Aguanaval
- Na: Nazas
- To: torreón
- CdL: Lerdo
- GP: GomezP



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Realizó: M.I. Ma. del Rosío Ruiz Urbano

Fig. VII.2 Mapa de Niveles de peligro en la región.

La tabla VII 5 presenta los pesos sugeridos para la vulnerabilidad producida por los caminos:

| Tipos de caminos | Peso sugerido |
|------------------|---------------|
| Terracería       | 5             |
| Pavimentado      | 10            |
| FF.CC.           | 7             |

Tabla VII 5. Vulnerabilidad en los caminos.

Para las ciudades (Tabla VII 6)

| Ciudad        | Peso sugerido |
|---------------|---------------|
| Torreón       | 10            |
| Gómez Palacio | 10            |
| Có Lerdo      | 7             |

Tabla VII 6. Vulnerabilidad en las ciudades.

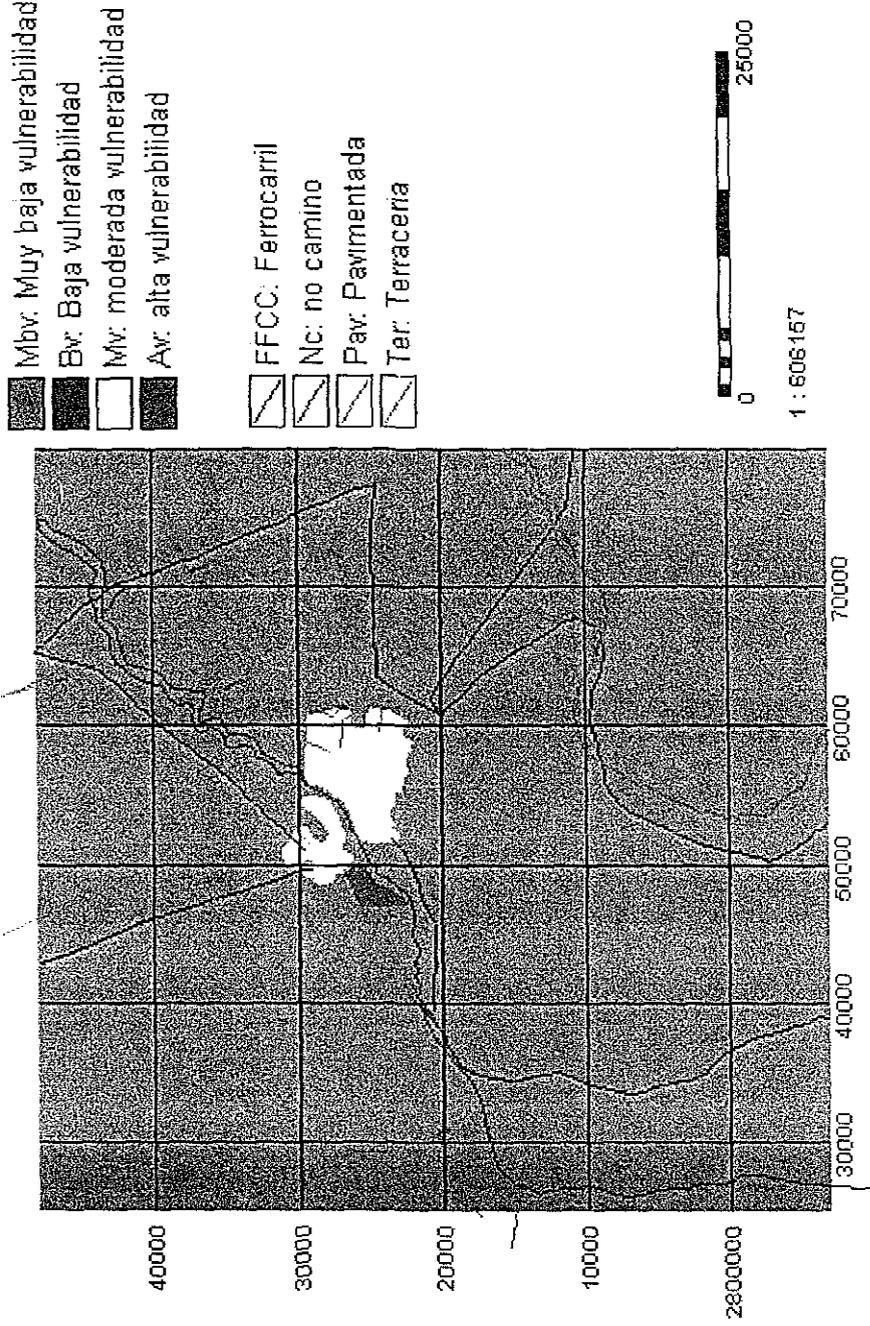
Posteriormente, la tabla VII 7 combina los factores hasta obtener el mapa general de vulnerabilidad y se analiza su histograma para definir los niveles de vulnerabilidad con base en las clases.

| Niveles de vulnerabilidad | Rango de pesos sugeridos |
|---------------------------|--------------------------|
| Muy baja                  | 0-5                      |
| Baja                      | 5-9                      |
| Moderada                  | 9-14                     |
| Alta                      | 14-20                    |

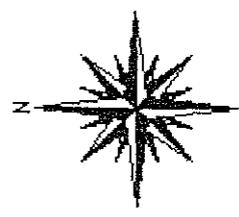
Tabla VII 7 Niveles generales de vulnerabilidad en la región.

Finalmente, se obtiene el mapa de vulnerabilidad en la fig. VII. 5 con las clases definidas como sigue:

# MAPA DE VULNERABILIDAD EN LA COMARCA LAGUNERA



 Ag. Aguanaival  
 Na. Nazas



**TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN**

 Muy baja vulnerabilidad  
 Baja vulnerabilidad  
 Moderada vulnerabilidad  
 Alta vulnerabilidad

 FFCC: Ferrocarril  
 Nc: no camino  
 Pav: Pavimentada  
 Ter: Terraceria



1 : 606167

Fig. VII.3 Mapa de vulnerabilidad de la región.

**MAPA DE RIESGO.**

La última etapa será la creación de un mapa de riesgos.

En un proyecto completo, esto debería de ser una multiplicación de costos. Sin embargo, en este caso como no se dispone de ellos, se realizará simplemente una combinación de peligro natural y de vulnerabilidad. Esto generará un mapa de riesgo cualitativo, lo cual se obtendrá a través de una tabla de dos dimensiones, donde se escribirán en los renglones las clases asociadas al peligro y en las columnas la vulnerabilidad.

La tabla VII.8, muestra la propuesta de la autora para la combinación del peligro y vulnerabilidad en la región.

|                     | Vulnerabilidad<br>Baja | Vulnerabilidad<br>Mediana | Vulnerabilidad<br>Alta | Vulnerabilidad<br>Muy alta |
|---------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|
| Peligro<br>Baja     | Riesgo bajo            | Riesgo bajo               | Riesgo bajo            | Riesgo bajo                |
| Peligro<br>Medio    | Riesgo bajo            | Riesgo bajo               | Riesgo bajo            | Riesgo moderado            |
| Peligro<br>Moderado | Riesgo bajo            | Riesgo bajo               | Riesgo moderado        | Riesgo alto                |
| Peligro<br>Alto     | Riesgo bajo            | Riesgo moderado           | Riesgo moderado        | Riesgo alto                |
| Peligro<br>Muy alto | Riesgo bajo            | Riesgo moderado           | Riesgo alto            | Riesgo alto                |

Tabla VII.8 Niveles de riesgo propuestos por la autora

La combinación entre clases de peligro y vulnerabilidad generará el riesgo asociado.

Dicha combinación tiene su parte subjetiva, dado que representa una combinación de factores originados con pesos subjetivos. El mapa de riesgos se presenta en la Fig VII.4



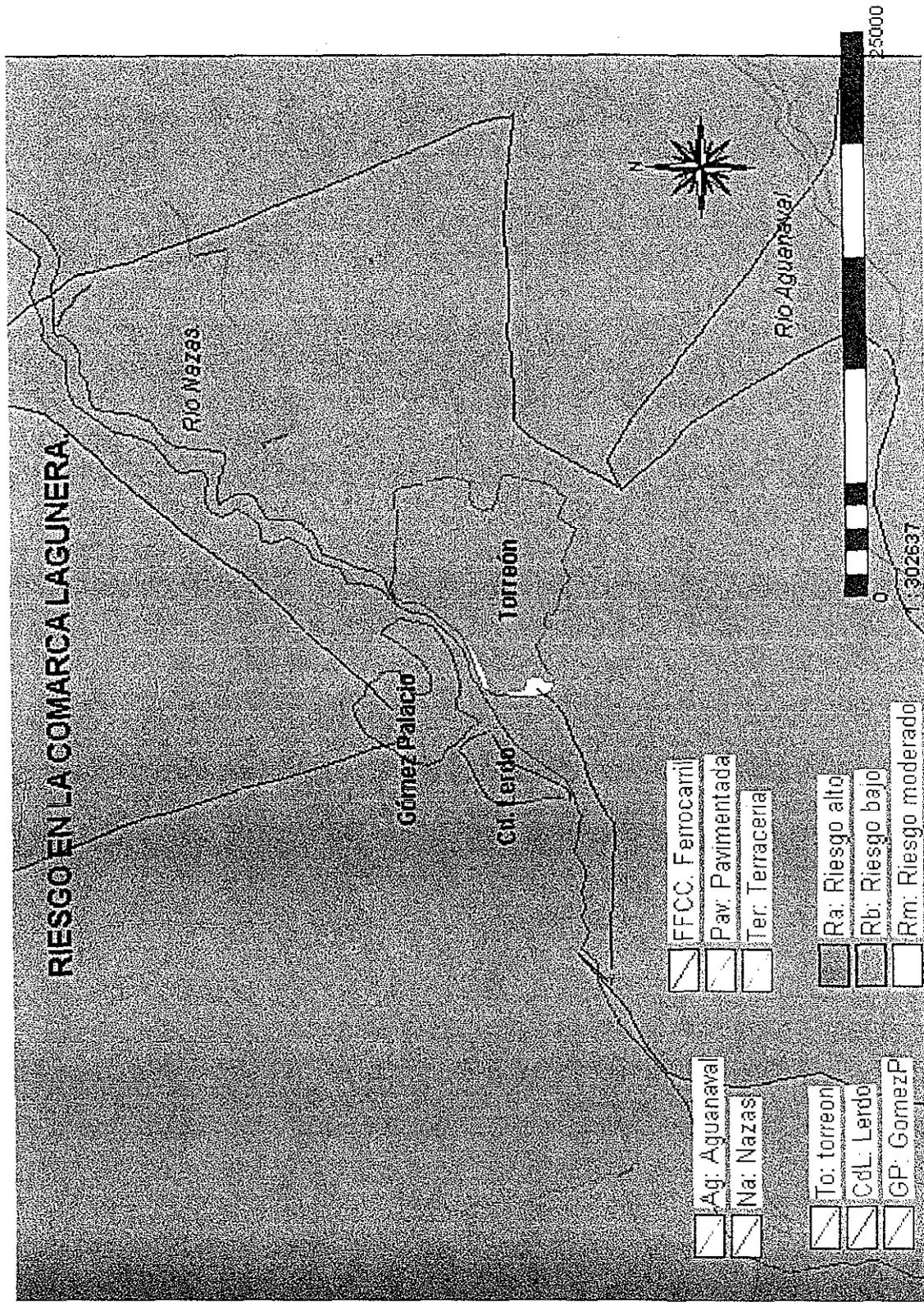


Fig. VII.4 Mapa de riesgos en la región.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ANÁLISIS DE RESULTADOS.

La creación de un mapa de riesgos no se debe considerar como el paso final en el manejo de desastres. Se debe considerar siempre como una herramienta la cual debe usarse para tomar decisiones en el proceso de planeación.

El resultado obtenido de este análisis nos permite observar que la región de acuerdo con los factores involucrados, tiene en su gran mayoría un bajo riesgo, sin embargo, esto se tiene que tomar con reserva, porque para definir con mayor precisión el resultado se tendría que trabajar con superficies más pequeñas de análisis y especificar con más detalle las variables involucradas.

Se debe poner especial atención a las zonas de alto riesgo, a fin de mitigar las consecuencias que solamente con unas políticas claras y restrictivas podrán hacerse.

Como recomendación final, el único criterio de planificación para prevenir desastres se considera que es el de peligro, ya que dicho criterio puede ser evaluado en forma cuantitativa mientras que los criterios de vulnerabilidad y riesgo son generalmente subjetivos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## VII.2 ANÁLISIS MULTITEMPORAL GEOMORFOLÓGICO DEL RÍO NAZAS Y CRECIMIENTO PoblACIONAL DE LA COMARCA LAGUNERA.

Para determinar las zonas de riesgo por inundación, es necesario contar con antecedentes tanto del crecimiento urbano como del comportamiento del cauce del río. En este subtema, se analizan los cambios urbanos con sus patrones de desarrollo espacial en la región de la Laguna, así como las principales modificaciones del lecho fluvial del río Nazas en los años 1972, 1983 y 1992.

Con base en la propuesta metodológica del capítulo II, se analiza el cambio temporal que ha sufrido la mancha urbana y se obtienen los porcentajes de crecimiento poblacional global. Asimismo, se establece el cambio temporal sufrido en el cauce del río y su comportamiento meándrico.

El procedimiento de análisis se realizó a través del procesamiento digital de las imágenes de satélites georreferenciadas, corregidas y clasificadas de acuerdo con el proceso descrito en el capítulo IV.

En el caso del análisis temporal de la mancha urbana, se trabajó con una composición en falso color completa por las bandas 5, 4 y 7 (ver figura VII.5), y para el río, la composición es la mostrada en la figura VII.6, que corresponde a la combinación 5, 6 y 7.

Se necesitó cortar las imágenes originales para ver la zona urbana y el tramo del río Nazas que atraviesa la mancha urbana.

En ambos casos, para lograr la superposición de las imágenes raster, se asignó un peso a la imagen para cada una de las clases definidas, es decir, para la zona urbana se tiene la tabla VII.9 y para el río la tabla VII.10.

| Clase          | Peso |
|----------------|------|
| Zona urbana    | 1    |
| Zona no urbana | 0    |

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Tabla VII.9. Peso que identifica el tipo de zona en la imagen raster.

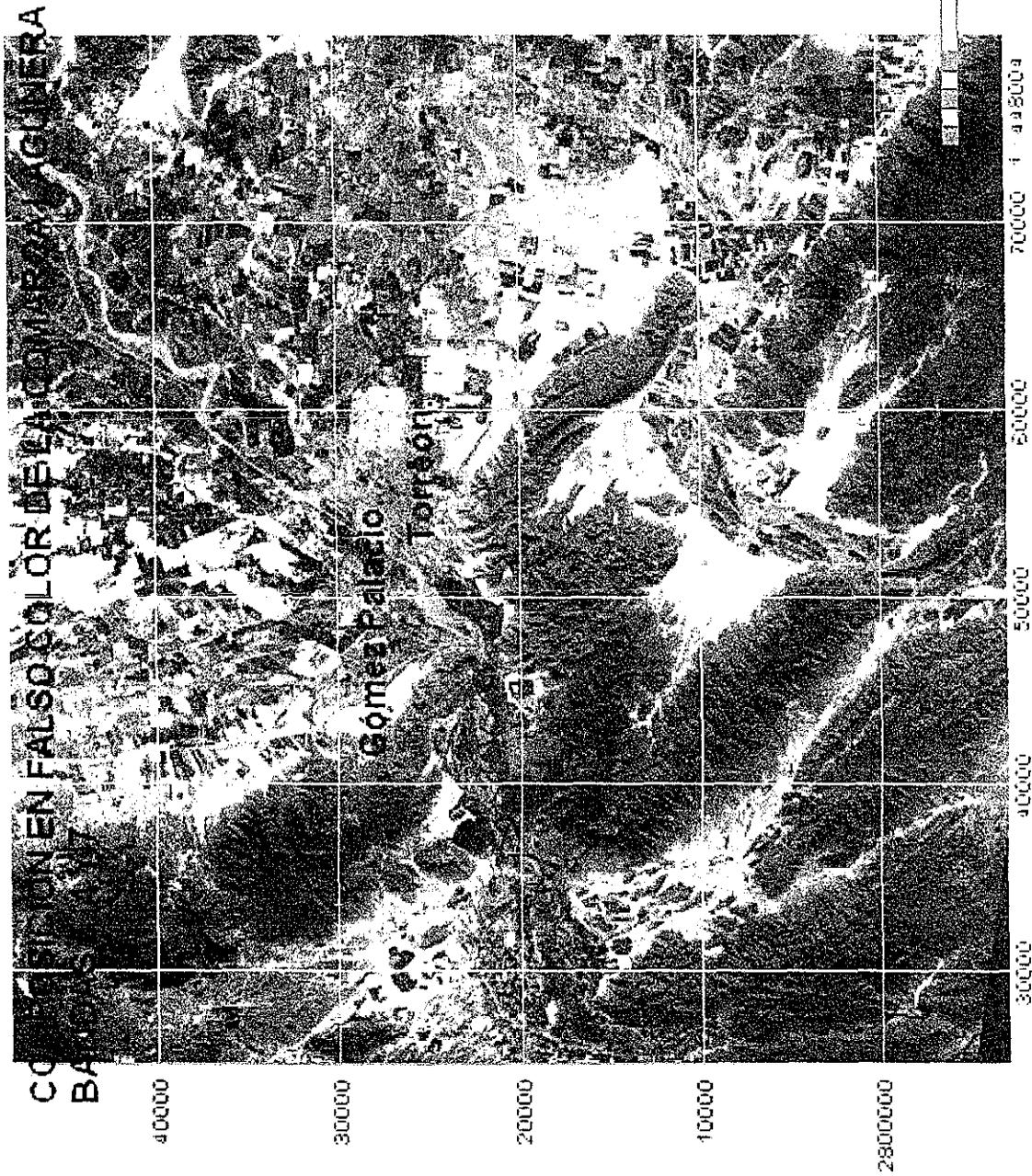


Fig. VII.5 Composición en falso color para realzar la mancha urbana.

COMUNIDAD EN FALSO COLOR DE LA COMARCA LAGUNERA.

BANDA 5 Y 7

40000

30000

20000

10000

2800000

30000

40000

50000

60000

70000

1.443004

250

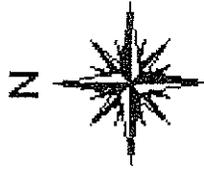


Fig. VII.6 Combinación de bandas 5, 6 y 7 para realzar el río.

Para el río.

| Clase  | Peso. |
|--------|-------|
| Río    | 1     |
| No Río | 0     |

Tabla VII.10 Pesos asignados a la imagen para identificar el río.

Estos atributos son aplicados a cada una de las bandas multiespectrales para cada una de las décadas

Al terminar este proceso, se obtienen las figuras VII.7, VII.8 y VII.9, que muestran las áreas urbanas en 1972, 1983 y 1992 respectivamente, mientras la figura VII.10, presenta la superposición del cauce del río en 1972 y 1983.

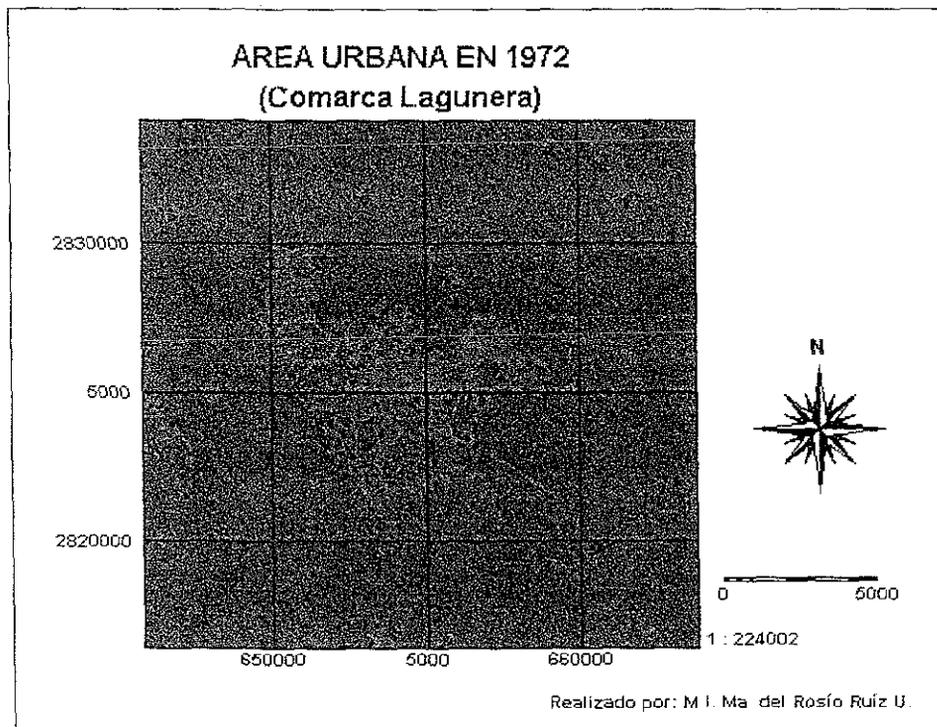
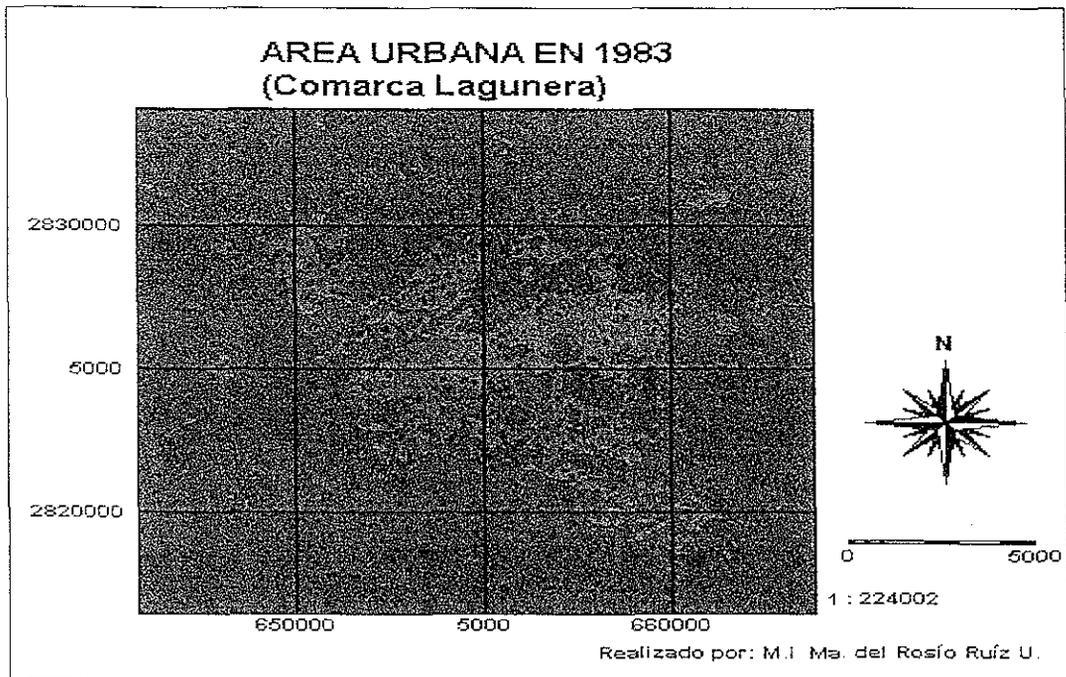
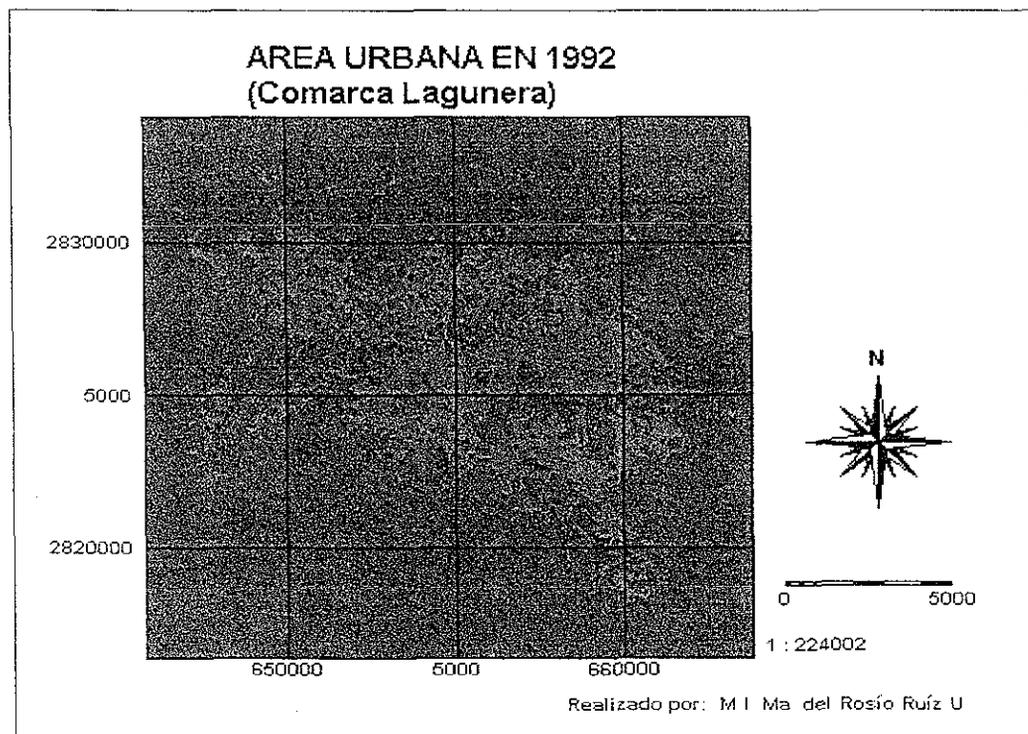


Fig. VII.7 Zona urbana en 1972.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



*Fig. VII.8 Zona urbana en 1983*



*Fig. VII.9 Zona urbana en 1992.*

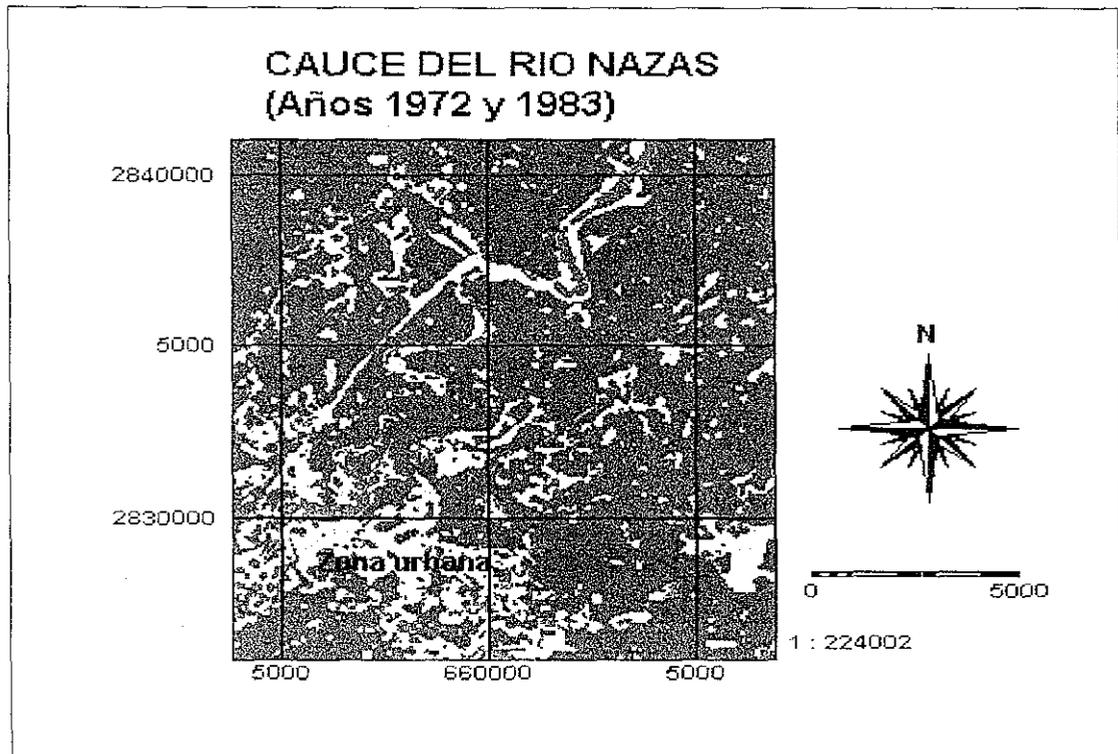


Fig. VII.10 Cauce del río en los años 1972 y 1983.

### CRECIMIENTO TEMPORAL DE LA MANCHA URBANA.

La población en la Comarca Lagunera, obtenida de los censos poblacionales publicados por INEGI, aparecen en la tabla VII.11 y su representación gráfica en la figura VII.11

| Municipio            | 1930  | 1940  | 1950   | 1960   | 1970   | 1990   | 1995   |
|----------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Cd. Lerdo</b>     | 18075 | 20143 | 28504  | 39232  |        | 94324  | 105533 |
| <b>Gómez Palacio</b> | 46481 | 52471 | 84440  | 103544 |        | 232742 | 257042 |
| <b>Torreón.</b>      | 74906 | 87765 | 147233 | 203183 | 250524 | 464825 | 508076 |

Tabla VII.11 Resultados obtenidos de los censos poblacionales.

Como las imágenes corresponden a los años 1972, 1983 y 1992, la población se calculó para esos años y se presentan en la tabla VII.12:

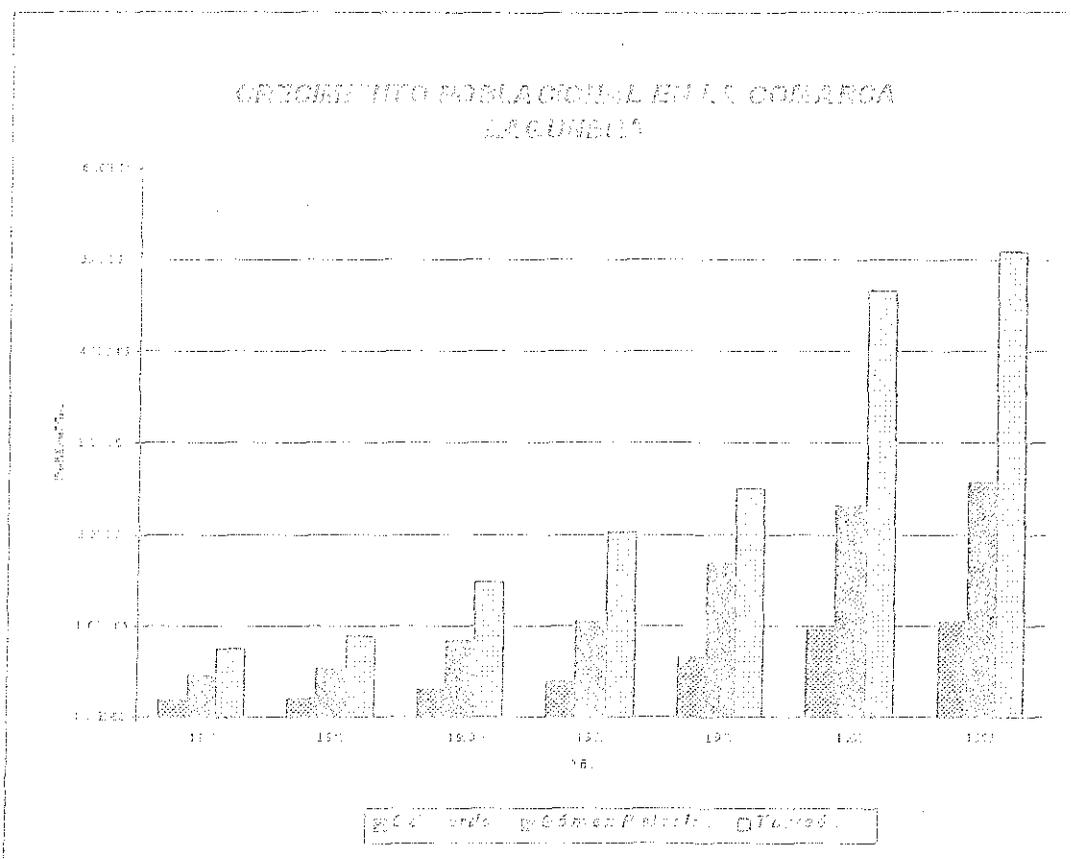


Fig. VII 11. Crecimiento poblacional de la Comarca Laguneña.

| Región        | 1970   | 1990   | 2007   |
|---------------|--------|--------|--------|
| Cód. Lerdo    | 61268  | 81469  | 98808  |
| Gómez Palacio | 155226 | 202596 | 244862 |
| Torreón       | 271954 | 369820 | 482125 |
| Total         | 488448 | 653885 | 825825 |

Tabla VII 12. Población interpolada del régimen histórico.

Las superficies urbanas fueron obtenidas con base en la información proporcionada por las imágenes de satélite al ser procesadas y se presentan en la tabla VII 13:

Se debe tener en cuenta que el área total de la región es de 66,500 y 85,000 km<sup>2</sup>.

| Año  | Polígonos | Área (m <sup>2</sup> ) | Área (ha) |
|------|-----------|------------------------|-----------|
| 1972 | 5888      | 20 908                 | 2090.9    |
| 1983 | 7176      | 25 509                 | 2550.9    |
| 1992 | 11456     | 40 720                 | 4072.0    |

Tabla VII.13 Superficies obtenidas de la imagen de satélite procesada.

La densidad de población fue calculada entonces, utilizando las tablas VII.13 y VII.12 para obtener los siguientes resultados en la tabla VII.14:

| Año  | Densidad (hab./ha) | Población (habitantes) |
|------|--------------------|------------------------|
| 1972 | 0.023              | 23360                  |
| 1983 | 0.026              | 26418                  |
| 1992 | 0.020              | 20281                  |

Tabla VII.14 Densidad de población en la Comarca Lagunera.

De la información anterior, se obtiene en la tabla VII.15 el cambio poblacional que ha sufrido la Región de la Laguna en el intervalo de estudio.

| Intervalo de estudio | Cambio poblacional |
|----------------------|--------------------|
| 1972-1983            | 38                 |
| 1983-1992            | 22.6               |

Tabla VII.15. Cambio en porcentaje de la zona urbana de 1972 a 1992.

El cambio en el crecimiento urbano, de acuerdo con la información de las imágenes procesadas en formato raster, se muestran en la tabla VII.16

| Año  | Área (ha) | Intervalo de estudio | Cambio (ha) | Cambio (%) |
|------|-----------|----------------------|-------------|------------|
| 1972 | 2090.9    |                      |             |            |
| 1983 | 2550.9    | 1972-1983            | 460         | 22         |

| Año  | Población | Período   | Cambio en Población | Cambio entre % |
|------|-----------|-----------|---------------------|----------------|
| 1992 | 40723     | 1983-1992 | 1521.4              | 59.6           |
|      |           | 1972-1992 | 1961.4              | 94.8           |

Tabla VII.16. Cambio en el crecimiento urbano en la Comarca Lagunera.

Se asume que el año de 1972 es el 100% para el cambio entre 1972 y 1983

Se asume que el año de 1983 es el 100% para el cambio entre 1983 y 1992

Se asume que el año de 1972 es el 100% para el cambio entre 1972 y 1992

Estos resultados pueden interpretarse de la siguiente forma.

A pesar de que el cambio poblacional entre 1983 y 1992 fue de 22.6 % el cambio urbano que se presentó fue de 59.6%. Si evaluamos la tendencia de crecimiento poblacional para el año 2010, ésta será de:

Tabla VII.17. Cálculo con el método aritmético, tabla VII.18 con el método geométrico.

| Municipio     | Población 2010 |
|---------------|----------------|
| Cd. Lerdo     | 139160         |
| Gómez Palacio | 329942         |
| Torreón       | 637629         |
| Total         | 1'106931       |

Tabla VII.17. Tendencia de crecimiento con método aritmético al año 2010.

| Municipio     | Población 2010 |
|---------------|----------------|
| Cd. Lerdo     | 147804         |
| Gómez Palacio | 346251         |
| Torreón       | 663508         |
| Total         | 1'157563       |

Tabla VII.18. Tendencia de crecimiento con método geométrico al año 2010.

De las tablas anteriores se obtiene un porcentaje de crecimiento al 2010 del 54% con el modelo aritmético y de un 40.2% con el modelo geométrico.

Al analizar los resultados de la tendencia de crecimiento poblacional con respecto al crecimiento urbano se puede deducir que se requiere para satisfacer la demanda de la población un crecimiento urbano del orden de un 89% con respecto a lo que se tiene en 1992, lo que significa tener urbanizada una superficie de 7696.95 ha.

El crecimiento poblacional en los años 1972, 1983 y 1992 se pueden apreciar simultáneamente en la imagen de la figura VII.12. Asignando el color rojo a la zona urbana de 1972, el color naranja a la de 1983 y en color verde a la de 1992.

Dicha gráfica nos permite establecer a simple vista que las ciudades de mayor crecimiento han sido Gómez Palacio y Torreón, la primera creciendo en dirección noroeste y la segunda en dirección sureste. Cd Lerdo prácticamente se ha mantenido su extensión original.

Dicho lo anterior, se tiene que tener una buena planeación para:

Evitar la invasión urbana en el lecho del río, lo que crearía áreas con alto grado de riesgo de inundación y cuernos de botella con posibilidad de formar remansos peligrosos en caso de una avenida extraordinaria.

Formar lagunas con derechos industriales que puedan crear problemas de salud y contaminación de acuíferos.

## CAMBIO GEOMORFOLÓGICO DEL RÍO.

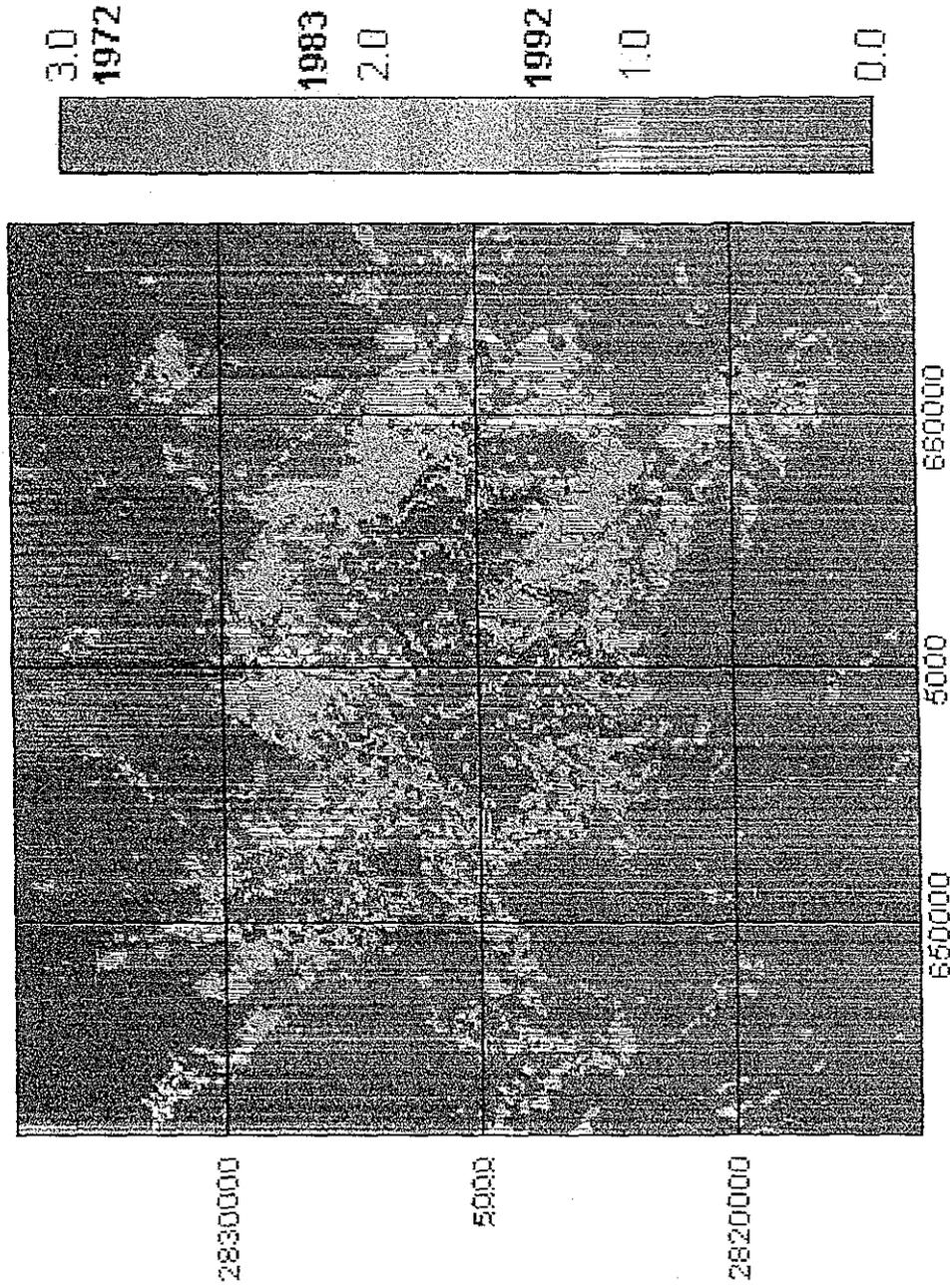
Para el caso de río Nazas, el análisis consistió en visualizar los caracteres geográficos de diferente orden, ya sea hidrológicos, geológicos y geomorfológicos en gran parte de su longitud de desarrollo, sin embargo, este estudio se enfocó al curso del río comprendido desde la mancha urbana hasta una longitud de 20 kms hacia aguas abajo.

La figura VII.13 muestra la superposición de las imágenes raster, asignándoles el color verde al comportamiento del lecho del río en 1972, el color naranja para 1983 y el color rojo para 1992.

De esta figura se puede comentar lo siguiente:

El río se ha incrementado en su caudal por la zona de la mancha urbana, debido a las condiciones de escorrentamiento, por lo que las variaciones de gasto y velocidad de la corriente determinarán la forma del cauce.

# CAMBIO TEMPORAL DE LA MANCHA URBANA



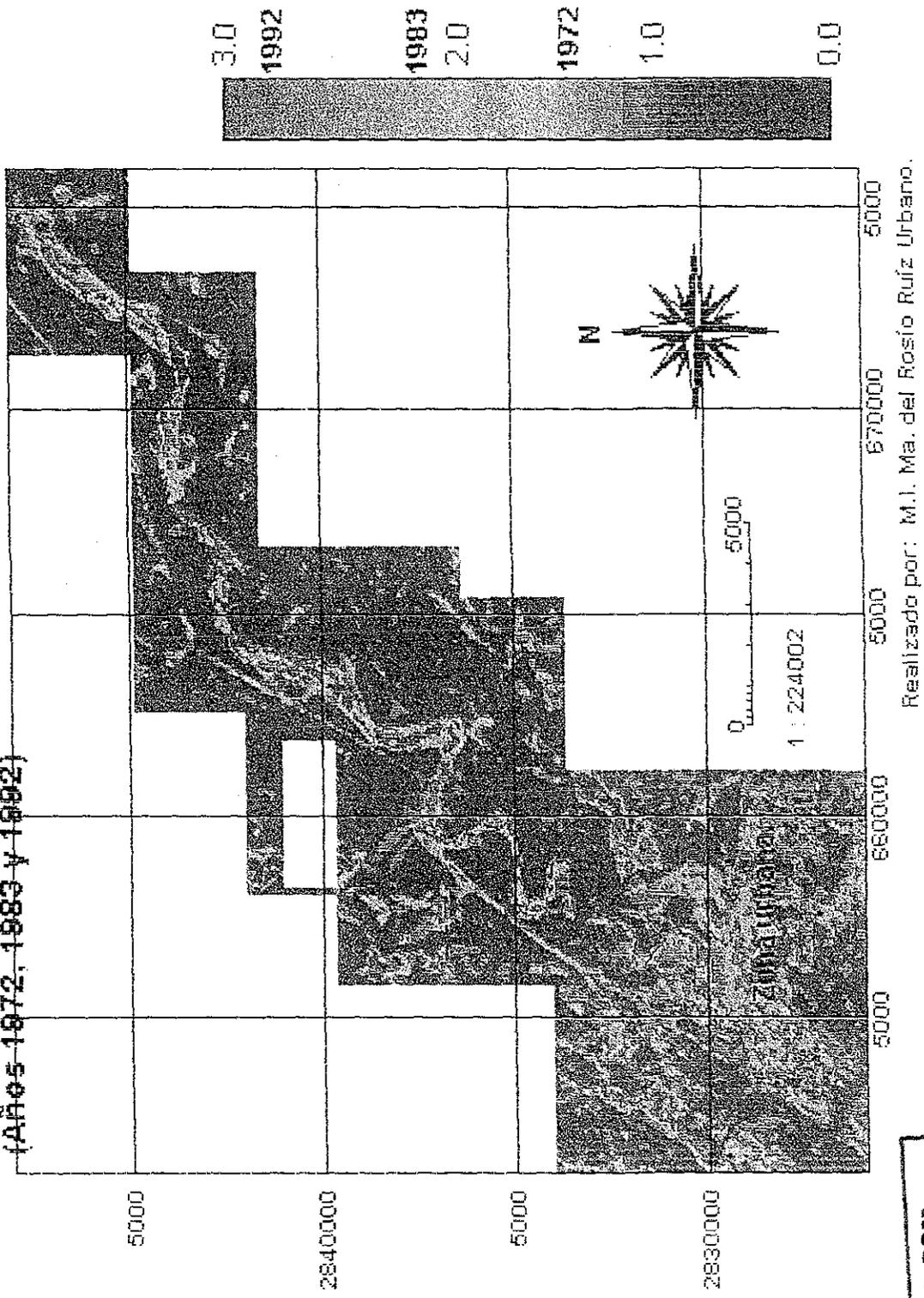
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Realizado por: M.I. Ma. del Rosío Ruiz Urbano

Fig. VII.12 Cambio temporal de la zona urbana de los años 1972 a 1992

**CAMBIO TEMPORAL GEOMORFOLÓGICO DEL RIO NAZAS.**

(Años 1972, 1983 y 1992)



Realizado por: M.I. Ma. del Rosío Ruíz Urbano.

Fig. VII.13 Cambio temporal del río Nazas de 1972 a 1992.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

En este caso, la zona estudiada corresponde propiamente a una fase de niveles bajos e nulos, correspondientes al estancamiento de caudaje y en caso de bajar por agua, solo se ocupará el canal de esbaje en el lecho menor.

Esto implica que cuando los periodos con niveles bajos son grandes, definirá una fase de estabilidad del cauce, debido fundamentalmente a la ineficiencia de los flujos moderados o nulos, para modificar sensiblemente el lecho del río, lo que se debe de entender que originará pocos cambios e incluso nulos en el lecho del río.

Sin embargo, a pesar del nulo escurrimiento en el cauce, los cambios detectados dentro de la relación espacio-tiempo, permiten observar la magnitud de los desplazamientos laterales río abajo, implicando así que el lecho fluvial se haya visto modificado con una reducción de su ancho en algunas secciones.

Finalmente, en la misma figura, se observa la configuración de los sucesivos estrechamientos del río, en el que las modificaciones del curso meándrico se acentúan fuertemente, por lo que se evidencia que los grandes periodos de estabilidad se han provocado cambios en el tiempo en el comportamiento meándrico.

Es importante señalar que aún con la estabilidad del cauce, se pueden presentar un problema grave debido en un momento dado a la dinámica fluvial en los núcleos de población, dada la inadecuada ubicación de los asentamientos humanos, es decir, que pudiera ser que el cambio sufrido en su ancho ha sido la respuesta a la existencia de áreas cultrecas hacia las mismas nacimientos del río, la construcción de obras de infraestructura o el crecimiento propio de la población, mismas que están expuestas a la amenaza constante de las inundaciones.

Esto significa a final de cuentas que a pesar de la disminución del cauce a lo largo del tiempo, en caso de una avaria extraordinaria el río reconocerá su cauce y provocará serios daños a la población y a sus bienes, por lo que se sugiere tener una política de planeación en cuanto a uso de suelo se refiere.

## CAPÍTULO VIII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### VIII.1 CONCLUSIONES.

- Se ha desarrollado una nueva metodología donde se integran las técnicas hidrológicas e hidráulicas tradicionales, un proceso con imágenes de satélite y fotografías aéreas, generando así, una visión diferente e la acostumbrada, que contribuye a la presentación de los resultados con técnicas de percepción remota.
- El resultado que se obtuvo con esta nueva metodología permitió cuantificar el peligro, vulnerabilidad y riesgo de inundación (zonificación), analizar los cambios temporales de la zona urbana y la geomorfología del río, consiguiendo de esta forma una visión integral que permita proponer medidas para su mitigación.
- El esquema metodológico puede ser ajustado de acuerdo con las necesidades del proyecto en cada región específica, es decir, introducir las generales y específicas sobre el camino que se debe seguir para obtener una respuesta satisfactoria.
- Las imágenes de satélite por ser una caracterización digital de terreno es una alternativa de solución confiable siempre y cuando se cuente con el suficiente entrenamiento para fotointerpretar y fotoidentificar los efectos.

Al aplicar el esquema metodológico propuesto en la Comarca Lagunera, se obtienen las siguientes conclusiones:

- El análisis hidrológico es un estudio indispensable en el diseño o análisis hidráulico, razón por lo cual debe estar siempre bien fundamentado.
- El cálculo de los perfiles para el río Nazas contempla la importancia de considerar la existencia de los puentes en el tramo motivo de estudio. Asimismo, considerar las condiciones tanto de flujo permanente como no permanente para efectos de comparación de resultados y definición de planicies de inundación.
- El análisis muestra además la importancia de tomar en cuenta no solo a cada puente en forma individual, sino a los sistemas de puentes que pueden encontrarse, y en consecuencia, definir los métodos de estudio.

- Se requiere siempre aplicar la clasificación supervisada y no supervisada para el procesamiento digital de imágenes y posteriormente descartar la que proporcione resultados menos satisfactorios.
- Elegida la clasificación, se tendrán que probar todos los criterios existentes para dividir las características de los píxeles y seleccionar la que proporcione mejor resultado.
- La escala de trabajo es fundamental, debido a que condiciona el número y desdoblamiento de las categorías a discriminar, es decir, antes de iniciar el trabajo se requiere elegir el sensor que cumpla con las condiciones de escala límite.
- Para la determinación de las zonas inundables, se utiliza un modelo bidimensional automatizado a través del programa FIED-RIOS. Se contempló exclusivamente la condición de una avenida para un período de retorno de 100 años.
- Al comparar los resultados de los perfiles para flujo permanente y no permanente se observa que el peligro por desbordamiento solo se presenta al principio y final del tramo de estudio, lo que significa que la mayor superficie urbana está protegida para una avenida correspondiente a 100 años de período de retorno (1900 m<sup>3</sup>/s).
- Es importante señalar, que las planicies de inundación presentadas en esta tesis corresponden exclusivamente a una avenida con 100 años de período de retorno. Sin embargo, es necesario comentar que los desbordamientos en algunas secciones transversales se hicieron para una avenida con período de retorno de 50 años correspondiente a un gasto de 1070 m<sup>3</sup>/s.
- Los puentes modifican las zonas inundables producto del remanso generado.
- Respecto a las condiciones de severidad de la inundación, se concluye que para gastos menores a 600 m<sup>3</sup>/s, el río no sufre desbordamientos en la mayor parte del tramo en estudio, siguiendo periódicamente la dirección del cauce, a excepción de una pequeña área urbana (Plano V.2), inundada cercana a la ubicación del Puente Doble, tal y como se puede apreciar en las fotos V.1, V.2 y V.3 del lugar. Lo que confirma el resultado obtenido por el modelo HEC-RAS, ya que dichas fotografías corresponden a una inundación provocada por un gasto  $Q = 550$  m<sup>3</sup>/s en el año de 1991.
- Por otro lado, el criterio geomorfológico nos permite determinar lo siguiente. Cualquiera sección transversal de río muestra dos topologías diferentes, en la parte superior la inundación es favorecida por el tipo de terreno, ya que la parte superior se favorece mucho la inundación debido a la planicie de la misma.

- En general se propone un nivel medio de vulnerabilidad ya que las viviendas existentes con diferentes niveles de peligro por inundación tienen viviendas particulares con piso firme de tierra, en su mayoría con más de dos cuartos y con un promedio de ocupantes por vivienda de 4-85 personas.
- Los niveles sugeridos para el peligro, vulnerabilidad y riesgo pueden ser modificados de acuerdo con las condiciones que considere pertinentes el analista.
- Existe invasión urbana en el lecho del río provocando áreas con alto grado de riesgo de inundación y cuellos de botella con posibilidad de formar remansos peligrosos en caso de avenidas extraordinarias.
- Se confirmó el crecimiento de la mancha urbana conforme al aumento de la población.
- El lecho del río Nazas es estable, dados los relativamente poco erosivos rimbos.
- Se detectó dentro de la relación espacio-tiempo los espigamientos laterales río abajo, así como la reducción de su ancho a lo largo de las tres fechas estudiadas.
- El comportamiento métrico del río no ha sufrido cambios en el tiempo considerado.
- La formación de lagunas con detritus fácilmente pueden crear problemas de salud y contaminación del acuífero.

## VII.2 RECOMENDACIONES.

- Si la zona de estudio no se encuentra aforada, se recomienda hacer un análisis hidroológico regional
  - Es necesario contar con información topográfica suficiente y detallada para definir las zonas afectadas.
  - Realizar un estudio de factibilidad económica y técnica, mediante el cual se pueda definir la viabilidad de la canalización del río Irazac, en por lo menos la zona urbana
  - Revisar la capacidad de los canales de desvío para tener suficiente capacidad hídrica y con base en los volúmenes esperados modificar algunas secciones transversales.
  - Se sugiere elaborar un plan de trabajo que establezca que deberá dársele prioridad a la recepción de la información hidrometeorológica
  - Es esencial formular estrategias de manejo y prevención de desastres.
  - Es necesario planificar el crecimiento demográfico para optimizar las inversiones que trae consigo este desarrollo.
- Evitar la invasión urbana en el lecho del río, para disminuir o anular áreas con alto grado de riesgo de inundación
- Contar con una política de planeación en cuanto a uso de suelo se refiere.

En la metodología propuesta se presentan algunas recomendaciones con las diferentes opciones que ofrecen las imágenes de percepción remota

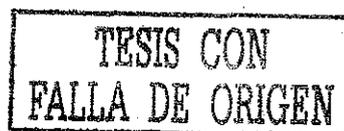
- Seleccionar y definir el área de trabajo para calcular su cubrimiento en las diferentes imágenes de percepción remota
- Calcular los rendimientos y justificar la inversión para adquirir las imágenes.
- Asegurarse del tamaño y la capacidad del equipo disponible, así como verificar el software e utilizar para llevar a cabo el procesamiento digital de imágenes.

- Si el área de trabajo es de gran extensión, se recomienda realizar la inversión en la imagen de satélite de alta resolución espacial, si por el contrario el área de análisis es pequeña se recomienda el empleo de la fotografía aérea, es más probable encontrar el cultivo de interés en esta herramienta de la percepción remota, si se desea, se puede emplear como producto raster para la generación de vectores sobre ellas con un sistema de información geográfico.
- Si se trabaja con fotografías aéreas rasterizadas se debe de considerar el espacio que ocupan en el almacenamiento del disco duro.
- Si se emplea una imagen de satélite, se debe de tener en cuenta la fecha de toma, es recomendable con la época de lluvias para evitar en lo posible las nubes en la escena.
- Diseñar el muestreo para la verificación de los procesos de fotointerpretación y clasificación de imágenes de sensores remotos, es en este punto donde se minimiza el tamaño de la muestra para reducir costos del trabajo de campo sin perder la representatividad del conjunto.
- Capacitar personal en el manejo de las imágenes de percepción remota para aprender a fotointerpretar y fotoidentificar los objetos de interés en el proyecto que se presentan con sus propias características en la respuesta espectral.
- Desarrollar cada fase de la metodología hasta el final y en forma paralela las etapas que así estén diseñadas, para conjuntar esfuerzos cuando ésta lo requiera sin sufrir retrasos en el tiempo de comparación y análisis de resultados.
- Finalmente, se recomienda repetir este estudio con imágenes de satélite con sensor SPOT y/o Landsat Thematic Mapper (TM), con mejor resolución en pixel.

## BIBLIOGRAFÍA.

- 1 - American Society of photogrammetry (1975) "Manual of remote sensing" Falls Church, Va USA
- 2 - Aris W., Dougal, M. (1990). "Flood-plain regulation laws" Capítulo XI pp 169-178.
- 3 - Bevil, E. C., Curtis I. F. (1987) "Introduction to environmental remote sensing" London Chapman and Hall.
- 4 - Beedien, F.B., Huber, W.C., (1989). "Hydrology and floodplain analysis". Adison Wesley Publishing Company; USA
- 5 - Bezowsky, M y Jiménez, A. (1995) "Flujo no permanente en ríos" Instituto de Ingeniería, UNAM, Series del Instituto de Ingeniería, No. 574, 139 pp
- 6 - Bocco G, Sánchez R (1995) "GIS affects flood planning efforts". GIS world Inc Fort Collins. USA
- 7 - Chuvieco, E (1995) "Fundamentos de teledetección espacial". Ediciones Rialp. Madrid, España
- 8 - Guzikobank, C. y Zumaya, E (1974). "Simulación matemática del flujo de avenida sobre llanuras de inundación". Memorias del VI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Colombia.
- 9 - Domínguez, R., (1982). "Manual de Hidráulica Urbana" Biblioteca Dirección general de construcción y operación hidráulica" México
- 10 - Domínguez, R., (1994) "Reflexiones sobre las inundaciones en México" Cuadernos de Investigación. Centro Nacional de Prevención de Desastres México
- 11 - Domínguez, R., (1995) "Inundaciones" Fascículo No 3 Sistema Nacional de Protección Civil México.
- 12 - Domínguez, R., Sánchez J. (1990). "Las inundaciones en México. Proceso de inundación y sus efectos" Memorias del Congreso de Ingeniería. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.

- 13 - Eustaquio, C., Quisque, V (1995) "Uso de la Percepción Remota y los SIG en la determinación de las áreas vulnerables a riesgos naturales". Boletín SELPER México. Septiembre,
- 14 - Farissier, F. Givone, F (1993) "Mapping and management of floodplains" HydroGIS 93 Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources IAHS Publ 211
- 15 - Federal emergency management agency (1992) "Flood insurance study" Wright county Minnesota . USA
- 16 - Ferguson Foundation Agricultural Engineering Series. "Legal aspects of Soil and Water Conservation" Soil and water conservation engineering. Segunda edición USA
- 17 - Fuentes, M.O., et al (1994) "Estudio hidráulico del río papaloapan desde las presas Miguel Alemán y Miguel de la Madrid hasta su desembocadura al mar". Proyecto 2316 Elaborado para la Comisión Nacional de Agua. México.
- 18 - Fuentes, M.O et al (1996) "Escurecimientos en ríos y volúmenes de inundación por desbordamiento" Coordinación de Investigación, CENAFRED, México.
- 19 - Fuentes, M. O., Franco, H. L., "Modelo matemático de áreas de inundación". Coordinación de Investigación, CENAFRED, México
- 20 - Gelman O, Macias S (1982) "Plan de prevención y mitigación de los sistemas hidráulicos, eléctrico y de transporte ante calamidades hidrometeorológicas" Proyecto 2520 Departamento del Distrito Federal México.
- 21 - Goduard J (1960) "The cooperative program in the Tennessee Valley" Capítulo X. pp 146-168
- 22 - Herrera, C (1997) "Problemática del agua en México". Curso Agua y Futuro, Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica, Instituto de Geografía UNAM. México.
- 23 - Hertzler, R (1970) "Corps of engineers' experience relating to flood-plain regulation". Capítulo XII pp 181-202
- 24 - Haktanir, T, Arslan, A (1990) "On the origin of the flood plain frequency analysis". Water resources research. Vol. 29 No. 2 pp 271-281



- 25 - Hutchison, I., Watt, E. (1993) "A systematic approach to flood risk mapping". Inputs of risk analysis in water systems. pp 225-241
- 26 - Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (1996). "Programa Sociodemográfico. Coahuila y Durango" México
- 27 - International Institute for aerospace survey and earth sciences (1997). "ILWIS. Owner's manual". Enschede the Netherlands
- 28 - Jiménez, M (1993) "Manual de operación del programa AX/ED/E" Coordinación de Investigación, CENAPRED, México
- 29 - Kalos, R., White, G. (1960) "Flood hazard evaluation" Chapter IX. New York. Technology Press, pp 135-147.
- 30.- Lira, J "Análisis digital de imágenes y percepción remota". Instituto de Geofísica. UNAM. México, Vol. No 2
- 31 - Lugo, H.J. (1989). "Diccionario geomorfológico" Instituto de Geografía UNAM. México
- 32 - Martínez, J.R (1994) "Modelos digitales de terreno". Boletín mensual SICORI Pemex México
- 33 - Maza, A (1996) "Estudio de gran visión para el control de inundaciones (Bajo río Pánuco y sus afluentes)". XIV Congreso Nacional de Hidráulica Puebla México
- 34 - Muller, H (1997) "Integrating floodplain management and numerical modelling, using Arc-View". Danish Hydraulic Institute. Horsholm Denmark.
- 35 - Muñoz, H., Conde, R (1990) "Evaluación de riesgos por urbanización en zonas montañosas de Monterrey, N. L.". Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Nuevo León México.
- 36.- Nathan R.J. McMahon T.A (1990). "Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation". Journal of Hydrology.
- 37 - O.N.U. (1991) "Manual and guidelines for comprehensive flood loss assessment and management"

- 38 - Ortíz, M., Romo, A. (1997) "Modificaciones de la trayectoria meándrica en el curso bajo del río grande de Santiago, Nayarit, México". Investigaciones geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM México
- 39 - Padilla J.C. (1997) "Programas contra inundaciones". Encuentro Nacional de presidentes municipales. Sistema Nacional de protección Civil. México.
- 40 - Palma N. A. (2000) "Tránsito de avenidas en redes complejas en ríos" Tesis de maestría DEPFI. UNAM
- 41 - Paris, J. (1997) "Iniciación a la teledetección". Curso Agua y Futuro, Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica Instituto de Ingeniería, UNAM. México.
- 42 - Reyes, C. (1995) "Estrategia y Sistemas de Información Geográfica". SICORI, Boletín mensual Sistema corporativo de Información geográfica. México.
- 43 - Ronald E. (1990) "IDRISI. A grid based geographic analysis system". Clark University Worcester, Massachusetts, USA.
- 44 - Ruiz, R. (1997) "Medidas estructurales en daños causados por inundaciones en zonas urbanas asentadas a un lado de un río" Coloquio: La investigación en la Facultad de Ingeniería, UNAM., México.
- 45 - Ruiz, R., Echávez, G. (1998) "Efecto producido por los puentes en los perfiles de agua en el cauce de un río". XV Congreso Nacional de Hidráulica. Oaxaca, México
- 46 - Ruiz, R., Echávez, G. (2000) "Análisis multitemporal geomorfológico del río Navas y sus afectación a zonas urbanas, utilizando imágenes de satélite" XVI Congreso Nacional de Hidráulica. Michoacán, México.
- 47 - Santos, C. (1992) "Interacción entre transporte y expansión urbana irregular. Uso de técnicas de Percepción Remota" Tesis de maestría. DEPFI. UNAM.
- 48 - Santos, C. (1994). "Programa de la asignatura de percepción remota" Facultad de Ingeniería, UNAM. México
- 49 - Santos, C., Antún J. (1995) "Exploración de la evolución del uso de suelo en la zona poblada del Municipio de San Juan de los Ríos". Boletín SELPER. México



- 50 - Sanvicente S. (1995) "Sistema para la evaluación de recursos naturales mediante imágenes de satélite". Tesis de maestría. DEPMI UNAM
- 51 - The world's source for commercial remote sensing information (1999) "Imaging notes" Grant St Thornton USA.
- 52 - US Army Corps of Engineers. Hidrologic Engineering Center (1990) "HEC-2". User's Manual Version 4.6.0.
- 53 - US Army Corps of Engineers. Hidrologic Engineering Center (1998). "HEC-RAS". User's Manual Version 2.1
- 54 - Vega, G. (1999) "Evaluación del riesgo por inundación en la Cuenca alta del río Lerma" Tesis de maestría en ciencias del agua Univ. Aut. del Estado de México

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**